LIVRO DE ATAS

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS | CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Atas CERIS

CERIS : Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade

01

Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024

Editores

A Comissão Organizadora: Jorge de Brito (Presidente), José Dinis Silvestre (Vice-Presidente), Albano Neves e Sousa, Ana Paula Pinto, António Moret Rodrigues, Augusto Gomes, Carlos Oliveira Cruz, Cristina Matos Silva, Fernando Branco, Inês Flores-Colen, João Gomes Ferreira, João Ramôa Correia, José Alexandre Bogas, Maria Glória Gomes, Pedro Gameiro Henriques, Rita Nogueira, Vitor Sousa

Citação recomendada

de Brito, J.; Silvestre, J.D.; Neves e Sousa, A.; Pinto, A.P.; Rodrigues, A.M.; Gomes, A.; Cruz, C.O.; Silva, C.M.; Branco, F.; Flores-Colen, I.; Ferreira, J.G.; Correia, J.R.; Bogas, J.A.; Gomes, M.G.; Henriques, P.G.; Nogueira, R.; Sousa, V. (eds.) (2024) *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS, Lisboa, Portugal. Atas CERIS 01-2024.

Composição

Vitor Sousa

Edição

CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade
Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa - Portugal, ceris@tecnico.ulisboa.pt

N.º de Edição

1

Local e data de publicação

Lisboa, 6-8 de novembro de 2024

ISBN

978-989-95625-9-2

Código CERIS

Atas CERIS 01-2024

Notas

A totalidade desta publicação está protegida por direitos de autor. A informação contida neste guia foi compilada, tanto quanto é do conhecimento e convicção dos autores, de acordo com os princípios de boas práticas científicas. Os autores acreditam que a informação contida neste guia está correta, completa e atual, mas não aceitam qualquer responsabilidade por quaisquer erros, explícitos ou implícitos. As declarações contidas neste documento não refletem necessariamente a opinião das instituições.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EDITORIAL

O 5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (CLBMCS 2024) deu continuidade à série de congressos que teve início em 2014, em Guimarães, com edições posteriores em João Pessoa (2016), Coimbra (2018) e Salvador (2022). O objetivo principal tem sido de proporcionar um fórum para a apresentação e discussão de inovações tecnológicas associadas aos materiais para construção civil que colaborem no desenvolvimento sustentável deste setor. Prosseguindo na senda das edições anteriores, o CLBMCS 2024 juntou especialistas de diferentes áreas para debater a sustentabilidade dos materiais de construção, tanto na perspetiva do desenvolvimento de novos materiais ou da melhoria do desempenho de materiais tradicionais, como da sua integração mais sustentável nas construções, dos métodos de avaliação da sustentabilidade ou no desenvolvimento de mecanismos de promoção da sustentabilidade na construção.

O Congresso Construção 2024, que decorreu em paralelo com o CLBMCS 2024, teve como objetivo principal reunir especialistas para apresentar resultados de investigações e discutir perspetivas de futuros desenvolvimentos relativos ao setor da construção. Este Congresso surge na sequência de congressos similares que decorreram em Lisboa (2001 e 2015), Porto (2004), Coimbra (2007 e 2012), Porto (2018) e Guimarães (2022), mantendo um âmbito holístico e envolvendo áreas tão diversas como os materiais de construção, a física das construções, as tecnologias construtivas, o controlo da qualidade, a gestão técnico-financeira, a patologia e reabilitação e a sustentabilidade na construção, entre outras.

O CLBMCS2024/Construção 2024 contou com um total de cerca de 350 participantes, oriundos de 11 países da Europa, América Latina e África, tendo sido apresentadas 7 palestras por especialistas internacionais e 303 comunicações, organizadas nos seguintes 8 temas:

1. Materiais eco-eficientes e de baixo carbono
2. Materiais inovadores
3. Economia circular na construção
4. Avaliação e modelação da sustentabilidade
5. Física das construções e edifícios saudáveis
6. Gestão da construção
7. Patologia e Reabilitação
8. Casos de estudo

Durante o congresso, tiveram ainda lugar 2 seminários de especialização sobre:

1. Técnicas de beneficiamento e caracterização de tecidos e fibras vegetais para uso como reforço de sistemas construtivos
2. Avaliação do ciclo de vida para a descarbonização e eficiência de recursos da construção

O CLBMCS2024/Construção 2024 realizou-se na cidade de Lisboa, distinguida frequentemente como um dos melhores destinos do mundo, pela sua beleza, história, cultura, gastronomia e cosmopolitismo.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PARCEIROS

PATROCINADORES

APOIOS INSTITUCIONAIS

APOIOS MULTIMÉDIA

COMISSÕES

COMISSÃO ORGANIZADORA

Jorge de Brito (Presidente)
José Dinis Silvestre (Vice-Presidente)
Albano Neves e Sousa
Ana Paula Pinto
António Moret Rodrigues
Augusto Gomes
Carlos Oliveira Cruz
Cristina Matos Silva
Fernando Branco
Inês Flores-Colen
João Gomes Ferreira
João Ramôa Correia
José Alexandre Bogas
Maria Glória Gomes
Pedro Gameiro Henriques
Rita Nogueira
Vitor Sousa

COMISSÃO CIENTÍFICA

João Ramôa Correia (Presidente) (Universidade de Lisboa - IST)
Carlos Oliveira Cruz (Vice-Presidente) (Universidade de Lisboa - IST)
Aires Camões (Universidade do Minho)
Albano Neves e Sousa (Universidade de Lisboa - IST)
Álvaro Vale e Azevedo (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Ana Briga Sá (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro)
Ana Paula Pinto (Universidade de Lisboa - IST)
Ana Silva (Universidade de Lisboa - IST)
Ana Sofia Guimarães (Universidade do Porto - FEUP)
Ana Velosa (Universidade de Aveiro)
Anabela Paiva (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro)
Angela Masuero (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)
António Aguiar Costa (Universidade de Lisboa - IST)
António Bettencourt Ribeiro (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
António Moret Rodrigues (Universidade de Lisboa - IST)
António Santos Silva (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Augusto Gomes (Universidade de Lisboa - IST)
Cintia Maria Ariani Fontes (Universidade Estadual de Feira de Santana)
Clara Pereira (Universidade de Lisboa - IST)

Cleber Dias (Universidade Federal da Bahia)
Cristina Matos Silva (Universidade de Lisboa - IST)
Daniel Aelenei (Universidade Nova de Lisboa)
Eduardo Cabral (Universidade Federal do Ceará)
Eva Barreira (Universidade do Porto - FEUP)
Fátima Farinha (Universidade do Algarve)
Fernando Branco (Universidade de Lisboa - IST)
Fernando G. Branco (Universidade de Coimbra)
Fernando Pinho (Universidade Nova de Lisboa)
Florindo Gaspar (Instituto Politécnico de Leiria)
Guilherme Chagas Cordeiro (Universidade Estadual do Norte Fluminense)
Helena Cruz (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Hipólito Sousa (Universidade do Porto - FEUP)
Holmer Savastano Junior (Universidade de São Paulo)
Hugo Costa (Instituto Politécnico de Coimbra)
Hugo Rodrigues (Universidade de Aveiro)
Humberto Varum (Universidade do Porto - FEUP)
Inês Flores-Colen (Universidade de Lisboa - IST)
Isabel Martins (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Isabel Torres (Universidade de Coimbra)
João Castro Gomes (Universidade da Beira Interior)
João Custódio (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
João Gomes Ferreira (Universidade de Lisboa - IST)
João Lanzinha (Universidade da Beira Interior)
João Nuno Pacheco (c5Lab)
João Pedro Couto (Universidade do Minho)
João Pedro Firmo (Universidade de Lisboa - IST)
João Poças Martins (Universidade do Porto - FEUP)
Jorge Branco (Universidade do Minho)
Jorge de Brito (Universidade de Lisboa - IST)
José Aguiar (Universidade de Lisboa - FAUL)
José Alexandre Bogas (Universidade de Lisboa - IST)
José Barroso Aguiar (Universidade do Minho)
José Dinis Silvestre (Universidade de Lisboa - IST)
José Gonilha (Universidade de Lisboa - IST)
Julieta António (Universidade de Coimbra)
Luís Godinho (Universidade de Coimbra)
Luís Juvandes (Universidade do Porto)
Manuela Almeida (Universidade do Minho)
Manuel Duarte Pinheiro (Universidade de Lisboa - IST)
Marcelo Strozi Cilla (Universidade Federal da Bahia)
Marcos Silvoso (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Maria da Glória Gomes (Universidade de Lisboa - IST)
Mário Garrido (Universidade de Lisboa - IST)
Miguel Amado (Universidade de Lisboa - IST)
Miguel Azenha (Universidade do Minho)
Miguel Bravo (Universidade de Lisboa - IST)
Miguel Oliveira (Universidade do Algarve)
Normando Perazzo Barbosa (Universidade Federal da Paraíba)
Nuno Ramos (Universidade do Porto - FEUP)
Nuno Simões (Universidade de Coimbra)
Paula Couto (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Paulina Faria (Universidade Nova de Lisboa)
Paulo Lourenço (Universidade do Minho)
Paulo Roberto Lopes Lima (Universidade Estadual de Feira de Santana)
Paulo Santos (Universidade de Coimbra)
Paulo Vila Real (Universidade de Aveiro)
Pedro Gameiro Henriques (Universidade de Lisboa - IST)
Pedro Gaspar (Universidade de Lisboa - FAUL)
Pedro Raposeiro da Silva (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa)
Raimundo Mendes da Silva (Universidade de Coimbra)
Ricardo Almeida (Instituto Politécnico de Viseu)
Ricardo Mateus (Universidade do Minho)
Rita Nogueira (Universidade de Lisboa - IST)
Romeu Vicente (Universidade de Aveiro)
Rosana Muñoz (Universidade Federal da Bahia)
Rosário Veiga (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Rui Fernandes Póvoas (Universidade do Porto - FAUP)
Rui Silva (Universidade de Lisboa - IST)
Sandra Cunha (Universidade do Minho)
Susana Fonseca (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Vanessa Gomes (Universidade Estadual de Campinas)
Vasco Peixoto de Freitas (Universidade do Porto - FEUP)
Victor Ferreira (Universidade de Aveiro)
Vítor Abrantes (Universidade do Porto - FEUP)
Vítor Sousa (Universidade de Lisboa - IST)

COMISSÃO CONSULTIVA

CLBMCS

José Barroso Aguiar (Presidente)
António Tadeu
Jorge de Brito
Normando Barbosa

Paulo Lima

CONSTRUÇÃO

António Tadeu (Presidente)
Jorge de Brito
Manuela Almeida
Paulina Faria
Vasco de Freitas
Victor Ferreira

Índice Geral

Editorial **I**

Parceiros **II**

Comissões **III**

Tema 1. Materiais eco-eficientes e de baixo carbono **VIII**

Tema 2. Materiais inovadores **XVIII**

Tema 3. Economia circular na construção **XXI**

Tema 4. Avaliação e modelação da sustentabilidade **XXIII**

Tema 5. Física das construções e edifícios saudáveis **XXV**

Tema 6. Gestão da construção **XXVII**

Tema 7. Patologia e reabilitação **XXIX**

Tema 8. Casos de estudo **XXXI**

Índice de autores **3456**

Tema 1. Materiais eco-eficientes e de baixo carbono

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1107	Durabilidade do betão com substituição parcial de cimento portland por incorporação de óxido de magnésio reativo e cinzas volantes	Sequeira, Lucas; Forero, Javier; Evangelista, Luís; De Brito, Jorge; Bravo, Miguel	2
1109	Avaliação do desempenho de revestimentos térmicos como incremento de conforto nas aldeias históricas	Velosa, Ana; Rodrigues, Hugo; Silva, Paulo; Beirante, Mariana	14
1110	Utilização de pó de vidro para o desenvolvimento de betões sustentáveis com reduzida utilização de cimento	Moreira Junior, Othon Oliveira; Meireles De Castro Malheiro, Raphaele De Lira; F.L. Camões Azevedo, Aires Fernando	27
1112	Caraterização físico-mecânica de argamassas com incorporação de resíduos da indústria de processamento de rochas ornamentais	Modesto, Alice M; Lamas, Pedro C; Pinho, Fernando F S	39
1114	Revestimentos interiores com base em gesso – efeito da composição e da aplicação na resistência à fendilhação	Brigas, Fábio; Freire, Teresa; Sousa, Ãngela; Faria, Paulina	48
1125	Impacto de lama de dragagem em compósitos de cimento sulfoaluminato de cálcio	Tambara, Luís; Batista, Isabela; Carneiro, Juliane; Silva, Luíz Gustavo; Alexandre, Jonas; Xavier, Gustavo; Azevedo, Afonso	59
1127	Viabilidade de incorporação de resíduos de vidros industriais na produção de argamassas sustentáveis	Ferreira, Duarte; Oliveira, António Daniel; Silva, Ricardo; Corrêa, Marco; Jesus, Carlos; Malheiro, Raphaele; Camões, Aires	70
1128	Impacto da cura por carbonatação acelerada em argamassas com incorporação de pó de vidro e cinzas volantes	Figueiredo, Helene; Moreira, Othon; Reis, Rui; Kaptan, Kubilay; Camões, Aires; Malheiro, Raphaele	81
1129	Eficiência dos tratamentos superficiais à base de hidróxido de sódio e ácido tânico em fibras de açaí para sua utilização como material de reforço em compósitos cimentícios	Natalli, Juliana; Pereira, Iully; Mothe, Geórgia; Ferreira, Felipe; Marvila, Markssuel; Azevedo, Afonso	92
1139	Avaliação do impacte ambiental de etics - a influência da incorporação de nanomateriais em revestimento de cor escura	Santos, Bruno; Pedroso, Marco; Veloso, Rita C.; Souza, Andrea; Silva, Daniela; Ramos, Nuno M. M.; Maia, Joana	101
1142	Influência da inclusão de nanomateriais refletantes em primários escuros para etics	Veloso, Rita Carvalho; Cunha, Joana Portilho; Maia, Joana; Souza, Andrea; Ventura, João; Ramos, Nuno M.M.; Teles Nunes, J.; Soeira, Bruno	113
1146	Economia circular em lajes compósitas clt-betão pré-fabricado	Albino, Carlos; Vicente, Romeu; Ferreira, Victor	123
1147	Fine carbonated construction and demolition wastes as eco-efficient materials in cement matrices	Frías, Moisés; Moreno, Ana; Paredes, María Victoria; Vigil, Raquel; García, Rosario; Marínez, Sagrario; Oleaga, Asier; Moreno, Jaime; Vegas, Iñigo; Erkizia, Edurne	135

Id	Título	Autores	Pág.
1150	Assesment of mortars with fine recycled concrete aggregates coated with tio2 nanoparticles	Letelier, Viviana; Suazo-Hernándeza, Jonathan; Suazo, Alejandro; Bustamante, Marión; Wenzel, Bruno	146
1156	Potential contribution of building integrated photovoltaics in the retrofit of buildings for social housing	Batista, Fernanda Pereira; Guimarães, Ana Sofia; Palmero-Marrero, Ana Isabel	162
1157	Viabilidade de uso da cinza de casca de café como ativador alcalino alternativo	André Junior, Davi; Barraza, Madeleing; Vieira, Carlos; Marvila, Markssuel; Azevedo, Afonso	174
1159	Desempenho térmico de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado	Real, Sofia; Bogas, José; Cruz, Ricardo; Nabais, Martim; Gomes, Maria Glória	182
1160	Isolamento térmico natural: médula de montanoa quadrangularis shultz bip	Jiménez Obando, Gustavo; Correa Tolosa, Ricardo Augusto; Arcila Henao, Juan Sebastián; Montoya Barreto, Sandra	194
1161	Valorização de dreche cervejeira como solução de base natural para isolamento térmicos	Tarlattini, Stefano; Antunes, Vítor; Manso, Maria; Canto, João; Guerra, Cristina; Silva, Joaquim Pedro	206
1169	Revisão sistemática da literatura no âmbito do desempenho higrotérmico de argamassas térmicas com incorporação de resíduos	Barros, Amanda Diniz; Barreira, Eva Sofia Botelho Machado; Maia, Lino Manuel Serra; Lopes, Maria De Lurdes Da Costa	218
1174	Incorporação de resíduo cerâmico moído em tijolos de solo-cimento	Aguiar, Amanda De Oliveira; Cerqueira, Niander Aguiar; Alexandre, Jonas; Azevedo, Afonso Rangel Garcez De	230
1175	Avaliação do comportamento no estado fresco de argamassas colantes incorporadas com resíduo de rochas ornamentais	Silva, Marilucia Dos Santos; Alexandre, Jonas; Cerqueira, Niander Aguiar; Zanelato, Euzébio Bernabé; Azevedo, Afonso	242
1176	Comportamento sob compressão e flexão de prismas de alvenaria de tijolos cerâmicos reforçada com argamassa com fibras de juta	Farias, Lidianne Do Nascimento; Lima, Paulo Roberto Lopes; Toledo Filho, Romildo Dias	249
1182	Influência da granulometria e do teor de sílica amorfa em cinzas de casca de arroz	Pinheiro, Divino Gabriel Lima; Rêgo, João Henrique Da Silva	260
1183	Caracterização química e mecânica de pastas de cimento ternárias contendo argila calcinada e nanossilica	Pinheiro, Divino Gabriel Lima; Rêgo, João Henrique Da Silva; Rojas, Moisés Frias	272
1185	Durabilidade de blocos de terra comprimida estabilizados com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão	Cruz, Ricardo; Bogas, José; Real, Sofia; Rodrigues, José	286
1186	Caracterização mecânica e retração de blocos de terra comprimida estabilizados com ligantes recuperados a partir da fração cimentícia de resíduos de betão	Cruz, Ricardo; Bogas, José; Nabais, Martim; Real, Sofia	298
1189	Comportamento higroscópico de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado	Real, Sofia; Bogas, José; Cruz, Ricardo; Gomes, Maria Gloria	310
1190	Optimising accelerated carbonation curing for enhanced mechanical performance of alkali-activated materials	Lamaa, Ghandy; Duarte, António P. C.; De Brito, Jorge; Silva, Rui Vasco	322

Id	Título	Autores	Pág.
1193	Economia circular na produção de betão sustentável: revisão sistemática sobre a valorização de resíduos de construção e demolição	Rocha, Stéphanie; Ascensão, Guilherme; Maia, Lino	332
1196	Desenvolvimento de um painel isolante biocompósito produzido a partir de fibras de coco: análise do desempenho térmico e acústico	Vettorazzi, Egon; Figueiredo, António; Vela, German; Ascensão, Guilherme; Vicente, Romeu; Oliveira, Mónica	344
1197	Contribuições ao estudo da ativação alcalina de rejeito de minério de ferro para a produção de tijolos prensados	De Faria, Andreia Da Conceição; Martins De Moura, Cristopher Antonio; Costa Ferreira, Matheus Henrique Dela; Almada, Bruna Silva; Paulino Aguilar, Maria Teresa; Brigolini Silva, Guilherme Jorge	353
1198	Estudo da ativação alcalina sólida de filitos de diferentes origens	Gonçalves, Dayana Keitty Carmo; Silva, Guilherme Jorge Brigolini; Sales, Rosemary Bom Conselho; Aguilar, Maria Teresa Paulino	365
1201	Argamassa com reuso de plástico contaminado com cimento portland na substituição da areia	Soares, Ricardo; Bellei, Poliana; Flores-Colen, Inês; Neves E Sousa, Albano	377
1209	Avaliação de misturas solo-cimento portland para impressão	Júnior, Sérgio Gonçalves Da Silva; Vicente, Thiago Da Silva; Barros, Ilana Maria Da Silva; Dias, Leonardo De Souza; De Medeiros, Fernanda Karolline; Anjos, Marcos A. S; Bezerra, Ulisses T.	386
1212	Análise reológica de pastas cimentícias contendo pó de vidro	Marques, Caio Múcio De Lacerda; Queiroz, José Henrique Maciel De; Alves, Leonardo Ferreira; Ferreira, Victor Vinícius De Oliveira; Nóbrega, Aline Figueirêdo; Malheiro, Raphaele De Lira Meireles De Castro	398
1213	Adição de diatomita super-hidrofóbica em pastas de gesso	Queiroz, Jéssica Conceição; Dias, Cleber Marcos Ribeiro	406
1214	Influência do tratamento das fibras do pseudocaule da bananeira sobre a aderência fibra-matriz cimenticia	Guimarães, Cleidson Carneiro; Lima, Paulo Roberto Lopes; Neto, Gilberto Alves Da Silva	421
1216	Comportamento mecânico e higroscópico de argamassas de revestimento com agregado miúdo reciclado de rcc	Dessuy, Thainá Yasmin; Bersch, Jéssica Deise; Yurgel, Gabriela; Ariotti, Layse; Zucchetti, Lais; Masuero, Angela Borges	432
1217	Argamassa autonivelante leve contendo resíduos de borracha da indústria calçadista (eva – ethylene vinyl acetate)	Souto, Maria Eduarda Do Nascimento; Moreira, Vynicius Barbosa Dos Santos; Silva, Jhennifer Larissa De Barros; Almeida, Rian Campos; Rocha, Fabíola Luana Maia; Nóbrega, Aline Figueirêdo	444
1219	Ligante especial à base de escória de aciaria elétrica a arco (eaea) ativada por co2 supercrítico	Silva De Vargas, Alexandre; Paula, Larissa; Weide, Helinton; Lubeck, André; A. Bertuol, Daniel; Castro-Gomes, João Paulo	456

Id	Título	Autores	Pág.
1221	Efeito do resíduo de cimento amianto tratado termicamente nas propriedades reológicas, mecânicas e ambientais de geopolímeros a base de metacaulim	Santana, Henrique; Ruviaro, Artur; Chotoli, Fabiano; Ribeiro, Daniel; Cilla, Marcelo; Dias, Cleber	467
1223	Avaliação da capacidade de impressão de misturas 3dcp com baixo teor de cimento e elevados teores de fíler calcário reforçadas por fibras	Mendes, Elias De Oliveira; Santos, Emile Medeiros Dos; Filho, Leonel Marques Da Silva; Medeiros, Fernanda Karolline De; Dias, Leonardo De Souza; Anjos, Marcos Alyssandro Soares Dos	479
1224	Tratamento de cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos como substituto de cimento em misturas de betão com agregados reciclados	Alnezami, Salem; Kurda, Rawaz; De Brito, Jorge; Silva, Rui Vasco	491
1225	Pó da palha de carnaúba como aditivo natural para impermeabilização de argamassa	Silva, Mariana; Oliveira, Marilia; Nóbrega, Aline; Malheiro, Raphaele	503
1227	Pegada de carbono do concreto produzido a partir da incorporação de resíduos industriais: uma revisão	Cunha, Lorena; Almeida, Edna; Neves Da Rocha, Lucas; Rivetti, Marianna; Conceição, Ana; Reis, Pedro; Mariani, Bruna; Santos, Pedro	515
1238	Cinza da folha de bambu como alternativa sustentável: avaliação da hidratação em pastas cimentícias	Velasco, Laura Ferreira; Cordeiro, Guilherme Chagas	524
1245	Geopolímeros fabricados com resíduos de bambu: uma abordagem ecoeficiente para construção sustentável	Constâncio Trindade, Ana Carolina; Seyedsa, Mobinasadat; Kadivar, Marzieh; Savastano Junior, Holmer	537
1246	Quantification of co2 captured by alkali-activated electric arc furnace slag and ground brick concrete using a thermogravimetric analysis technique	Kassim, Dany; Suescum-Morales, David; De Brito, Jorge; Silva, Rui Vasco	550
1247	Análise do comportamento à fratura de argamassas utilizando areia de britagem de diferentes granulometrias como substituta da areia natural	Costa, Vivianne Machado; Magalhães, Margareth Da Silva	561
1251	Incorporação de lamas de eta em caldas para consolidação de alvenarias	Baltazar, Luis G.; Nunes, Francisco	573
1253	Biomimética como ferramenta para o desenvolvimento de eco-materiais porosos na engenharia civil	Constantino, Joaquim; Gomes, J.Castro	583
1256	Reologia de pastas cimentícias contendo aditivos orgânicos sustentáveis.	Santos, Wesley Fêu Dos; Barros, Ilana Maria Da Silva; Ferreira, Tayná Chaves Santana Lopes; Nunes, Ítalo Breno Sousa; Nóbrega, Aline Figueirêdo Da	595
1257	Aplicação do método de estado estacionário (hotbox) para a caracterização das propriedades térmicas de diferentes produtos de construção	Paula Junior, Adilson C.; Jacinto, Cláudia; Cosentino, Livia; Fernandes, Jorge; Teixeira, Elisabete; Mateus, Ricardo	607

Id	Título	Autores	Pág.
1260	Influência da cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas propriedades reológicas de misturas com baixo teor de cimento para manufatura aditiva	Rodrigues Maia, José Vinícius; De Sousa Costa, Alanielly; De Lima Seixas Cunha, Gustavo; Mendes De Sousa, Pedro; De Souza Dias, Leonardo; Karolline De Medeiros, Fernanda; Soares Dos Anjos, Marcos Alyssandro	620
1267	Contributos para o estudo da construção de falsa cúpula em portugal: a malhada de porcos no contexto agro-pastoril da beira baixa	Salvado, João P. F.	632
1269	Optimisation of the mix design of high carbon capture masonry concrete block	Ibrahim, Mustafa; Kassim, Dany; De Brito, Jorge; Nogueira, Rita	644
1277	Efeito sinérgico das cinzas de biomassa em argamassas: desempenho mecânico dos traços ótimos	Canhestro Guimarães, Camila Cristina; De Paula, Heber Martins; Sarmento, Antover Panazzolo	656
1279	Produção e experimentação com o micélio na construção: uma revisão sistemática da literatura	Teixeira, Joyce; Rocha Tostes De Oliveira, Ana Carolina; Melo Grabois, Thiago; Rosse Caldas, Lucas	668
1280	Desenvolvimento de materiais de construção permeáveis: uma perspetiva sustentável integrando a reutilização de resíduos e a carbonatação acelerada	Dina, Pinto; João, Castro Gomes	681
1285	Ethylene vinyl acetate (eva) e metacaulim como substitutos parciais do agregado miúdo e do aglomerante, respectivamente, nas argamassas estabilizadas	Souza, Letícia Sabrina De Melo; Nóbrega, Aline Figueiredo Da; Malheiro, Raphaele Lira Meireles De Castro; Rocha, Fabíola Luana Maia; Sales, Leane Priscilla Bonfim; Silva, Iranilza Costa Da	693
1286	Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas extrusadas submetidas a ambientes agressivos	Barraza, Madeleing Taborda; De Marco, Fernanda; Garcez De Azevedo, Afonso Rangel; Gleize, Philippe Jeal Paul	706
1288	Otimização do tratamento térmico dos resíduos de cimento-amianto potencializando seu uso como ligante alternativo	Oliveira Carneiro, Gessivaldo; Moacyr John, Vanderley; Marcos Ribeiro Dias, Cleber	716
1300	Estudo experimental utilizando rejeito de minério de ferro em substituição total do agregado miúdo para produção de pavimento intertravado: análise das propriedades mecânicas, microestruturais e durabilidade	Lara, Luis Felipe Dos Santos; Souza, Kamylla Cardozo; Resende, Lais; Borges, Paulo Henrique Ribeiro; Bezerra, Augusto Cesar Da Silva	728
1311	Estudo preliminar sobre a utilização de argilas calcinadas do algarve como material cimentício alternativo	Oliveira, Miguel José; Ribeiro, António Bettencourt; Silva, Santos; Branco, Fernando Garrido	740
1312	Avaliação do potencial de resíduos de mineração sulfídricos como materiais cimentícios suplementares	Ascensão, Guilherme; Naranjo, Oscar; Caraballo, Manuel; Ferreira, Victor M.	750
1317	Utilização de compósitos de resíduos de madeira na construção de elementos construtivos - concepção, desenvolvimento e validação	Dias, Sara; Tadeu, António; Almeida, João; De Brito, Jorge	762
1332	Desenvolvimento de painéis produzidos a partir de resíduos de pás de turbinas eólicas em fim de vida: desempenho acústico e térmico	Vela, German; Figueiredo, António; Costa, Vítor; Vicente, Romeu	773

Id	Título	Autores	Pág.
1334	Avaliação da pegada de carbono e da ecoeficiência de bioconcretos de bambu (bcb) com solo e cinza da casca de arroz	De Araujo, Arthur Ferreira; Da Silva, Nathalia Andrade; Pinto, Mônica Cristina; Grabois, Thiago Melo; Caldas, Lucas Rosse; Toledo Filho, Romildo Dias; Sá, Thomas Schatzmayr Welp	781
1337	Desenvolvimento de biomateriais compósitos de cortiça e casca de amendoim colonizados com micélio de gogumelos – procedimento e ensaios preliminares	Oliveira, Miguel José; Gonçalves, Marta; Volosciuc, Ion; Martins, Cláudia	794
1344	Caracterização mecânica do material do ninho da vespa asiática	Sedira, Naim; Santos, Moisés; Pereira, Fábio; Santos, Cristovão; Pereira, Sandra; Nepomuceno, Miguel; Bentes, Isabel; Pinto, Jorge	804
1345	Contributos para estimativa de vida útil de casas construidas em bloquetes de gesso nas regiões produtoras de gipsita	Sobrinho, Carloswelligton	812
1347	Comportamento de betões produzidos com água residual após tratamento terciário e agregados reciclados de resíduos de construção e demolição	De Oliveira, Adelmar; De Brito, Jorge; Bravo, Miguel	824
1348	Desempenho de betões correntes e com agregados reciclados produzidos com água residual tratada	Morgado, João; De Brito, Jorge; Bravo, Miguel	836
1349	Comportamento em termos de durabilidade de betões produzidos com água e agregados reciclados provenientes da lavagem de autobetoneiras	Parreira, José; De Brito, Jorge; Bravo, Miguel	847
1350	Comportamento mecânico de betões produzidos com água e agregados reciclados provenientes da lavagem de autobetoneiras	Pessoa, Afonso; De Brito, Jorge; Bravo, Miguel	859
1362	Argamassas com agregados reciclados sujeitos a carbonatação forçada e acelerada - avaliação do comportamento mecânico	Infante Gomes, Ricardo; Brazão Farinha, Catarina; Maia Pederneiras, Cinthia; Bastos, David; Veiga, Rosário; De Brito, Jorge; Faria, Paulina	871
1364	Materiais compósitos de resíduos agrícolas de casca de arroz e fibra de cana para placas de isolamento térmico	Silva, Alana; Gaspar, Florindo; Bakatovich, Aliaksandr	883
1373	Uso de resíduos de cortiça aglomerada projetada na reabilitação de obras de construção civil – casos práticos – região autónoma da madeira	Pinto, Deesy Gomes; Ferreira, Petra	895
1374	Comparação do potencial de aquecimento global do descarte da casca de ostra e sua aplicação na construção	Bartels, Giovanna Schäfer; Bellei, Poliana; Silvestre, José Dinis; Flores-Colen, Inês	912
1389	Estudo das propriedades do concreto celular espumoso produzido com substituição parcial do cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar	Morais, Ivan Batista; Mourão, André Barroso; Ramos, Lucas Thadeu Da Silva; Paula, Júnia Nunes De; Reis, Elvys Dias	919
1399	Desenvolvimento e caracterização de painéis modulares pré-moldados reforçados com bambusa vulgaris: uma abordagem sustentável na construção civil	Gomes Neto, José Augusto; Barbosa, Normando Perazzo; Félix, Adriano Da Silva; Paiva, Schneider Almeida	930

Id	Título	Autores	Pág.
1402	Desempenho mecânico e resistividade elétrica de aglomerante obtido da desidratação de pastas de cimento portland	Benjamin, Edinéia Alves; Bezerra, Augusto César Da Siva; Chahud, Eduardo; Garcia, Dayana Cristina Silva; Aguilar, Maria Teresa Paulino	942
1405	Propriedades termofísicas da cortiça em temperaturas elevadas: avaliação experimental e numérica.	Bicelli, Antonio Renato; Cantor, Pedro; Arruda, Mário Rui; Duarte, António; Tiago, Carlos; Branco, Fernando; Trindade, Joanna	953
1406	Capacitação de comunitários na produção de componentes sustentáveis e na construção de unidades habitacionais	Sobrinho, Carloswelligton	965
1411	Escória de soldagem como agregado em argamassas – uma solução sustentável	Almeida Paiva, Schneider; Drumond Rodrigues, Viviane; Barros Pereira, Manoel Milton; Gomes Neto, José Augusto; Alves Berenguer, Romildo; De Abreu Santos, Tiago Felipe	973
1412	Comportamento de concretos com adição de metacaulim em relação a propriedades mecânicas e de transporte de cloretos	Freitas, Maria Silva; Meira, Gibson Rocha	984
1413	Estado da arte da utilização de compósitos manufaturados com matrizes poliméricas (termoplásticas ou termorrígidas) reforçados com nanopartículas para aplicações em materiais de construção civil	Pinto, Deesy Gomes; Bernardo, Luís Filipe Almeida	996
1415	Comportamento hidrológico de coberturas verdes: revisão da literatura	Brandão, Verônica; Leite, Ana Beatriz; Sousa, Vitor; Meireles, Inês; Campos, Marcus; C. Dias, Ana	1009
1417	Comportamento hidrológico de coberturas verdes: caso de estudo em trondheim, noruega	Sousa, Vitor; Meireles, Inês; Brandão, Verônica	1018
1424	Caracterização de rejeito granular da mineração de ferro para aplicação como agregado graúdo na construção civil	Resende, Douglas Mol; Pena, Liciane Alvernaz; Bueno, Rafael Pinheiro Curto; Figueiredo, Aline Santana; Peixoto, Ricardo André Fiorotti	1027
1426	Escória de aciaria como estabilizador químico para infraestrutrura de pavimentação	Peixoto, Ricardo André Fiorotti; Diniz, Dayse Horta; Figueiredo, Aline Santana; Santos, Nayara Mendes Dos; Marques, Karina Marcele; Carvalho, José Maria Franco De	1035
1432	Estudo experimental do desempenho higrotérmico de uma cobertura verde extensiva com incorporação de argila expandida	Monteiro, Cristina Maria; Matos, Cristina; Santos, Cristina; Valente, António; Briga-Sá, Ana	1045
1440	Elaboração de objetos de terra crua para ambientes internos sob a perspectiva do design science research	Almada, Thais Costa; Schmid, Aloísio Leoni	1057
1442	Microestrutura de concretos preparados com resíduo oridundo da extração de calcário de alta densidade	Teixeira, Eduardo Da Cruz; Medeiros, Camila Macedo; Ferreira, Thássia Isis Barbosa; Costa, Elnatan Lins Da; Rocha, Kalley Cavalcante Santos Da	1069

Id	Título	Autores	Pág.
1443	Concretos de alta resistência com adição de rejeitos silicosos superfinos de mineração	Figueiredo, Aline Santana; Bezerra, Augusto Cesar Da Silva; Resende, Douglas Mol; Carvalho, José Maria Franco De; Peixoto, Ricardo André Fiorotti	1082
1444	Produção de argamassa sustentável com lodo de estação de tratamento de água	Nascimento, Luan Moreti Alves Do; Souza, Thiago Francisco; Cruz, Rosenira Serpa Da; Costa, Bruna Ezequielle Bernades; Sousa, Maicon Santos; Amado, Franco Dani Rico	1093
1448	Desempenho de um aditivo à base de lignina residual para matrizes de cimento portland	Carvalho, Victor Rezende; Silva, Karrolaine Tereza Souza; Baêta, Bruno Eduardo Lobo; Peixoto, Ricardo André Fiorotti	1105
1449	Estudo experimental do comportamento físico e mecânico de blocos de base cimentícia com incorporação de bagaço de azeitona	Briga-Sá, Ana; Jerónimo, Alexandre	1114
1460	Desenvolvimento de cimento geopolimérico de cinza volante de biomassa para impressão 3d na construção	Archer De Carvalho, Tomás; Gaspar, Florindo; Marques, Ana; Mateus, Artur	1127
1466	Reatividade de resíduos: uma avaliação da atividade pozolânica utilizando métodos indiretos	Grigoleto, Flávia Müller; Salles, Pedro Valle; Lara, Luis Felipe Dos Santos; Bezerra, Augusto Cesar Da Silva	1140
1469	Análise do uso do resíduo de pet como substituto parcial do agregado miúdo nas argamassas autonivelantes	Maia Rocha, Fabíola Luana; Da Nóbrega, Aline Figueirêdo; Meireles De Castro Malheiro, Raphaele Lira; De Melo Souza, Letícia Sabrina; Bezerra, Diego De Paiva	1152
1473	Proposição de um método de dosagem experimental para solo-cimento autoadensável aplicado em paredes monolíticas	Milani, Ana Paula; Cruz, Bruna Ramos	1162
1476	Avaliação da nanodureza em misturas 3dcp na zona interfacial de camadas impressas	Anjos, Marcos Alyssandro Soares Dos; Medeiros, Fernanda Karolline De; Teixeira, Eduardo Da Cruz; Dias, Leonardo De Souza; Maia, José Vinícius Rodrigues; Nascimento, Emanuel Pereira Do	1174
1480	Dosagem de concreto com areia de mineração	Dos Reis Bento, Luciano Dos Reis; Xavier Santos, Silvio Xavier; Melgaço Nunes Branco, Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco; Menezes, Mariana Menezes; Matosinho, Wender Matosinho; Alves, Claudiele Alves; Figueiredo, Pamella Figueiredo	1184
1482	Betão pronto com agregados grossos reciclados provenientes de operadores de gestão de resíduos portugueses: implementação industrial	Pacheco, João Nuno; Valencia, Javier; De Brito, Jorge	1196
1483	Betão pronto com agregados grossos reciclados provenientes de operadores de gestão de resíduos portugueses: estudo laboratorial	Pacheco, João; Valencia, Javier; De Brito, Jorge	1208

Id	Título	Autores	Pág.
1485	Avaliação do ciclo de vida de argamassas com agregados naturais e reciclados	Dias, Adriana; Pacheco, João; Silvestre, José; Martins, Isabel; De Brito, Jorge	1220
1486	Desafios de incorporação de cinzas volantes de queima de biomassa em cimento-cola, caso prático	Cardoso Da Silva, Luis Miguel	1231
1488	Processamento de conchas de ostra para blocos de betão sustentáveis: atividades iniciais do projeto blocosyter	Moreira, Nicollas De Oliveira; Vasco Silva, Rui; Pinchard, Leo; Bellei, Poliana; Magalhães, Fernanda Caroline; Mendes, Maria Paula; Soares Dias, Ana Paula; C. Pereira, Manuel Francisco; Flores-Colen, Inês	1243
1490	Plataforma eletrónica de eco-design de materiais de construção	Fontoura, Júlia Ferreira; Silvestre, José Dinis	1255
1497	Mechanical strength and shrinkage of earth mortars stabilized with recycled cement	Balboa, Andrea; Bogas, José Alexandre; Tenza-Abril, Antonio José; Pérez-Hernández, Yosbel	1264
1502	Impressão 3d de plásticos reciclados como solução de renovação de fachadas de edifícios	Vicente Lopes, Lucas; Almeida, Manuela	1276
1508	Efeitos da adição de excremento bovino no desempenho mecânico de argamassas produzidas com uma terra argilosa do brasil e outra arenosa de portugal	Pachamama, Raphael Nascimento; Faria, Paulina; Rezende, Marco Antônio; Santos Silva, António	1287
1511	Production of sustainable pervious paving blocks by alkali activation	Merino Lechuga, Antonio Manuel; González Caro, Ágata; Lamaa, Ghandy; Silva, Rui Vasco; De Brito, Jorge; Jiménez, José Ramón; Fernández Rodríguez, José María	1299
1512	Accelerated co2 curing of alkali-activated pervious paving blocks incorporating seashells as aggregate	Caro, Ágata González; Lechuga, Antonio Manuel Merino; Lamaa, Ghandy; Silva, Rui Vasco; De Brito, Jorge; Jiménez, José Ramón; Rodríguez, José María Fernández	1308
1515	Avaliação do impacte ambiental da utilização de água e areia do mar na produção de betão	Nepomuceno, Eduarda; Silvestre, José; Sena-Cruz, José; Lourenço, Lúcio	1317
1517	Desempenho da adição de resíduos da biomassa da acácia mangium ao concreto	Beschorner, Lucas Villeneuve; Rocha, Aretuza Karla; Oliveira, Kelly Christina; Vasconcelos, Gustavo Bruski	1328
1518	Análise da reatividade de cinza de lodo de esgoto em matrizes cimentícias	Queiroz, Brendhy Torres De; Costa Neto, Daniel Salustiano; Leite, Monica Batista; Fiuza Junior, Raildo Alves; Santana, Tamires Cordeiro; Santos, Tereza Simonne Mascarenhas	1340
1519	Avaliação de concretos com uso de resíduo de cerâmica vermelha como material cimentício suplementar	Moura, Alan Sousa; Costa, Heloina Nogueira; Cabral, Antonio Eduardo Bezerra	1353
1522	Reflexão sobre o sistema de etiquetagem de janelas	Simões, Nuno; Prata, Joana; Garcia, Rita; Santos, Paulo; Morais, Bruna	1365
1523	Papercrete: breve revisão e estudo experimental sobre a incorporação de dois tipos de papel	Eires, Rute; Camões, Aires; Angeiras, Carlos	1376

Id	Título	Autores	Pág.
1527	Considerações sobre a formação de fases cristalinas posteriores em sistemas geopoliméricos	Barraza, Madeleing Taborda	1388
1528	Arrefecimento evaporativo: história e materiais para aplicações contemporâneas	Diaz Gonçalves, Teresa	1399
1531	Efeito da ativação alcalina em idades iniciais aplicada à taipa com solo brasileiro e solo português	Latosinski, Karina Trevisan; Eires, Rute Eires; De Vargas, Alexandre; Comoretto, Letícia	1408
1540	O papel dos finos reciclados carbonatados do betão como adição fíler	Silva, André; Nogueira, Rita; Bogas, José Alexandre	1418

Tema 2. Materiais inovadores

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1126	O efeito dos materiais de mudança de fase nas propriedades físicas e mecânicas do betão produzido com resíduos de construção e demolição	Jia, Zhiyou; Cunha, Sandra; Aguiar, José	1431
1131	Argamassas autocompactáveis produzidas com cinzas volantes, sílica de fumo e óxido de grafeno	Raposeiro Da Silva, Pedro	1443
1138	Envelhecimento natural de revestimentos de cor escura com nanomateriais para etics	Santos, Bruno; Veloso, Rita C.; Souza, Andrea R.; Maia, Joana; Silva, Daniela; Ventura, João; Ramos, Nuno M. M.	1455
1141	Variabilidade da medição em laboratório do fluxo de calor em paredes heterogéneas	Ribas, Manuel; Almeida, Ricardo; Barreira, Eva	1467
1152	Efeito da adição de nanoparticulas de prata sobre a aderência de fibras de sisal com a matriz cimentícia	Alves Da Silva Neto, Gilberto; Carneiro Guimarães, Cleidson; Mania, Edrian; Mitoshi Kamida, Helio; Lopes Lima, Paulo Roberto	1477
1153	Desenvolvimento de argamassa de assentamento e revestimento com conchas de sururu descartadas do complexo estuarino lagunar mundaú-manguaba, alagoas - brasil	Menezes, Renato Carvalho; Marques, Sheyla Karolina Justino; Souza, Ronny Francisco Marques De	1486
1167	Caracterização de novas misturas hidrofóbicas para a protecção de pedras naturais	Barra, Júlia Gargiulo Duarte; Rucha, Madalena; Pinto, Ana Paula Ferreira; Da Fonseca, Bruno Sena	1498
1173	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados produzidos com argila forte de campos dos goytacazes (rj)	Silva, Bruno Sanches Da; Cerqueira, Niander Aguiar; Madalena, Jonathan De Andrade Paula; Cruz Junior, Elias Socrates Nascimento Da; Oliveira, Rafael Picanço De; Alexandre, Jonas	1508
1205	Remoção de graffiti em pedras porosas.	Machado, Raul Miguel; Ferreira Pinto, Ana Paula; Sena Da Fonseca, Bruno; Mègre Pires, Sofia	1518
1230	Avaliação das propriedades no estado fresco de compósitos 3dcp com perlita expandida	Barbosa, Marcella; Anjos, Marcos; Maia, José Vinícius; Camões, Aires; Cruz, Paulo	1528
1233	Estudo experimental de concretos permeáveis com incorporação de resíduo de caulim	Paiva Bezerra, Diego; Maia Rocha, Fabíola Luana; Bonfim Sales, Leane Priscilla; Figueiêdo Da Nóbrega, Aline; Lira Meireles De Castro Malheiro, Raphaele	1540
1234	Avaliação do comportamento no estado fresco de argamassas históricas à base de cal hidratada com adição de sílica ativa	Silva Vieira, Vinicius; De Paiva Bezerra, Diego; Maia Rocha, Fabíola Luana; Figueirêdo Da Nóbrega, Aline; Lira Meireles De Castro Malheiro, Raphaele	1552
1235	Avaliação do desempenho da substituição de cimento portland por cinza de casca de arroz (cca) e dióxido de titânio (tio2) na resistência de argamassas	Serafim, Maria José De Souza; Clovandi, Giovana Machado; Carvalho, Isabelle Valença; Ribeiro, Kamirã Barbosa	1564

Id	Título	Autores	Pág.
1236	Nanossílica funcionalizada com 3-aminopropiltrietoxisilano (aptes) - uma revisão sistemática da literatura	Paula, Andréia De; Silva, Kleymer Henrique Pereira; Rêgo, João Henrique Da Silva; Serafim, Maria José De Souza	1575
1237	Influência da nanossílica funcionalizada com aditivo redutor de retração na resistência e retração autógena de argamassas de cimento portland	Silva, Kleymer Henrique Pereira; Fraga, Yuri Sotero Bomfim; Rêgo, João Henrique Da Silva; De Paula, Andreia; Serafim, Maria José De Souza	1588
1244	Avaliação do ciclo de vida de pavimentos betuminosos fotocatáliticos pulverizados com tio2: uma abordagem do berço ao portão.	Margalho, Élida Melo; Gomes, Igor Samuel Peixoto; Segundo, Iran Gomes Da Rocha; Branco, Verônica Castelo; Oliveira, Joel Ricardo Martins; Carneiro, Joaquim Alexandre S.A. Oliveira; Freitas, Elisabete Fraga De	1600
1262	Avaliação do desempenho da aspersão superficial de dióxido de titânio (tio2) aplicado em pasta de cal para revestimento	Grespan, Ana Paula Bombassaro; Guerra, Fernanda Lamego; Giordani, Caroline; Masuero, Angela Borges; Da Molin, Denise Carpena Coitinho	1612
1264	Estudo numérico do comportamento ao fogo das paredes exteriores em estruturas de aço leve	Valadão Nunes Torres, Leonardo; Couto, Carlos; Vila Real, Paulo; Piloto, Paulo	1624
1276	Avaliação do desempenho térmico e energético de um pavimento radiante com incorporação de materiais de mudança de fase	Rebelo, Filipe; Figueiredo, António; Almeida, Ricardo M.S.F.; Vicente, Romeu; Ferreira, Victor M.	1635
1294	Análise experimental do comportamento térmico e lumínico de um envidraçado fotocrómico de pequena escala	Teixeira, Henriqueta; Glória Gomes, M.; Moret Rodrigues, A.; Aelenei, Daniel; Ferreira, Isabel	1644
1301	Relações entre a biomimética e soluções baseadas na natureza	Oliveira, Daniel Rodrigues; Sousa, Elton Belarmino	1655
1313	Uma nova abordagem para determinar parâmetros acústicos macroscópicos e o coeficiente de absorção sonora utilizando redes neuronais artificiais	Pereira, Luís Filipe Monteiro; Godinho, Luís Manuel Cortesão; Branco, Fernando José Forte Garrido; Oliveira, Paulo José Da Venda	1665
1319	Estudo do comportamento do gesso reciclado aditivado com diferentes teores de emulsão de poliacetato de vinila	Gonçalves, Sandra Cunha; Silva Junior, Milton Ferreira Da; Fornari Junior, Celso Carlino Maria; Anjos, Paulo Neilson Marques Dos; Tokumoto, Miriam Sanae	1677
1324	Tensile properties and bond behaviour to concrete of thermoplastic gfrp bars at elevated temperature	Rosa, Inês C.; Coopman, Emma; Taecke, Mathis; Firmo, João P.; Correia, João R.	1690
1325	Compósitos de matriz termoplástica: estudo experimental sobre as propriedades mecânicas e durabilidade	Rosa, Inês C.; Garrido, Mário; Correia, João R.; Cabrita, Diogo; Constantino, João; Cunha, Maria; Silvestre, Tiago; Cabral-Fonseca, Susana	1702
1338	Fissuração de argamassas devido à retração restringida imposta pelo suporte: influência de resíduos de fibras naturais	Pederneiras, Cinthia Maia; Veiga, Rosário; De Brito, Jorge	1714

Id	Título	Autores	Pág.
1342	Natural weathering of a composite produced with basalt fibres and partially bio-based unsaturated polyester resin	Shahid, Md Abu Toyob; Garrido, Mário; Correia, João Ramôa	1723
1343	Desenvolvimento de betão drenante com agregado reciclado para pavimentos rodoviários	Ximenes, José; Aguiar, José; Pais, Jorge; de Jesus, Carlos; Palha, Carlos	1735
1354	Blocos (tijolo) de vedação desenvolvidos a partir do descarte de papel kraft (sacos de cimento) – desempenho de resistencia e avaliação térmica	Silva Rodrigues, Anderson Clayton Da; Nogueira De Moraes, Marcio Luiz Varela	1747
1355	Obtenção de placas de celulose a partir de sacos de cimento e utilizadas como preenchimento de ports corta-fogo	Silva Rodrigues, Anderson Clayton Da; Nogueira De Moraes, Marcio Luiz Varela	1758
1357	Utilização de aditivos mitigadores de retração plástica e seu efeito nas propriedades mecânicas do concreto	Pochyly, Alice; Armando, João; Pereira, Mara; Silva, Arthur; Capuzzo, Valdirene	1766
1385	Influência da adição de celulose nanofibrilada na absorção de argamassas de cimento portland	Miranda Farias, Marcelo; Pereira, Eduardo; Medeiros, Marcelo Henrique Farias De	1780
1408	Durability of vacuum infused gfrp composites exposed to natural weathering	Hasan, Tarikul; Correia, João Ramôa; Garrido, Mário; Cabral-Fonseca, Susana; Sena-Cruz, José; Jorge, Marco	1792
1419	Desempenho individual e combinado de produtos fotocatalítico e anti-graffiti em revestimento de fachada	Bersch, Jéssica Deise; Pereira, Manuel Francisco; Dionísio, Amélia; Masuero, Angela; Dal Molin, Denise; Veiga, Rosário; Flores-Colen, Inês	1804
1433	Propriedades mecânicas residuais de argamassas cimentícias com escória de forno panela (efp)	Soares, Marcele; Castro, Mylena A.; Sousa, Everton C. F.; Silva, Tayná F.; Ferreira, Gisleiva C. S.; Mariano, Edurado F.; Moura, Marinara A. N.; Moreno Jr., Armando L.	1816
1434	Avaliação da resistência ao cisalhamento de prismas produzidos com compósitos cimentícios contendo sílica da casca de arroz	Silveira Meichtry, Rubens; Marangon, Ederli; Baddo Da Mota, Ian; Renck Neto, Jaime Carlos; Garcia Rodrigues, Luan; Kosteski, Luis Eduardo	1828
1445	Avaliação da construtibilidade de argamassas de gesso para impressão 3d	Gaspar, Luís; Pedrosa, Ana Rita; Freire, Teresa; Sousa, Ângela; Gaspar, Florindo	1840
1451	Otimização de recursos sustentáveis: roadmap do potencial das conchas de ostra na economia circular azul	Moreira, Nicollas; Bellei, Poliana; Magalhães, Fernanda Caroline; Vasco Silva, Rui; Mendes, Maria Paula; Soares Dias, Ana Paula; Costa Pereira, Manuel Francisco; Flores-Colen, Inês	1852
1533	Avaliação de escória de aciaria para a produção de concreto usinado	Sotomayor, Cristian; Castillo, Mayela; Holanda, Francisco Gladston; Holanda, Raphael Vieira De Carvalho	1862
1535	Revisão sistemática da literatura sobre os estudos dos materiais metálicos	Araújo, Adolpho Guido De; Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira; Maior, Paulo Martin Souto; Pessis, Anne Marie	1874

Tema 3. Economia circular na construção

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1111	Análise das emissões de gases de efeito estufa de um projeto rodoviário brasileiro: uma abordagem por meio da avaliação do ciclo de vida	Dos Santos, Bruno Vendramini; Holanda, Maruska Lima De Sousa; Pereira, Cláudio Henrique De Almeida Feitosa; Rêgo, João Henrique Da Silva	1887
1187	Circularidade de materiais e energia incorporada - kristian augusts gate 13 (oslo)	Couto, Paula; Falcão Silva, Maria João; Salvado, Filipa	1900
1188	Guia português para auditorias pré-demolição e sua aplicação numa intervenção de reabilitação	Martins, Isabel; Rezvani, Seyed; Falcão Silva, Maria João; Salvado, Filipa; Couto, Paula; Vilhena, António	1912
1232	Otimização de pastas geopoliméricas à base de metacaulim e biochar da casca de arroz através da metodologia de superfície de resposta	Pereira, Sabrina Luana Dias; Possan, Edna; Neves Junior, Alex	1924
1239	Desempenho de misturas binárias de cinzas de fundo da incineração de resíduos sólidos urbanos e cinzas volantes activadas alcalinamente	Avila Pereira, Yoleimy; De Brito, Jorge; Silva, Rui Vasco	1937
1274	Análise dos critérios das compras públicas ecológicas aplicáveis à construção em portugal	Ribeiro, Yanh; Texeira, Jorge; Moreira, Joaquim; Sousa, Hipólito	1949
1281	Microestrutura de pastas cimentícias com biochar	Ferreira, Gisleiva C. S.; Vieira, Flávia De Freitas; Moura, Camila Rodrigues; Massola, Daniel; Sbroio, Ivair	1960
1316	Estudo do processo de geopolimerização de resíduos de mineração	Diosdado, Antonio J.; Valenzuela, Martin; Ascensão, Guilherme; Ferreira, Victor M.; Caraballo, Manuel	1972
1323	Cinzas de biomassa como substituto parcial do cimento	Machini, Wesley; Almeida, João; Antonio, Julieta	1978
1359	Can road construction be a sustainable destination for waste from the production of bituminous membranes?	Neves, Jose; Pacheco, Ana; Paulo, Adão; Ramos, Jorge	1989
1368	Characterization of diabase sludge for optimal integration in cement-based mortar applications	Pacheco-Menor, Maria Concepción; Pereira, Manuel F.C; Flores-Colen, Inês; De Brito, Jorge	2001
1372	Mecanismos de expansão em argamassas produzidas com agregado reciclado de concreto contaminado por resíduo de gesso: uma análise exploratória experimental	Krüger, Patrícia; Chinelatto, Adriana Scoton Antonio; Pereira, Eduardo	2013
1386	Propriedades reológicas de concreto com resíduo de vidro em pó em substituição parcial ao cimento	Santos Melo, Abcael Ronald; De Souza, Madson Lucas; Souza Gomes, Júlia Emilly; Sampaio Gomes, Larissa; Goes Sampaio Souza, Douglas; Bezerra Cabral, Antônio Eduardo	2025
1387	Propriedades reológicas de argamassa para revestimento interno com incorporação de diferentes resíduos de vidro	Santos Melo, Abcael Ronald; Macedo Fideles, Bruna Tayna; Gonçalves Guedes, Kamila; Bezerra Cabral, Antônio Eduardo	2034

Id	Título	Autores	Pág.
1388	Avaliação mecânica de agregados leves obtidos com diferentes argilas e percentuais de resíduo do polimento do porcelanato	Pontes, Iago Cavalcanti; Neto, Jose Anselmo Da Silva; Campos, Liszandra Fernando De Araújo; Anjos, Marcos Alyssandro Soares Dos; Dutra, Ricardo Peixoto Suassuna	2046
1418	Economia circular azul – potencial de reutilização das conchas de bivalves na geração de novos produtos	Magalhães, Fernanda; Bellei, Poliana; Flores-Colen, Inês; Marques Da Costa, Eduarda	2058
1431	Uso de agregados reciclados de bioconcreto de bambu em novos bioconcretos: avaliação física e mecânica	Santos, Lucas Araujo Felicio Dos; Da Gloria, M'Hamed Yassin Rajiv; Stolz, Carina Mariane; Amario, Mayara; Toledo Filho, Romildo Dias	2072
1435	Influência do teor de biomassa e da temperatura no comportamento à tração na flexão de bioconcretos de bambu	Moraes, Ana Clara Fernandes Zanon De; Aguiar, Amanda Lorena Dantas De; Silva, Nathalia Andrade Da; Amario, Mayara; Toledo Filho, Romildo Dias	2084
1441	Construção incremental como instrumento de economia circular na produção de cooperativas de habitação	Gomide, Fernanda Paes De Barros; Casagrande Junior, Eloy Fassi; Bragança, Luís	2096
1450	Determinação da eficiência de uma solução dap como tratamento para melhoria de agregados de concreto reciclado	Villa Serna, Rossana; Galvis Velez, Victor; Tabares Mira, Ronaldo; Valencia Aguirre, Cristina; Correa Gómez, Esteban; Usme Guarín, Santiago; Gómez Cano, Diana; Gonzalez Betancur, Daniela; Arias Jaramillo, Yhan Paul	2108
1453	Paredes verdes para tratamento de águas cinzentas e reutilização	Rodrigues Vitor, Marta; Galvão, Ana; Matos Silva, Cristina	2118
1462	Reutilização de vigas de betão armado betonadas in-situ: mais-valias e proposta de protocolo de ensaios	Frazão Pedroso, Pedro; Dinis Silvestre, José; Aguiar Costa, António	2126
1465	Influência da incorporação de resíduos do granito rosa iracema na propriedade de resistência à flexão de artefatos de cerâmica vermelha	Lobo, Cândido Jorge De Sousa; Regis, Rafaella Cavalcante; Regis, Rogério Cavalcante; Nogueira, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo; Cabral, Antônio Eduardo Bezerra	2140
1498	Estudo da durabilidade de argamassas à base de cal com incorporação de máscaras cirúrgicas descartáveis: ensaio de envelhecimento acelerado gelo-degelo	Mendes, Maria Paula; Romero, María Isabel; Bravo, Miguel; C. Pereira, Manuel Francisco; Flores-Colen, Inês	2149
1500	Circularidade dos materiais de construção: precedência entre elementos baseada em modelos digitais para demolição	Mantelatto, André; Kuzminykh, Artur; Parente, Manuel; Granja, José; Azenha, Miguel	2155
1503	Economia circular do aço numa siderúrgica	Lordsleem, Alberto Casado; Andrade, Clarissa Sena	2167
1542	Valorização de lama de estação de tratamento de água na indústria de construção civil na perspectiva de uma economia circular	Mattoso, Ana Paula; Cunha, Sandra; Aguiar, José; Duarte, António; Lemos, Helena	2179

Tema 4. Avaliação e modelação da sustentabilidade

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1102	O preço do combate à pobreza energética: o caso das moradias estilo emigrante	Alpalhão, João; Duarte, Rogério	2192
1119	Avaliação de sistemas construtivos industrializados: contribuições a partir de uma revisão sistemática	Veras, Vinícius Capistrano De Paiva; Filho, Mauro José Da Silva; De Souza, Madson Lucas; Burgos, Lucas Ramiro; Bertini, Alexandre Araújo	2201
1130	Ecoeficiência de concretos convencionais produzidos em central dosadora: estudo de caso	Gava, Giovanna; Triper, Stefani; Almeida, Emily; Rigo, Eduardo; Possan, Edna	2210
1135	Balanço ambiental, energético e econômico de paredes no paraguai	Perez Monti, Hector Manuel	2219
1210	Avaliação do ciclo de vida de produtos de base biológica na construção	Cosentino, Livia; Jacinto, Cláudia; C. Paula Junior, Adilson; Fernandes, Jorge; Mateus, Ricardo	2231
1222	Análise técnico-económica de sistemas de geração fotovoltaica e de armazenamento de energia em habitações	Rodrigues, Leonardo; Delgado, João; Mendes, Adélio; Guimarães, Ana Sofia	2243
1289	Certificação e etiquetagem de eficiência energética em portugal e no brasil	Barreto, Douglas; Flores-Colen, Inês	2251
1296	Avaliação do desempenho ambiental das construções com terra: análise comparativa dos métodos de aicv para o contexto brasileiro	Temtemples De Carvalho, Beatriz; Martinez Silvoso, Marcos; Vargas Velasco, Reila	2264
1304	O papel da avaliação do ciclo de vida no contexto do desenvolvimento sustentável e agenda 2030: uma revisão da literatura	Rocha Tostes De Oliveira, Ana Carolina; Rosse Caldas, Lucas; Melo Grabois, Thiago	2276
1315	Metodologias aplicadas para estimar a absorção de co2 pelos materiais cimenticios	Pedrosa Bezerra, Francisco Felipe; Da Silva Rêgo, João Henrique; Sanjuán, Miguel Ángel; Vasques, Lucas De Paula; Nogueira Chaves, Jéssica Fall	2286
1326	Materiais de construção sustentáveis na construção	Estrócio, Ana	2301
1366	Maaris: metodologia para avaliação e adaptação da sustentabilidade de infraestruturas ferroviárias	Benoliel Nunes Bonito, Maria Ana; Ferreira, Patrícia; Matos Silva, Cristina	2304
1378	Impacto do desempenho higrotérmico e ótico das diferentes camadas de revestimento na durabilidade do sistema etics	Souza, Andrea R.; Guimarães, Teresa M.; Veloso, Rita C.; Nunes, J. Teles; Soeira, Bruno; Ramos, Nuno M. M.; Maia, Joana	2314
1379	Potencial de recolha de água da chuva em espaço urbano: estudos de caso de tijuana (mx), lisboa (pt) e trondheim (no)	Ocaranza, Laura; Matos Silva, Cristina	2326
1382	Contributo das coberturas verdes para a biodiversidade de lisboa	Rei, Margarida; Leal, Ana; Tiago, Patrícia; Matos Silva, Cristina	2339
1384	Entendendo a resiliência urbana: uma perspectiva da engenharia civil através de uma revisão sistemática	Lima, Letícia Da Silva Souza; Chiroli, Daiane Maria De Genaro; Zola, Fernanda Cavicchioli	2349
1396	Desempenho de sistemas de utilização de água da chuva com coberturas verdes: caso de estudo em trondheim, noruega	Sousa, Vitor; Meireles, Inês; Matos, José Pedro	2361

Id	Título	Autores	Pág.
1398	Projeto greener: apresentação e resultados preliminares	Sousa, Vitor; Silva, Cristina Matos; Meireles, Inês	2369
1404	Avaliação do ciclo de vida de coberturas e benchmark integrados numa ferramenta bim	Ferreira, Maria Teresa; Aguiar Costa, António; Dinis Silvestre, José	2378
1414	Técnicas de ia para implementar processos de simulação e otimização do desempenho de edifícios	Araújo, Gonçalo Roque; Gomes, Maria Da Glória; Gomes, Ricardo; Ferrão, Paulo; Guedes, Manuel Correia	2389
1420	Transição e futuro dos sistemas de certificação de edifícios: da eficiência energética à sustentabilidade holística integrada	Santos, Maria Catarina; Gaspar, Pedro Lima	2400
1458	Análise das necessidades energéticas do parque edificado de lisboa com recurso a técnicas de ia	Araújo, Gonçalo Roque; Gomes, Ricardo; Gomes, Maria Da Glória; Ferrão, Paulo; Guedes, Manuel Correia	2412
1467	Assessment of carbon capture in rendering mortars during the construction phase: a case study	Oliveira, Dayana Ruth Bola; Proença, Melissa Pastorini; Risson, Kathleen; Demoliner, Carlos A.; Possan, Edna	2424
1472	A three-phase approach to modeling the mechanical behavior of concrete and predicting the elastic modulus	Felix, Emerson Felipe; Falcão, Isabela Da Silva; Dos Santos, Larissa Gabriela; Prado, Lisiane Pereira	2436
1474	Aplicação de aprendizado de máquina na avaliação da durabilidade de estruturas de concreto com agregados de rcd frente à ação de cloretos	Falcão, Isabela Da Silva; Santos, Larissa Gabriela Dos; Félix, Emerson Felipe	2450
1477	Estratégia integrada para a sustentabilidade e inovação no setor aeco: uma abordagem 360º	Frazão Pedroso, Marco; Dinis Silvestre, José	2461
1509	Concrete simulation at mesoscopic scale	Fernández-Muñiz, M. Zulima; Montero-Chacón, Francisco; López-Colina Pérez, Carlos; Del Coz-Diaz, José; López-Gayarre, Fernando	2473
1526	Modelo de avaliação e intervenção em edifícios escolares visando a sustentabilidade	C. P. Oliveira, Ana Martha; Lanzinha, João Carlos; Vaz Ferreira, Ana Teresa; Parisi Kern, Andrea	2482
1529	Inclusão das mudanças climáticas na análise integrada de consumo energético e desempenho ambiental de envoltórias de um edifício residencial unifamiliar	Bertoli, Gabriela Mann; Timm, Janaine F. G.; Torres, Maurício; Passuello, Ana	2493
1532	Método de avaliação do desempenho ambiental de revestimento de fachada com argamassa	Araújo, Adolpho Guido De; Rocha, Eudes De Arimatéa; Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira; Palha, Rachel Perez	2505
1546	Life cycle assessment of a basalt fibre and partially bio-based unsaturated polyester resin composite	Shahid, Md Abu Toyob; Silvestre, José Dinis; Garrido, Mário; Correia, João Ramôa	2519

Tema 5. Física das construções e edifícios saudáveis

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1108	Investigação das tendências de comportamento da degradação em fachadas de revestimento cerâmico	Souza, Ana Luiza; Silva, Maykon; Romeiro, Thália Raelly; Souza, Matheus; Bauer, Elton	2532
1121	Concreto e ilha de calor, qual a relação? estudo do caso do novo anhangabaú	Sousa, Elton Belarmino	2545
1133	Dispositivo de sombreamento dinâmico com incorporação de materiais de mudança de fase	Gonçalves, Margarida; Figueiredo, António; Almeida, Ricardo M.S.F.; Vicente, Romeu; Samagaio, António	2557
1143	Caraterização mecânica de argamassas com areias da ilha de são miguel	Cordeiro Miranda, Vidália Maria; Fernandes Teixeira, Luís Miguel; Almeida Santos, André; Câmara Miranda, Lisandra; Correia Pimentel, João Manuel	2567
1168	Avaliação do teor de humidade por termografia de infravermelhos - resultados preliminares	Neves, Diana P.F; Dafico, Letícia C. M.; Almeida, Ricardo M. S. F.; Vicente, Romeu S.; Barreira, Eva	2578
1202	Reuso de sacos de cimento portland como isolante termoacústico	Soares, Ricardo; Neves E Sousa, Albano	2586
1215	Condomínio de casas: uma análise da percepção do usuário sobre a qualidade da construção e os usos dos espaços	De Lima, Mayara Costa; Campos, Cristiane Coelho; De Paula, Heber Martins; Paula, Ed Carlo Rosa	2598
1229	Gestão integrada da água urbana: análise de parâmetros para sistemas híbridos locais	Bona, Sara; Silva-Afonso, Armando; Gomes, Ricardo; Rodrigues, Fernanda	2610
1242	Sustentabilidade e segurança contra incêndio na construção de edifícios: uma abordagem integrada	Cordeiro, Elisabete; Sousa, Ana Beatriz; Coelho, António Leça; Pedro, João Branco; Gonçalves, Miguel Chichorro	2622
1249	A utilização de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento em edifícios: revisão da literatura	Francisco, André V; Aelenei, Daniel	2631
1250	A otimização das características geométricas e termofísicas da fachada dum edificios de escritórios	Monteiro, João; Aelenei, Daniel; Santos, António J	2641
1291	Impacto de um envidraçado electrocrómico no conforto térmico e visual em portugal	Teixeira, Henriqueta; Glória Gomes, M.; Moret Rodrigues, A.; Aelenei, Daniel	2652
1310	Construção pré-fabricada em portugal: estratégias e desafios futuros	Falcão Silva, Maria João; Cabaço, António; Vale Azevedo, Álvaro	2664
1320	Impacto da ventilação no controlo do sobreaquecimento em edifícios de construção em lsf e em alvenaria de tijolo	Figueiredo, António; Almeida, Ricardo M.S.F.; Vicente, Romeu; Ferreira, Victor M.; Langner, Marcelo	2675
1375	Análise do conforto ambiental de um edifício de ensino universitário de suporte à adaptação às alterações climáticas	Teixeira, Rúben; Mateus, Daniel; Manso, Maria; Canto, João; Figueiredo, Elói; Antunes, Vítor	2684
1392	Plumas térmicas em radiadores: processamento de imagens de ensaios de fumo à escala real	Mateus, Rafaela; Pinto, Armando; Pereira, José M. C.	2696

Id	Título	Autores	Pág.
1400	Metodologia para identificação de eventos de chuva incidente de risco para elementos construtivos verticais em portugal	Da Cruz, Miguel Catarino Valente; Coelho, Guilherme B. A.	2711
1401	Análise e otimização da performance higrotérmica na construção residencial em portugal. impacto das alterações climáticas no setor da construção civil.	Da Costa, Mateus De G. V E Marques; Coelho, Guilherme B. A.	2723
1421	Uso da madeira na estrutura e na envoltória de proposta de habitação social com a forma de domo geodésico e seu impacto no desempenho térmico	Coura-Sobrinho, Jerônimo; Hirashima, Simone Queiroz Da Silveira; Florez Montes, Frank; Brandão, Rafael Silva; Nunes, Júlia Reis Costa	2735
1429	Arquitectura popular portuguesa – aspectos bioclimáticos	Mascarenhas, Jorge; Belgas, Maria De Lurdes; Branco, Fernando G.	2747
1487	Comportamento térmico de painéis pré-fabricados de betão para a construção modular de edifícios	Sarmento, Raquel; Teixeira, Henriqueta; Gomes, Maria Da Glória	2760
1492	Análise da intensidade do uso de energia elétrica em edifícios de habitação	Portugal Branco, Adriana; Ferreira, Ana; Pereira, Júlia; Gomes, Maria Da Glória	2772
1504	Passaporte de renovação de edifícios como instrumento estratégico para a renovação a longo prazo	Barbosa, Gabriela; Almeida, Manuela	2784
1521	Soluções para prevenção e mitigação do radão em edifícios	Real, Luís Eduardo; Viegas, João Carlos; Jorge, Patrício; Pereira, Alcides; José, Costa; Linares-Alemparte, Pilar	2796

Tema 6. Gestão da construção

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1137	Caraterização mecânica de betonilhas tradicionais dos açores	Fernandes Teixeira, Luís Miguel; Cordeiro Miranda, Vidália Maria; Almeida Santos, André; Camara Miranda, Lisandra; Correia Pimentel, João Manuel	2809
1240	A importância dos sistemas de informação colaborativa na gestão de empreendimentos públicos e na redução de materiais consumíveis	Chichorro Rodrigues, Pedro; Gameiro Henriques, Pedro	2821
1252	Choosing by advantages methodology: um caso de estudo de comparação entre escadas tradicionais e pré-fabricadas e soluções de apoio	Pinto, João; Baltazar, Luis G.	2833
1287	Análise do potencial de interface do bim com as disciplinas da matriz curricular do curso de engenharia civil do ifpb	Martins Maciel, Jorge Luiz; De Souza Lira, Evelly; Lisboa Fernandes, Maria Mikaelly; Vieira Silva, Cicero Joelson	2846
1307	Estudo da geração de resíduos de construção e demolição em edifícios de paredes finas em concreto armado	Armijos Tinoco, Jonathan Vladimir; Gonzalez Lima, Rosa Cristina; Rojas Manzano, Manuel Alejandro; Otálvaro Calle, Ivan Fernando; Maury Ramirez, Anibal	2858
1308	Método digital para preparação de obra	Ribeiro, Filipe; Chaves, Luís; Batista, Carlos	2870
1327	Importância e caracterização do pós venda	Conceição, Diogo	2886
1330	O bim como recurso na conservação e monitorização do património cultural edificado: uma aplicação ao palácio monserrate	Machete, Rita; Falcão, Ana Paula; Gomes, Maria Gloria; Bento, Rita	2898
1336	Utilização de técnicas de geração de linguagem natural para a criação de mqt – aplicabilidade à plataforma pronic	Ribeiro, Yanh; Teixeira, Jorge; Moreira, Joaquim; Sousa, Hipólito; Carvalhido, Flávia; Lopes Cardoso, Henrique	2909
1340	A construção tradicional na vila de pedras salgadas – um contributo	Silva, Filipe; Pereira, Sandra; Paiva, Anabela; Reis, Cristina; Pinto, Jorge	2921
1356	Análise do gerenciamento de resíduos da construção civil - armazenamento, transporte e descarte	De Lisboa, Tais Moreira; Dos Santos Siqueira Silva, José Douglas	2929
1369	Análise da durabilidade da ligação de estruturas mistas aço-betão coladas	Rocha, Alexandre; Aguiar, José Barroso; Valente, Isabel B.	2939
1383	Inovação e licitude: contratação e fiscalização de serviços de manutenção baseada em bim em órgãos públicos brasileiros	Cândido, Stella De Oliveira; Fialho, Beatriz Campos	2951
1428	Estudo comparativo do preço entre lajes maciças e lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas, na cidade de tete, moçambique	Bene, Bruno Miguel Lea; Diogo, José Francisco Rufino	2962
1436	Impactos do "efeito pêndulo" nas licitações de obras públicas: casos do brasil, espanha e portugal	Frison, Caroline Bettini; Watashi, Denis Bertazzo; Marchiori, Fernanda Fernandes; Galera, Antonio Lara; Sousa, Hipólito; Calvetti, Diego; Teixeira, Jorge	2974

Id	Título	Autores	Pág.
1439	Comparação dos enfoques de gerenciamento de riscos em licitações: um estudo comparativo entre brasil e portugal	Rosa, Suélen Cardoso Da; Watashi, Denis Bertazzo; Marchiori, Fernanda Fernandes; Galera, Antonio Lara; Sousa, Hipólito; Magalhães, Pedro Nuno Meda	2986
1475	A importante e correta abordagem da qualidade na gestão da construção	Pinheiro Castanheira Neto, Paulo	2997
1499	Bim para a gestão de ativos: integração do bim na operação e manutenção (o&m) de um ativo	Ferreira Aleixo, João André; Pereira Maia Couto, João Pedro	3009
1513	Estudo sobre a implementação de product data templates no setor da construção em portugal	Ferreira Aleixo, João André; Pereira Maia Couto, João Pedro	3020
1520	Visualização dinâmica de dados aplicada à gestão da manutenção	Matos, Raquel Valente Pinho; Alves, Ana Dinis; Rodrigues, Hugo Filipe; Costa, Aníbal Guimarães; Rodrigues, Maria Fernanda Da Silva	3030
1536	A gestão de riscos em empresas de construção brasileiras na região metropolitana de belo horizonte	Júnior, Renato Nunes Campos; Cesar, Cristina Guimarães; Oliveira, Rui Alexandre Fig. De	3039

Tema 7. Patologia e reabilitação

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1105	Estudo do efeito de um produto hidro e oleofóbico em pedras porosas presentes no património construído	Mègre Pires, Sofia; Ferreira Pinto, Ana Paula; Machado, Raúl; Sena Da Fonseca, Bruno	3051
1113	Mensuração da largura de fissuras em revestimentos de argamassa por termografia	De Souza Silva, Matheus; Rocha De Souza, Ana Luiza; Bauer, Elton	3062
1124	Análise do ensaio de potencial de corrosão com hastes de cobre de diferentes diâmetros	Castro, Wilamy Valadares; Santos Junior, Walfrides Monteiro Dos; Cerqueira, Gustavo Corrêa; Ribeiro Filho, Idalmo Petrucci	3074
1165	Análise da influência da manutenção na envolvente dos edifícios: comparação entre inspeções visuais e modelos teóricos	Dias, Ilídio S.; Silva, Ana; Flores-Colen, Inês	3085
1179	Mapeamento das manifestações patológicas na construção civil: causas, origens e recomendações	Barreto, Douglas; Artoni, Frederico	3097
1228	Principais manifestações patologicas em pisos industriais de concreto	Romero, Jose Roberto Hortencio; Dreossi, Carla Raquel Felippini	3110
1271	Compatibilidade de argamassas de fixação superior e argamassas de revestimento	Masuero, Angela Borges; Masuero, Joao Ricardo; Sasso, Henrique; Zini, Aline	3122
1322	Monitorização de estruturas históricas com recurso a sensores de fibra ótica – caso do mosteiro da batalha	Bourgeois, Inês; Pereira, Luís; Antunes, Paulo; Ferreira, Victor; Rodrigues, Hugo	3131
1339	Patologias em estradas moçambicanas, avaliação das condições do pavimento flexível	Chale, Anastacia Da Graca	3143
1351	Eficiência da aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica em concretos de cimento portland e reações álcali-agregado como efeito colateral	Polli, Felipe Hartman; Jesus, Taynah Almeida De; Pereira, Eduardo	3152
1363	Análise de degradação em fachadas com revestimento cerâmico em brasília	Castro, Wilamy Valadares De; Souza, Jessica Siqueira De; Matos, Ana Filipa Ferreira Da Silva Cigarro	3164
1410	Avaliação da resistência de aderência à tração em fachadas – estudo de caso	Da Silva Pires, Laís Alves; Siqueira De Souza, Jéssica; Ferreira Da Silva Cigarro Matos, Ana Filipa; Martins Nascimento, Matheus Leoni	3177
1430	Caracterização construtiva, estilística e iconográfica de um mausoléu neo-gótico do cemitério de conchada	Mascarenhas, Jorge; Belgas, Maria De Lurdes; Branco, Fernando G.	3187
1454	Desenvolvimento de estratégias para simplificar e sistematizar a reabilitação de coberturas tradicionais de madeira com telha cerâmica	Soares Ribeiro, Yasmin; Mendes Silva, Jose	3199
1455	Contributos da fotogrametria para a salvaguarda e promoção do património cultural edificado: caso de estudo em évora	Fanha, Paulo; Ferreira, Tiago Miguel; Mendes Silva, José	3211
1464	A importância da consideração da influência da temperatura no dimensionamento estrutural de pavimentos flexíveis	Rombe, Josefa Vanguir Muhorro; Diogo, José Rufino	3223

Id	Título	Autores	Pág.
1506	Reabilitação de pavimentos de madeira por via da solução pavimentos mistos: boas práticas para evitar insucessos	Cruz, Helena; Saporiti Machado, José; Duarte, Sónia	3233
1507	Caracterização e diagnóstico de estruturas de madeira do palácio nacional da ajuda	Cruz, Helena; Duarte, Sónia; Mota, Rogério; Fontul, Simona; Matias, Luís; Marques, Ana; Nunes, Lina	3245
1514	Desempenho de um revestimento polimérico para mitigação de reações expansivas de origem interna no betão	Custódio, João; Silva, Helena; Pereira, Sílvia; Cabral Fonseca, Susana; Bettencourt Ribeiro, António; Morais, Filipa; Pereira, Simão; Antunes, Luís; Pinto, Mariana	3257
1530	Sustentabilidade social na preservação do patrimônio histórico: estudo da aderência de azulejos portugueses do século xvii ao substrato de assentamento.	Rocha, Eudes; Moraes, Maurílio; Góes, Pablo Borba; Pessis, Anne Marie; Martin, ;Paulo	3270
1538	Manifestações patológicas no barroco pernambucano: o caso da capela da jaqueira, em recife (pe)	Silva, Joyce; Santos, Julia; Rocha, Eudes; Guido, Adolpho	3282
1539	Manifestações patológicas em azulejos do sítio histórico de olinda (pe): análise comparativa entre danos de painel interno e de fachada	Silva, Joana; Rocha, Eudes; Goes, Pablo; Martin, Paulo	3294
1543	Diagnóstico e prognóstico de reações químicas expansivas internas - barragem de cahora bassa	Custódio, João; Santos Silva, António; Costa, Dória; Miquithaio, Ângelo	3303
1544	Seismic strengthening of old masonry walls using nsm steel bars: experimental and numerical investigation	Demaj, Armando; Ferreira, João Gomes; Ana Isabel Marques, Ana Isabel Marques; Gago, António Sousa	3317
1545	Shelter project, a new concept of seismic protection. dynamic test of a building with a seismic shelter installed.	Hosseini, Seyedsajjad; Ferreira, João Gomes; Guerreiro, Luís; Moura, Rita; Guerreiro, João	3330

Tema 8. Casos de estudo

Índice de artigos

Id	Título	Autores	Pág.
1106	Escavação, contenção periférica e fundações de um edifício em alcântara – lisboa	Tomasio, Rui; Pinto, Alexandre	3343
1149	Dosagem de argamassa para impressão 3d: parâmetros reológicos e resistências mecânicas	Veras, Vinícius Capistrano De Paiva; Burgos, Lucas Ramiro; Cabral, Antônio Eduardo Bezerra; Bertini, Alexandre Araújo	3355
1171	Projecto de reconversão da gare do arco cego – reabilitação ou substituição da estrutura existente	Gomes, Augusto Martins; Virtuoso, Francisco; Quinhones, Andre; Canha, Carlos	3367
1346	O papel dos cidadãos no conhecimento da biodiversidade: o caso de estudo das coberturas verdes na cidade de lisboa	Padinha, Viviana Monteiro; Tiago, Patrícia; Leal, Ana I.; Silva, Cristina Matos	3379
1376	O uso de uma metodologia baseada em detecção remota para mapear e monitorizar as coberturas verdes em ambiente urbano: o estudo de caso de lisboa	Silva Pernes, Joana Marta; Falcão, Ana Paula; Miranda, Vasco; Matos Silva, Cristina	3393
1377	Impacto do risco sísmico no preço do imobiliário: uma análise de preferências reveladas	Januário, João Fragoso; Cruz, Carlos Oliveira; Varum, Humberto; Sousa, Vitor Faria	3406
1438	Interligação das infra-estruturas de estradas, energia e agua e saneamento do meio na região de maputo	Setimane, Sultane Júlio; Chale, Anastácia Da Graça Salvador Machaieie; Macucule, Domingos Augusto; Cravo, Ruy Moreira; Diogo, José Rufino	3421
1501	A sustentabilidade dos revestimentos tradicionais	Torres, Isabel	3434
1524	Impacto do envelhecimento natural nas propriedades das argamassas de cal – caso de estudo	Santos, Ana Rita; Veiga, Maria Do Rosário	3444

Tema 1. Materiais eco-eficientes e de baixo carbono

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DURABILIDADE DO BETÃO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR INCORPORAÇÃO DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO REACTIVO E CINZAS VOLANTES

Lucas Sequeira [a]; Javier Forero [b]; Miguel Bravo [a]; Luís Evangelista [c]; Jorge de Brito [a]

[a] CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, lucas.sequeira@tecnico.ulisboa.pt; miguelnbravo@gmail.com; jb@civil.ist.utl.pt

[b] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal, javier.valencia@tecnico.ulisboa.pt

[c] CERIS, Instituto Politécnico de Lisboa (ISEL.IP), 1959-007, Lisboa, Portugal, evangelista@dec.isel.pt

RESUMO

Nesta investigação, foi avaliado o desempenho da durabilidade do betão sustentável com incorporação de óxido de magnésio reactivo (MgO) e cinzas volantes (CV). A substituição parcial do cimento por estes dois materiais é uma solução apelativa para o sector da construção devido aos benefícios de sustentabilidade. A incorporação de CV por substituição parcial do cimento foi efectuada a 0%, 15% e 30%. A incorporação de MgO no betão foi realizada a 0%, 5%, 10% e 20%. Foram utilizados dois tipos de MgO, um de origem australiana e outro de origem espanhola. Estes materiais foram avaliados em termos da sua incorporação individual, sendo desenvolvida uma análise aquando da sua utilização simultânea.

Em termos de durabilidade, foram obtidas perdas de desempenho entre 3% e 95% em todos os ensaios (absorção de água por capilaridade e imersão, profundidade de carbonatação e resistência à penetração de cloretos). No entanto, ao longo do tempo, a diferença de desempenho em relação ao betão de referência tende a diminuir devido à hidratação lenta que caracteriza estes materiais alternativos. Verificou-se que, na maioria dos ensaios, a incorporação simultânea de MgO e CV provocou perdas de desempenho inferiores à soma das perdas da sua incorporação individual.

Palavras-chave: betão, óxido de magnésio reactivo, cinzas volantes, durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A população mundial tem vindo a aumentar exponencialmente nas últimas décadas. Uma das consequências deste aumento populacional é o aumento do número necessário de habitações e infraestruturas, especialmente nas grandes cidades. A indústria da construção civil tem um papel fundamental para permitir a correcta acomodação deste elevado número de seres humanos. No entanto, este mesmo sector é responsável pela emissão de 10% do CO_2 produzido a nível mundial. Mais concretamente, 7,4% do CO_2 provém da produção de cimento Portland. Com base nestes factos, é evidente que a produção de betão tem uma pegada ecológica elevada, de acordo com Sanjuán *et al*. (2020). Com o objectivo de reduzir esta pegada, várias alternativas têm sido propostas, entre as quais se destaca a que será apresentada neste artigo. Nesta investigação, foi estudada a utilização de MgO e cinzas volantes. A fissuração do betão pode levar a uma redução da sua durabilidade e também comprometer a segurança das estruturas. Outro problema advém da utilização de cimento Portland que, devido à alta alcalinidade da mistura, pode causar a corrosão do aço de reforço, resultando em danos estruturais.

O uso de MgO reactivo como substituto parcial do cimento Portland no betão pode reduzir a quantidade de CO_2 emitido por duas razões principais (Walling e Provis 2016). A primeira é a temperatura mais baixa de calcinação, uma vez que a produção de cimento Portland envolve o aquecimento de matérias-primas, a temperaturas de aproximadamente 1450 ^{o}C. Esse processo liberta grandes quantidades de CO_2 na atmosfera. Em contraste, o MgO reactivo pode ser produzido em temperaturas muito mais baixas, geralmente em torno de 750 ^{o}C, resultando em emissões de CO_2 muito menores (Jin e Al-Tabbaa 2014; Ruan e Unluer 2016; Sinka *et. al* 2018). Essa redução pode ser explicada pela carbonatação, ou seja, quando o betão é exposto à atmosfera, ele absorve naturalmente CO_2 ao longo do tempo. O uso de MgO reactivo pode acelerar esse processo, pois reage com o CO_2 para formar carbonato de magnésio. Nesta investigação, foi utilizado *light-burned* MgO, caracterizado pela sua alta reactividade, devido à sua temperatura de calcinação entre 700 e 1000 ^{o}C (Jin e Al-Tabbaa 2014). Estes autores afirmaram que grande parte do MgO utilizado na indústria é produzido através da calcinação de $MgCO_3$, conforme apresentado na Equação (1).

$$MgCO_3 + \text{calor} \Rightarrow MgO + CO_2 \quad (1)$$

Mo *et al.* (2012) afirmaram que a reacção de hidratação do MgO tem como produto final a brucite, $Mg(OH)_2$, conforme apresentado na Equação (2).

$$MgO + H2O \Rightarrow Mg(OH)_2 \quad (2)$$

Du (2005) apresentou mais informações sobre a hidratação do óxido de magnésio. O autor afirma que a formação de brucite causa expansão no betão porque os produtos de hidratação do MgO têm um volume maior do que o dos reagentes. Uma das características mais importantes no uso do MgO é sua reactividade. Essa propriedade é avaliada por meio da reacção do MgO com água e ácidos diluídos, e a reactividade depende principalmente das características físicas e pureza do material. A reactividade do MgO tende a aumentar com a redução do tamanho de partícula e o aumento da área específica. Esses dois parâmetros são controlados pelas condições de produção, ou seja, pureza da matéria-prima e temperatura de calcinação (Liska *et al.* 2009). Quanto menor a reactividade de uma amostra de MgO, mais lenta é sua hidratação. A menor área específica causa mais aglomeração das partículas da amostra, o que leva a uma menor hidratação.

Vários estudos foram conduzidos em materiais cimentícios com a incorporação de MgO. Em termos de durabilidade, as conclusões obtidas pelos diferentes autores foram claras. Bravo *et al*. (2021) analisaram a absorção de água por capilaridade em argamassas com a presença de 5%, 10%, 15%, 20%

e 25% de MgO na sua constituição. Os autores afirmaram que, quanto maior a quantidade de MgO presente, maior a absorção de água por capilaridade em relação à argamassa de referência. Pu e Unluer (2016) analisaram a capacidade de carbonatação do betão com a incorporação de 10% de MgO, a 14 dias. Os autores observaram que a profundidade de carbonatação em espécimes com MgO foi o dobro da obtida no betão de referência. Gonçalves *et al*. (2020) chegaram às mesmas conclusões, observando um aumento na profundidade de carbonatação em argamassas à medida que a percentagem de MgO aumentava.

O uso de cinzas volantes é interessante porque permite a sua reciclagem. Este material é composto principalmente por SiO_2 e Al_2O_3. De acordo com a *American Society for Testing Materials*, a cinza volante usada nesta investigação é de classe F, uma vez que a quantidade de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 (silicato + alumina + óxido de ferro) é superior a 70%. Fisicamente, é possível observar um efeito de fíler, que consiste em preencher os vazios entre as partículas de cimento Portland com partículas de cinza volante, pois estas têm dimensões menores (Walling e Provis 2016). Devido à presença de compostos silicosos, que na presença de água podem estar relacionados ao hidróxido de cálcio, ocorre um aumento no silicato de cálcio hidratado (C-S-H), proporcionando vantagens em termos de durabilidade (Malek *et al.* 2005). Durante as primeiras 24 horas, a cinza volante retarda a hidratação do betão. Esse fenómeno ocorre porque a cinza precisa da fracção vítrea para se solubilizar a fim de interagir com o hidróxido de cálcio. Após 28 dias de idade, ocorre o crescimento de hidratos na superfície das partículas de cinza volante.

Nayak *et al*. (2022) concluíram que a absorção de água por imersão e capilaridade em betão com 40% de CV foi 26% menor do que a do betão de referência, devido à sua forte reacção com os produtos libertados durante o processo de hidratação. O C-S-H extra produzido na presença de partículas finas de CV preencheu alguns poros dentro do betão, tornando-o mais denso e compacto. Saha (2018) concluiu que a penetração de cloretos a 28 dias em betão com 10%, 20%, 30% e 40% de CV foi reduzida em 3%, 27%, 48% e 53%, respectivamente, em relação ao betão de referência. O estudo sugeriu que essa redução se deve à finura da cinza volante. No entanto, a menor concentração de iões alcalinos (Na+ e K+) e iões hidroxila (OH-) na solução dos poros é mencionada como outra razão para esse comportamento superior. Um estudo experimental de Turk *et al*. (2013) mostrou que, à medida que o teor de CV no betão auto-compactado aumenta, a resistência à carbonatação diminui (Khunthongkeaw *et al*. 2009). Isso ocorre porque o uso de CV reduz a concentração de produtos propensos à carbonatação (hidróxido de cálcio e C-S-H). Como resultado, o CaO total diminui devido às taxas mais altas de carbonatação. Com um aumento de quantidade de CV no betão, espera-se que a absorção de água por capilaridade e imersão apresente valores mais baixos do que os do betão de referência. O mesmo ocorre para a resistência à penetração de cloretos e profundidade de carbonatação, conforme encontrado nos estudos apresentados acima.

Ao analisar a combinação de cinzas volantes com MgO, foi possível concluir que o MgO é insolúvel com o C-S-H proveniente da hidratação do cimento Portland e cinzas volantes. Assim, a brucite reagirá com a sílica das cinzas volantes, formando um composto chamado silicato de magnésio hidratado (M-S-H) (Brew e Glasser 2005). Dependendo da quantidade de sílica presente, a hidratação do MgO pode originar dois produtos que podem ou não coexistir: brucite e M-S-H. Choi *et al*. (2014) focaram o seu estudo em betão com incorporação parcial de CV e MgO. Para a campanha experimental, incorporaram 20% de CV em todas as misturas, enquanto a quantidade de MgO variava entre 0% e 5%. As amostras foram curadas em água por 28 e 360 dias. Os autores utilizaram diferentes razões água / ligante de 0,65 e 0,48. A partir dos resultados do teste de migração de iões de cloreto, o 65-M0-28 teve um coeficiente 1,1% menor do que o 65-M5-28. No entanto, o 65-M0-360, com um período de cura mais longo, teve um coeficiente 20% maior em comparação com o 65-M5-360. Além disso, o

MgO funcionou de maneira semelhante no betão com a/l = 0,48. No mesmo estudo, os autores também analisaram a capacidade de carbonatação das diferentes misturas produzidas a 28, 90 e 180 dias de idade. As profundidades de carbonatação de 65-M0-28 e 65-M5-28 foram quase idênticas até a 180 dias de exposição, com uma diferença de apenas 4%. Por outro lado, a amassadura 65-M5-360, tendo sido curada por um período mais longo, produziu uma profundidade de carbonatação menor (15%) do que 65-M0-360 desde o início. É possível concluir que a profundidade de carbonatação em idades precoces é pouco afectada pela presença de MgO e CV, mostrando melhores resultados em idades mais avançadas. Sabe-se que um aumento na porosidade promove a carbonatação do betão, pois facilita a entrada de CO_2 (Khunthongkeaw et. al 2009).

Nesta campanha experimental, foi produzido betão com 0%, 5%, 10% e 20% de MgO e 0%, 15% e 30% de cinzas volantes. Deve-se notar que as percentagens de incorporação são definidas em termos de massa. Além disso, o estudo focou principalmente no uso simultâneo desses dois materiais, mas essa substituição também será analisada individualmente para entender melhor sua ação combinada. Dois tipos diferentes de MgO foram estudados, um de origem australiana (MgO-A) e outro da Espanha (MgO-S), a fim de obter conclusões sobre como algumas características específicas do MgO influenciam o desempenho futuro do betão. Foram analisadas características relacionadas com a sua durabilidade. Também foi realizada uma análise do betão no seu estado fresco, estudando a sua trabalhabilidade. Em termos de durabilidade, os testes realizados foram a absorção de água por capilaridade e imersão, a profundidade de carbonatação e a resistência à penetração de cloretos.

Actualmente, não há literatura suficiente para permitir a caracterização do betão com MgO e cinzas volantes em termos de durabilidade. É importante preencher essa lacuna para poder avançar na investigação de um betão mais sustentável. De facto, as escassas pesquisas conduzidas sobre o uso combinado desses dois materiais não avaliam de forma abrangente a durabilidade dessas misturas. Por outro lado, a avaliação do uso de diferentes reactividades do MgO (um MgO de baixa reactividade e um MgO de alta reactividade foram utilizados) nessas misturas de betão com MgO e CV também é totalmente inovadora.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Nesta investigação, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos, agregados grossos, cimento CEM I 42.5R, água potável, MgO e cinzas volantes. Nenhum aditivo foi utilizado nesta campanha experimental. No Quadro 1, é fornecido o tamanho de partícula dos diferentes ligantes. As partículas de MgO-A têm claramente um tamanho menor do que as partículas de MgO-S.

Quadro 1 - Tamanho das partículas dos diferentes ligantes

Material	< 3 µm (%)	Entre 3 e 32 µm (%)	> 32 µm (%)
OPC	25.9	56.2	17.9
CV	21.3	55.9	22.8
MgO-S	12.1	15.3	72.6
MgO-A	40.1	56.0	3.9

Dois tipos diferentes de MgO foram usados, espanhol e australiano, com purezas de 85,0% e 98,8%, respectivamente. Em termos de área específica, o MgO-S tinha 4,9 m^2/g, enquanto o MgO-A tinha 51,2 m^2/g. A reactividade foi de 3544 s e 14 s para os MgO espanhol e australiano, respectivamente. As

cinzas volantes usadas para produzir betão também foram fornecidas pela Secil. O cimento Portland CEM I 42.5R foi produzido pela Secil (Lisboa, Portugal). Em termos de agregados naturais, foram utilizados dois tipos: agregados grossos (com granulometria comercial de acordo com as designações 2/6, 6/12 e 12/20 da EN 12620) e areias siliciosas (0/2 e 0/4). As cinzas volantes de classe F foram obtidas da EDP-Gestão da Produção de Energia, S.A., na Central Termoeléctrica de Sines, em Portugal (com 58% de SiO2 e 24% de Al_2O_3).

2.2 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

Seguindo uma metodologia apresentada por Nepomuceno *et al*. (2012), a composição de cada mistura foi determinada. Para caracterizar o betão de referência, foi definida uma classe de resistência C30/37 e uma classe de consistência S2. Diferentes razões água / ligante foram usadas para manter a classe de consistência S2 em todas as misturas. A única alteração na composição das outras misturas é a quantidade de cada ligante, de acordo com as percentagens definidas e explicadas. No total, foram produzidas 21 misturas: betão de referência (BR); misturas com proporções de substituição de 5%, 10% e 20% de MgO-A e MgO-S, em massa; misturas com incorporações de 15% e 30% de cinzas volantes, em massa (com ou sem MgO). Cada mistura é identificada como Cx/y:CV/MgO-A ou Cx/y:CV/MgO-S, onde x é a quantidade de CV e y é a quantidade de MgO australiano ou espanhol, respectivamente.

2.3 TESTES

Foi decidido dividir a campanha experimental em duas fases. Primeiramente, os diferentes materiais que compunham o betão foram avaliados. Em seguida, as misturas foram analisadas no estado fresco e endurecido. Para classificar as diferentes misturas em termos de durabilidade, foram realizados os testes mencionados acima. A absorção de água por capilaridade foi avaliada a 28 e 91 dias, de acordo com a LNEC E-393 (1993). A absorção de água por imersão foi medida a 28 dias com base na LNEC E-394 (1993). Para a resistência à penetração de cloretos, o teste do coeficiente de difusão foi realizado a 28 e 91 dias, em 3 provetes para cada idade, de acordo com a NT BUILD 492 (1999-11). Por fim, a profundidade de carbonatação foi medida a 7, 28, 56 e 91 dias de idade, com base na LNEC E391 (1993). Todos os provetes foram colocados em câmara húmida por 28 ou 91 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONSISTÊNCIA

Ao aumentar a taxa de incorporação de MgO reactivo, a consistência das misturas tendeu a diminuir. Portanto, foi necessário aumentar a razão água / ligante nas misturas à medida que o MgO reactivo aumentava para manter a consistência alvo. Todas as misturas ficaram dentro da classe de consistência S2 (50–100 mm). Comparando os dois tipos diferentes de MgO (da Espanha e da Austrália), foi necessária uma maior quantidade de água na mistura com MgO da Austrália. Isso deve-se à maior finura e área específica das partículas de MgO-A, pois quanto maior a área específica, maior a quantidade de água absorvida pela sua superfície. Por outro lado, houve uma ligeira diminuição na quantidade de água necessária no betão com CV.

3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Primeiramente, os resultados de absorção de água por capilaridade a 28 e 91 dias para betão com a incorporação de MgO são apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Com a presença de MgO,

a absorção de água por capilaridade tende a aumentar consideravelmente. Foi possível obter, especialmente a 91 dias, melhores resultados quando o MgO-A foi utilizado.

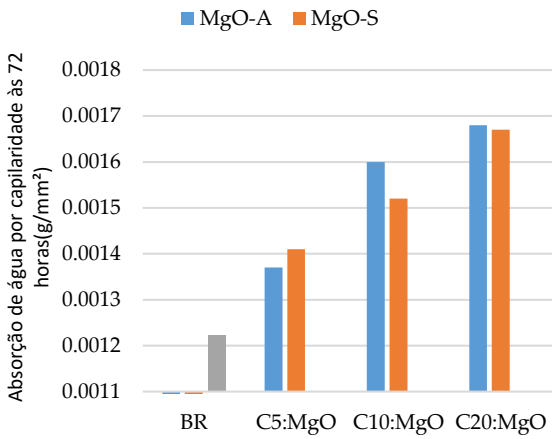


Figura 1 - Absorção de água por capilaridade a 72 h *versus* quantidade de MgO, a 28 dias

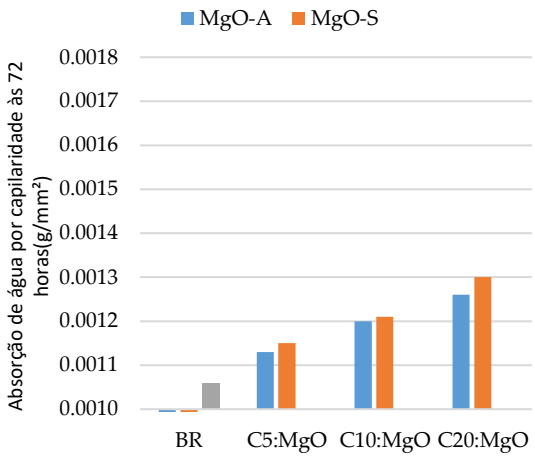


Figura 2 - Absorção de água por capilaridade a 72 h *versus* quantidade de MgO, a 91 dias

Conforme esperado, os valores de capilaridade a 28 dias são mais altos do que aqueles a 91 dias. Observa-se um aumento de 37% em C20:MgO-A, em relação ao BR, a 28 dias. No entanto, esse aumento é apenas de 23% a 91 dias. Choi *et al*. (2014) chegaram à mesma conclusão e explicaram que esse fenómeno ocorre devido à hidratação tardia do MgO em relação ao cimento Portland. Os mesmos autores constataram que a porosidade do betão com MgO tende a diminuir ao longo do tempo. Analisando o Quadro 2, é possível observar a absorção de água por capilaridade no betão com MgO e CV a 28 e 91 dias.

Quadro 2 - Valores experimentais no laboratório, e os valores teóricos expectáveis, a 28 e 91 dias

Amassadura	**28 dias**		**91 dias**	
	△ real (%)	△ teórico (%)	△ real (%)	△ teórico(%)
C15/5:CV/MgO-A	+4.1	+17.4	+4.4	+8.9
C15/5:CV/MgO-S	+3.7	+20.7	+3.4	+10.8
C15/10:CV/MgO-A	+13.0	+36.2	+5.7	+15.5
C15/10:CV/MgO-S	+11.5	+29.7	+6.5	+17.4
C15/20:CV/MgO-A	+16.0	+42.8	+9.0	+21.2
C15/20:CV/MgO-S	+23.5	+41.9	+3.4	+24.9
C30/5:CV/MgO-A	+12.0	+23.4	+7.3	+13.6
C30/5:CV/MgO-S	+23.5	+26.7	+3.3	+15.5
C30/10:CV/MgO-A	+18.0	+42.2	+12.8	+20.2
C30/10:CV/MgO-S	+24.3	+35.7	+16.4	+22.1
C30/20:CV/MgO-A	+19.3	+48.8	+17.1	+25.8
C30/20:CV/MgO-S	+22.3	+47.9	+20.1	+29.6

*△ valor teórico expectável da mistura CX/Y:CV/MgO corresponde à soma de △ real de BRX:CV e △ real de CY:MgO

Ao incorporar MgO e CV na constituição do betão, conclui-se que, à medida que a quantidade desses dois materiais aumenta, a capacidade de absorção capilar também tende a aumentar. Novamente, a 28 dias, essa mesma capacidade apresenta valores mais altos do que nos testes realizados a 91 dias. O MgO-A parece apresentar melhores resultados do que o equivalente espanhol. Quando os dois materiais são usados simultaneamente, os resultados obtidos foram sempre melhores do que os valores teóricos esperados (soma dos efeitos da incorporação individual desses materiais). Assim, em termos dessa propriedade, o uso simultâneo de MgO e CV na produção de betão parece ser interessante.

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A Figura 3 mostra que a absorção de água por imersão a 28 dias tende a aumentar à medida que a taxa de incorporação de MgO e CV aumenta. Usando apenas o MgO-A, a variação varia entre aumentos de 54% e 65% em relação ao BR para o uso de 5% e 20% de MgO-A, respectivamente. Valores semelhantes foram obtidos para o equivalente espanhol. No entanto, deve-se observar que o uso combinado desses materiais (MgO e CV) mostra uma melhoria em relação ao valor teórico esperado. Quando o MgO é misturado com água, ele passa por uma reacção química para formar hidróxido de magnésio, que pode preencher os espaços porosos no betão e reduzir a absorção de água. Quando o MgO e as cinzas volantes são usados simultaneamente no betão, complementam as propriedades um do outro. O MgO preenche os espaços porosos, enquanto as cinzas volantes produzem um gel adicional de C-S-H e melhoram a durabilidade. Como resultado, a combinação desses dois materiais proporciona melhores resultados em termos de absorção de água por imersão do que a soma dos efeitos individuais (Brew e Glassser 2005).

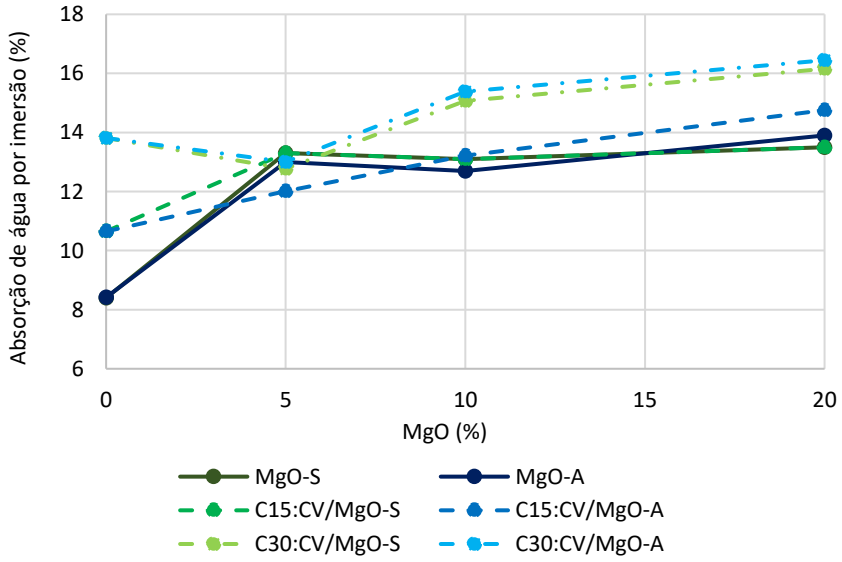


Figura 3 - Absorção de água por imersão a 28 dias

3.4 CARBONATAÇÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6, é apresentada a profundidade de carbonatação a 7, 28, 56 e 91 dias das misturas de betão que foram curadas em uma câmara com 5% de CO_2, 60% de humidade relativa e 23 ºC de temperatura.

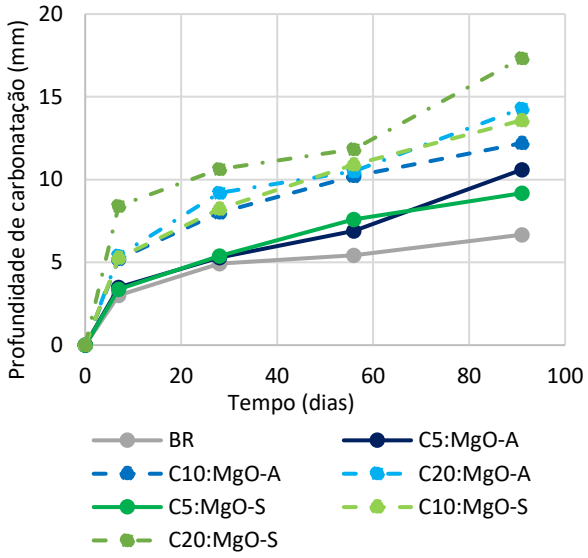


Figura 4 - Profundidade de carbonatação em betões com MgO

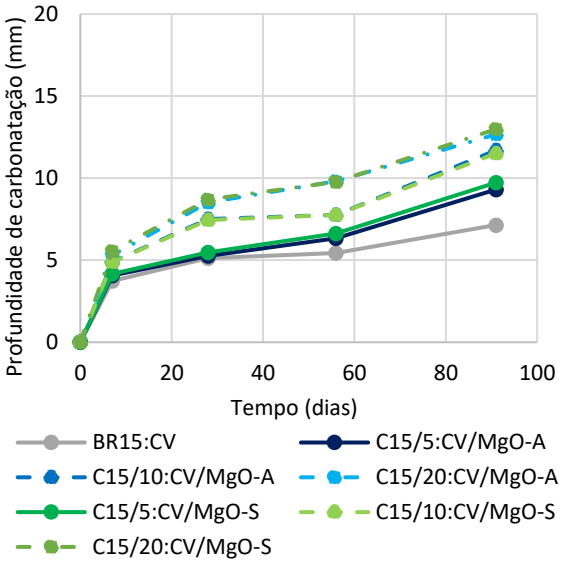


Figura 5 - Profundidade de carbonatação em betões com MgO e 15% de CV

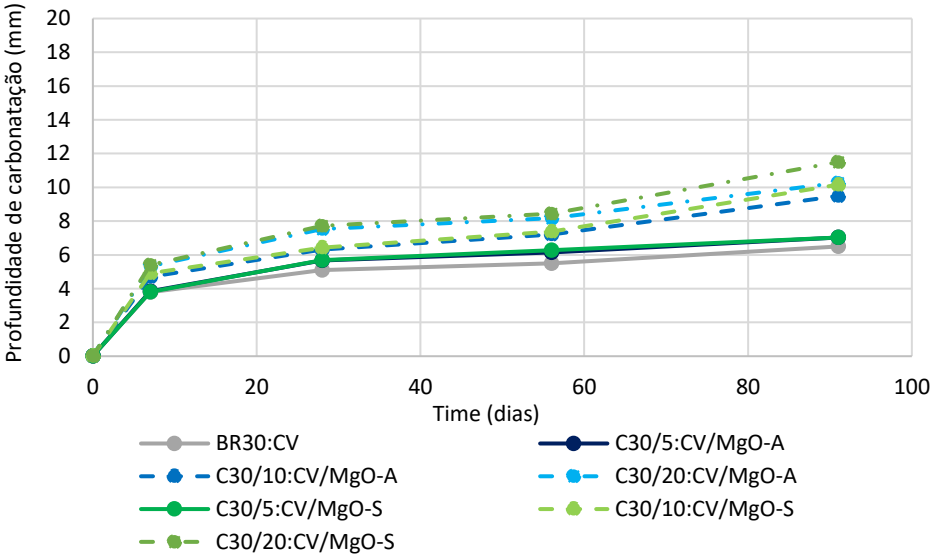


Figura 6 - Profundidade de carbonatação em betões com MgO e 30% de CV

É claro que, com a incorporação de MgO e CV, a profundidade de carbonatação aumenta. A substituição parcial do cimento Portland resulta em menor produção de C-S-H e $Ca(OH)_2$, cuja interacção levaria a uma redução no avanço da carbonatação. Além disso, de acordo com Gonçalves *et al*. [19], a quantidade reduzida de $Ca(OH)_2$, que apresenta um nível de pH de ~12,5, e uma maior quantidade de $Mg(OH)_2$, com um pH de ~10,5, significa que o nível geral de pH diminui, mostrando assim um aumento na taxa de carbonatação de acordo com o teste de fenolftaleína. Juntamente com a existência de uma microestrutura mais porosa em comparação com o cimento Portland convencional, tal poderá justificar os resultados de forma coerente.

Mais uma vez, é importante notar que o uso simultâneo desses dois materiais apresenta resultados muito bons, em comparação com os efeitos somados de sua incorporação individual. Foi possível

observar que, em 11 das 12 misturas de betão produzidas com MgO e FA, foram obtidos valores melhores para essa propriedade do que os valores teóricos esperados.

3.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

As Figuras 7-9 resumem os resultados do teste de penetrabilidade de cloretos a 28 e 91 dias. Como esperado, é evidente que, com a incorporação de MgO e CV, o coeficiente de migração de iões de cloreto aumenta.

Tal como nas propriedades anteriores, o valor teórico esperado para a combinação de MgO e CV é substancialmente maior do que o valor obtido em laboratório. Isso significa que o uso simultâneo de MgO e CV em betão também tem consequências positivas nessas propriedades do betão. Vários estudos foram realizados comparando o coeficiente de difusão de iões de cloreto com a absorção de água por capilaridade.

3.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A DURABILIDADE DO BETÃO E A SUA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

É importante comparar a resistência à compressão com as diferentes propriedades de durabilidade analisadas para entender se há uma relação entre as diferentes propriedades. Para o betão de referência, obteve-se uma resistência à compressão de 44,2 MPa a 28 dias e uma resistência à compressão de 48,3 MPa a 91 dias. Na Quadro 3, é fornecida a variação nas propriedades mencionadas nas misturas ternárias (OPC, MgO, FA), em relação ao betão de referência.

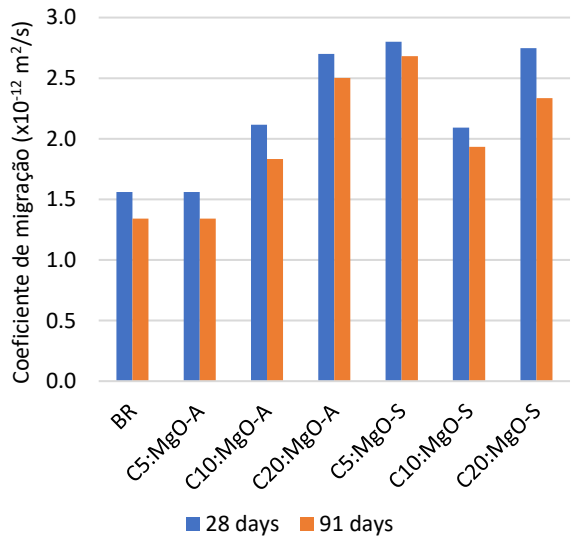


Figura 7 - Coeficiente de migração de iões cloreto em betão com MgO

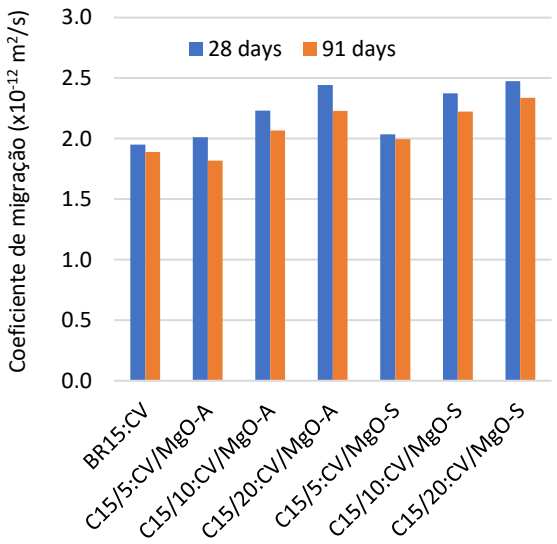


Figura 8 - Coeficiente de migração de iões cloreto em betão com MgO e 15% de CV

Ficou claro que há uma redução na resistência à compressão em betões com a incorporação parcial de MgO e CV. De facto, quanto maior a quantidade de MgO e CV incorporada, maior a redução observada nessa resistência em comparação com o betão de referência. A 28 dias, houve reduções entre 23% e 60% na resistência à compressão das misturas ternárias em comparação com o RC. No entanto, a 91 dias de idade, essa redução variou apenas entre 13% e 40%, comprovando o melhor comportamento dessas misturas de betão com o avanço do tempo de cura.

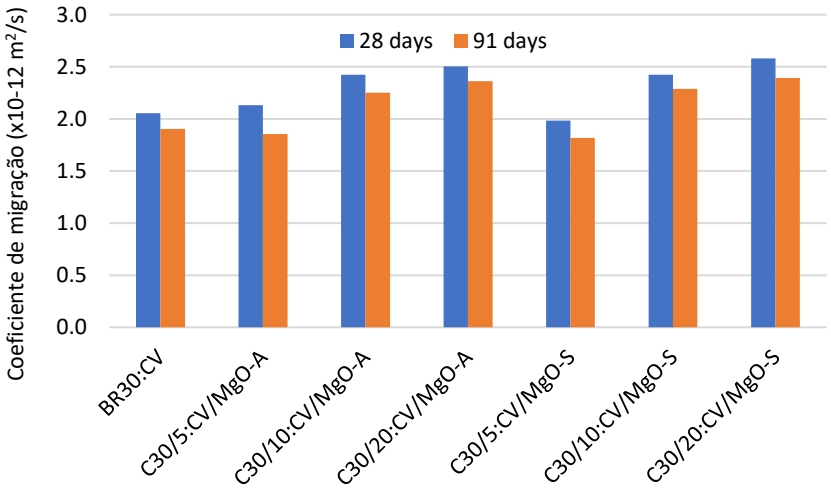


Figura 9 - Coeficiente de migração de iões cloreto em betão com MgO

Fica claro que a queda na capacidade mecânica do betão é acompanhada de resultados piores em termos de durabilidade. A presença simultânea de MgO e CV na composição do betão leva a resultados piores em todas as propriedades de durabilidade estudadas. À medida que a quantidade desses materiais aumenta, também é observado um comportamento pior das misturas ternárias.

Conclui-se que as propriedades mecânicas e de durabilidade apresentam comportamento semelhante em betões com MgO e CV.

4 CONCLUSÕES

Esta investigação teve como objectivo estudar a influência, em termos de durabilidade, do betão com a incorporação parcial de MgO e cinza volante. Em quase todas as propriedades, foram obtidos resultados piores com a presença de um desses materiais, ou ambos, em relação ao betão de referência. Observou-se também que o MgO espanhol geralmente apresenta resultados piores quando comparado ao equivalente australiano. Isso ocorre devido à sua menor área específica e, consequentemente, à sua menor reactividade. Ao incorporar MgO e CV na constituição do betão, conclui-se que, à medida que a quantidade desses dois materiais aumenta, a capacidade de absorção capilar também tende a aumentar. Um comportamento semelhante foi detectado na capacidade de absorção de água por imersão a 28 dias. A incorporação combinada dos dois materiais resultou em resultados piores. Observando os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação, foram obtidos resultados semelhantes. No entanto, o uso de CV originou uma melhoria em comparação com o RC. Como esperado, com a incorporação de MgO e CV, o coeficiente de migração de iões de cloreto aumenta. Ao estudar a resistência à compressão a 28 e 91 dias, foram encontradas tendências semelhantes às observadas nas propriedades de durabilidade. A substituição parcial de OPC causa uma diminuição na capacidade mecânica. Acompanhando essa diminuição está um comportamento de durabilidade pior do betão não convencional. Conclui-se assim que a presença de MgO e CV no betão afecta negativamente as características mecânicas e de durabilidade do betão. Por fim, uma das conclusões mais importantes foi que em nenhuma dessas propriedades houve uma sobreposição total dos efeitos negativos. Nos resultados obtidos, é alcançada uma melhoria quando CV e MgO são combinados, em relação ao resultado teórico esperado. Apenas na absorção de água por capilaridade foram observadas diminuições com o uso de MgO e FA, em relação ao RC, inferiores à proporção de incorporação desses materiais nas diferentes misturas.

Em conclusão, fica claro que o uso combinado de MgO e CV mostra resultados melhores do que seria teoricamente esperado. O uso simultâneo desses materiais parece funcionar melhor, mas são necessários mais estudos para encontrar a proporção ideal de incorporação que poderia optimizar os resultados. Neste estudo, a incorporação de 15% de CV e 5% de MgO no betão parece ser interessante. Por outro lado, a substituição de 50% do OPC parece excessiva. Estes materiais são económicos e prontamente disponíveis, tornando-os uma opção atraente para construtores e engenheiros que procuram melhorar a sustentabilidade e durabilidade de suas estruturas. Além disso, o uso de óxido de magnésio activo e cinzas volantes pode melhorar a trabalhabilidade do betão, facilitando a betonagem e moldagem na forma desejada. A durabilidade de longo prazo de estruturas de betão contendo óxido de magnésio reactivo e cinzas volantes deve ser estudada. Isso envolveria testar o desempenho dessas estruturas em diferentes condições ambientais ao longo de um período prolongado. Essas informações seriam valiosas para determinar os requisitos de manutenção de estruturas de betão que contenham esses materiais alternativos. Outra área de investigação adicional será estudar os efeitos do uso de óxido de magnésio reactivo e cinzas volantes em combinação com outros materiais de construção sustentáveis, como agregados reciclados, a fim de reduzir ainda mais o impacte ambiental da produção de betão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Bravo, M.; Forero, J.A.; Nobre, J.; de Brito, J.; Evangelista, L. (2021) Performance of mortars with commercially-available reactive magnesium oxide as alternative binder, Materials, 14, 938.

Brew, D.R.M.; Glasser, F.P. (2005) Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels. Cement and Concrete Research, 35, 85-98, doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.022.

BS EN 12620 (2013) Aggregates for concrete; British Standard: London, UK.

Choi, S.-w.; Jang, B.-s.; Kim, J.-h.; Lee, K.-m. (2014) Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly-burnt MgO. Construction and Building Materials, 58, 77-84, doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.080.

Du, C. (2005) A review of magnesium oxide in concrete. Concrete International, 27, 45-50.

Gonçalves, T.; Silva, R.V.; de Brito, J.; Fernández, J.M.; Esquinas, A.R. (2020) Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. Cement and Concrete Composites, 105, 103420, doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103420.

Jin, F.; Al-Tabbaa, A. (2014) Characterisation of different commercial reactive magnesia, 26, 101-113, doi:10.1680/adcr.13.00004.

Khunthongkeaw, J.; Tangtermsirikul, S.; Leelawat, T. (2009) A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. J. Constr. Build. Mater. Res., 20, 744-753.

Liska, M.; Al-Tabbaa, A. (2009) Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products, Waste and Resource Management, 162, 185-196, doi:10.1680/warm.2009.162.4.185.

LNEC E-391 (1993) Betões. Determinação da resistência à carbonatação.. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-393 (1993) Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-394 (1993) Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

Malek, R.I.; Khalil, Z.H.; Imbaby, S.S.; Roy, D.M. (2005) The contribution of class-F fly ash to the strength of cementitious mixtures. Cement and Concrete Research, 35, 1152-1154, doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.021.

Mo, L.; Deng, M.; Wang, A. (2012) Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions. Cement and Concrete Composites, 34, 377-383, doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.018.

Nayak, D.K.; Abhilash, P.P.; Singh, R.; Kumar, R.; Kumar, V. (2022) Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. Cleaner Materials, 6, 100143, doi:https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143.

Nepomuceno, M.; Oliveira, L.; Lopes, S.M.R. (2012) Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. Construction and Building Materials, 26, 317-326, doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027.

NORDTEST (1999) Chloride migration coefficient from non steady-state migration experiments. NT BUILD 492, 1–11.

Pu, L.; Unluer, C. (2016) Investigation of carbonation depth and its influence on the performance and microstructure of MgO cement and PC mixes. Construction and Building Materials, 120, 349-363, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.067.

Ruan, S.; Unluer, C. (2016) Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. Journal of Cleaner Production, 137, 258-273, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.071.

Saha, A.K. (2018) Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. Sustainable Environment Research, 28, 25-31, doi:https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001.

Sanjuán, M.Á.; Andrade, C.; Mora, P.; Zaragoza, A. (2020) Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A Spanish case study. Applied Sciences, 10, 339. https://doi.org/10.3390/app10010339.

Sinka, M.; Van den Heede, P.; De Belie, N.; Bajare, D.; Sahmenko, G.; Korjakins, A. (2018) Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete. Resources, Conservation and Recycling, 133, 288-299, doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.024.

Turk, K.; Karatas, M.; Gonen, T. (2013) Effect of fly ash and silica fume on compressive strength, sorptivity and carbonation of SCC. KSCE Journal of Civil Engineering, 17, 202-209, doi:10.1007/s12205-013-1680-3.

Walling, S.A.; Provis, J.L. (2016) Magnesia-based cements: A journey of 150 years, and cements for the future? Chemical Reviews, 116, 4170–4204.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS TÉRMICOS COMO INCREMENTO DE CONFORTO NAS ALDEIAS HISTÓRICAS

Mariana Beirante[a]; Hugo Rodrigues[b]; Paulo Silva[c]; Ana Velosa[d]

[a]RISCO, DECivil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, mariana.beirante@ua.pt

[b]RISCO, DECivil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, hrodrigues@ua.pt

[c]ID+, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, paulo.silva@ua.pt

[d] RISCO, DECivil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, avelosa@ua.pt

Resumos

As doze aldeias designadas como Aldeias Históricas de Portugal (AHP) possuem um património vernáculo de elevado interesse cultural. É indubitável que existe atualmente uma necessidade de intervir nestes edifícios de forma a aumentar os seus níveis de conforto e, consequentemente, a sua habitabilidade. Este é um passo fundamental para gerar maior atratividade numa região altamente deprimida em termos populacionais.

Sendo a questão do conforto térmico extremamente relevante nesta zona do país, devido a temperaturas extremas e à realidade presente em termos de pobreza energética, o estudo focou-se nesta característica. Neste contexto, e escolhendo a aldeia de Sortelha como objeto de estudo, foram efetuadas medições em diversos espaços de casas tradicionais de forma a determinar a existência ou não de melhoria de condições de conforto termo-higrométrico no interior destes espaços. Tendo em conta os dados obtidos, foram simuladas soluções de revestimento das paredes e de mudança de proteção de vãos, para avaliar o seu impacto em termos de melhoria do conforto destes espaços.

Verifica-se que é possível melhorar o conforto térmico no interior de edifícios vernáculos de construção tradicional, utilizando soluções sustentáveis tais como o revestimento de paredes com argamassas térmicas ou a incorporação duma janela adicional. O artigo incorporará os dados resultantes do estudo e a sua discussão.

PALAVRAS-CHAVE

Conforto, argamassas, construção vernácula, aldeias históricas, caso de estudo

1 INTRODUÇÃO

A construção tradicional, também conhecida como vernácula, é fortemente influenciada pelas características geográficas, resultando numa diversidade de sistemas e técnicas únicas em cada país e região. Estas construções adaptam-se aos materiais predominantes, à topografia, às condições climáticas, à insolação, à herança cultural e ao contexto económico locais. A adaptação da construção às condições ambientais e materiais locais fez com que os edifícios assumissem uma identidade própria que caracteriza a imagem arquitetónica de cada região (Universidad de Cantabria, 2014). Em consequência, as construções tradicionais utilizavam técnicas baseadas nos recursos locais e de simples execução. Estas técnicas teriam em consideração a orientação, geometria, forma e o uso de materiais naturais locais, por vezes orgânicos, biodegradáveis e renováveis, com baixa necessidade de transporte e de processamento. (Fernandes, 2012).

A rede de Aldeias Históricas de Portugal, gerida pela Associação das Aldeias Históricas de Portugal (AHP), abrange 12 aldeias históricas: Almeida, Belmonte, Castelo Mendo, Castelo Novo, Castelo Rodrigo, Idanha-a-Velha, Linhares, Marialva, Monsanto, Pióndão, Sortelha e Trancoso. Estas aldeias constituem hoje importantes atrações turísticas para as populações urbanas (Reis & Baltazar, 2019). Nestas aldeias impera a construção vernácula, com recurso a pedras derivadas de rochas locais, materiais vegetais, terra e cal.

No contexto vernáculo e especificamente, nestas aldeias, verifica-se um abandono das habitações tradicionais e um fenómeno que consiste ora no abandono da localidade, ora na mudança para os arredores. Assim, pretendeu-se estudar as condições existentes utilizando um caso de estudo e propor soluções possíveis para a melhoria do conforto, com base na sustentabilidade dos materiais utilizados.

2 CONTEXTO E NECESSIDADES DE AQUECIMENTO

2.1 CONFORTO TÉRMICO

A necessidade de manter um adequado conforto térmico em espaços residenciais é um desafio presente. As soluções de curto-prazo (investimento em equipamentos com recurso a consumo energético proveniente de fontes de energia não renovável) têm custos ambientais elevados. Por outro lado, as soluções de longo-prazo, mais exigentes do ponto de vista tecnológico, revelam-se mais caras pela necessidade de reformulação de todo o sistema de produção e consumo. Esta dupla dificuldade traduz-se na limitação do acesso a energia, nomeadamente para o aquecimento do ambiente, com severas consequências para a saúde e podendo mesmo estar relacionada com os números de óbitos. Portugal, enquanto país do sul da Europa com clima mais ameno, está no grupo de países onde a pobreza energética é maior, com percentagem de alojamentos sem aquecimento apropriado superior a 20%. A procura de soluções cumpre com os desígnios da Nova Agenda Urbana, nomeadamente com os ODS 3, 7, 10, 11, 12 e 13.

2.2 CONTEXTO CONSTRUTIVO

A arquitetura tradicional na região norte de Portugal é caracterizada pela utilização de materiais como a madeira e a pedra. Para enfrentar invernos rigorosos a estratégia de aquecimento passa por três técnicas na fase de construção: um, orientar os edifícios a uma boa exposição solar para tirar partido da radiação solar; dois, proteger contra a ação do vento, implantando os edifícios em vales e encostas viradas a sul; e três, reduzir as perdas de calor pelas fachadas e cobertura.

As fundações das casas tradicionais do norte de Portugal são maioritariamente feitas em alvenaria de pedra devido à topografia do terreno. Apresentam a profundidade necessária para conferir estabilidade ao edifício, e por essa razão, em terrenos rochosos, é comum encontrar-se fundações de reduzida profundidade. Por outro lado, em locais de baixa resistência e compacidade, como acontece em locais próximos da água, as fundações são mais profundas e assentam sobre estacaria de madeira (Freitas, 2012). As paredes das fachadas nascem geralmente de ensoleiramento geral (Freitas, 2012).

Para reduzir as perdas de calor no interior, os edifícios do norte do país podiam ter uma cobertura de colmo, que forma uma estrutura impermeável e com boas características de isolamento térmico ou então uma cobertura em pedra de lousa, mais conhecida como xisto, que é mais característica em regiões montanhosas e também confere um bom isolamento térmico. Nesta última, as pedras assentam numa estrutura mais resistente, geralmente em barrotes, e podem estar simplesmente apoiadas, quando a inclinação do telhado é mais baixa ou podem ser fixadas com um ou dois pregos cravados, quando a inclinação for maior. A montagem da cobertura inicia-se cobrindo toda a espessura das paredes com as pedras, de forma a conformar o beiral, dispondo-as em escama e sobrepostas umas nas outras até chegar à cumeeira. Em algumas construções, as juntas da cobertura eram preenchidas com argamassa (adaptado de Oliveira et al., 2020). Anos mais tarde surgiram também a telha cerâmica e a chapa metálica, que são técnicas que utilizadas ainda atualmente e que conferem um melhor isolamento térmico do que o colmo ou a pedra.

No interior, as paredes geralmente apresentam uma grande espessura em alvenaria de pedra por serem autoportantes e conterem aberturas de vãos (adaptado de Freitas, 2012). Predomina a construção em xisto e granito, no entanto, também é comum encontrar calcário e arenito e, embora surja na continuidade das paredes de alvenaria de pedra, também se pode encontrar paredes de madeira resistente no tardoz da habitação e em paredes interiores, denominadas paredes de tabique, que são menos resistentes às 13 intempéries, mas que conferem boas condições de conforto. A madeira era também bastante utilizada no litoral do país por ser um material abundante e apresentar um bom comportamento face à humidade das bacias marítimas ou fluviais (Fernandes, 2020). Além disso, em todas as construções podia ser utilizada em pavimentos, coberturas, portas e janelas, sendo o castanho e o carvalho as mais aplicadas.

3 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo é um edifício onde atualmente funcionam os serviços de urbanismo da associação das Aldeias Históricas de Portugal, localizado na intramuralha de uma das 12 aldeias históricas de Portugal, a aldeia de Sortelha (figura 1). Trata-se de um edifício tradicional de dois pisos, de alvenaria em pedra granítica e sem qualquer tipo de isolamento, caixilharia simples de madeira. Numa prévia intervenção foi introduzida uma estrutura da cobertura em laje aligeirada de betão, revestida por telha canudo. A divisão entre os dois pisos é feita por uma estrutura metálica apoiada na pedra granítica, onde assenta um pavimento de madeira. O pavimento do piso térreo é em pedra granítica. Durante a intervenção efetuada, a zona sanitária do piso térreo foi rebocada interiormente, pavimentada por azulejo tijoleira e introduzida uma laje de betão armado no teto; no piso elevado foi ainda acrescentada uma parede de tijolo rebocada em ambos os lados. Devido aos potenciais problemas do radão existentes em toda a aldeia, a ventilação é uma das partes mais importantes neste tipo de edifícios, pelo que não existem dispositivos de entrada de ar nas fachadas, senda a ventilação feita através dos vãos envidraçados.

Figura 1 – Caso de estudo

4 RESULTADOS

4.1. MONITORIZAÇÃO

No interior do edifício (figura 2) foram instalados três sensores TESTO 174H, que determinam a temperatura e humidade do ar presentes; e um sensor TESTO 160 IAQ, que avalia além dos dois parâmetros referidos, a quantidade de dióxido de carbono (CO_2), pressão atmosférica e humidade absoluta. No exterior do edifício foi instalado um sensor TESTO 174H para comparação com os valores determinados interiormente. O levantamento ocorreu de forma periódica de 15 minutos e iniciou às 00h do dia 30 de novembro de 2022, terminando após 14 semanas, às 10h do dia 8 de março, correspondendo a um período mais fria e húmido.

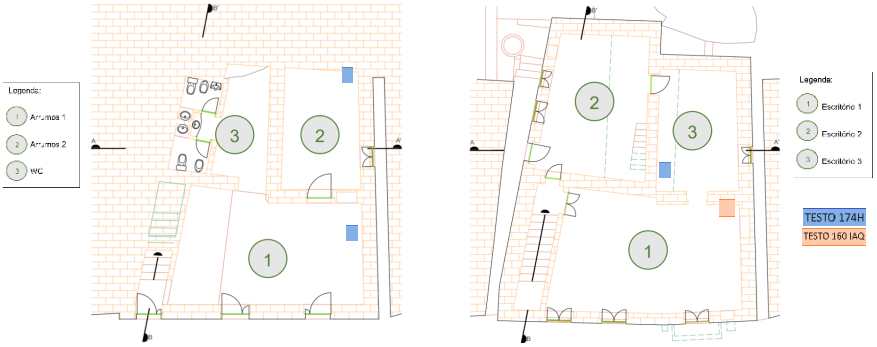


Figura 2 – Instalação de sensores

Analisando primeiramente os valores de concentração de CO_2 e da pressão atmosférica, apresenta-se a figura 3. A monitorização da concentração de CO_2 permite avaliar se existe uma boa ventilação do espaço interior, pois quanto maior a sua concentração, menos ventilado é o espaço. Este edifício apresenta valores de CO_2 entre os 390 e 590 ppm, sendo valores bastante aceitáveis de acordo com o valor máximo recomendado de 900 ppm. A pressão atmosférica é um parâmetro que varia com as mudanças climáticas e com a altitude, no entanto, a inadequada ventilação de um edifício pode afetar a qualidade interna do ar (QIA) e consequentemente, a sensação de conforto. Neste edifício, localizado em elevada altitude, apresentam-se valores entre os 900 e 945 mbar, que são valores inferiores ao valor recomendado de 1015 mbar e por isso, pode incitar a problemas respiratórios aos ocupantes.

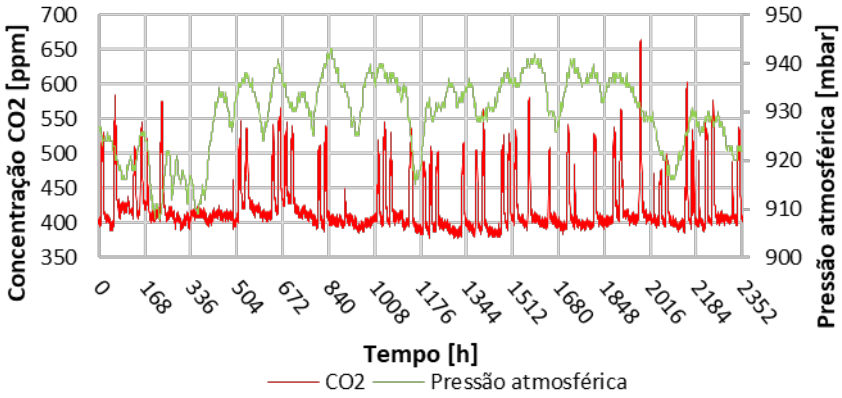


Figura 3 – Monitorização de CO_2 e pressão atmosférica

Passando a análise à temperatura interior do edifício, apresenta-se a figura 4, que apresenta a temperatura de quatro divisões, assim como a temperatura exterior. No escritório 1 observam-se grandes oscilações de temperatura, sendo a curva definida por picos de temperatura, variando entre os 7°C e os 22°C. A temperatura exterior evidencia períodos de temperatura mais alta e outros de temperatura mais baixa, variando entre os 2°C e os 12°C e geralmente é inferior à temperatura interior, excetuando três casos pontuais de subida repentina. As restantes divisões apresentam um comportamento semelhante entre si, no entanto, bastante distinto da temperatura do escritório 1 e da temperatura exterior.

Fazendo uma análise às curvas dos arrumos 2 (piso 0), arrumos 1 (piso 0) e escritório 3 (piso 1), denota-se uma maior proximidade entre os arrumos 2 e escritório 3, ambos apresentando maiores amplitudes de temperatura, enquanto nos arrumos 1 os valores são mais conservadores ao longo dos dias. Isto é, no mesmo piso, a variação de temperatura é maior em divisões do mesmo piso e semelhante em divisões de pisos diferentes. Recorde-se que a divisão dos pisos é feita por uma estrutura de metal revestida com pavimento de madeira, enquanto que as paredes estruturais de praticamente todo o edifício são em alvenaria de granito; além disso os arrumos dois apresentam apenas uma pequena janela em contacto com o exterior, enquanto que a divisão de arrumos 1 apresenta três portas e está diretamente ligada à divisão do WC, que apresenta teto com uma laje de betão armado e pavimento de azulejo tijoleira.

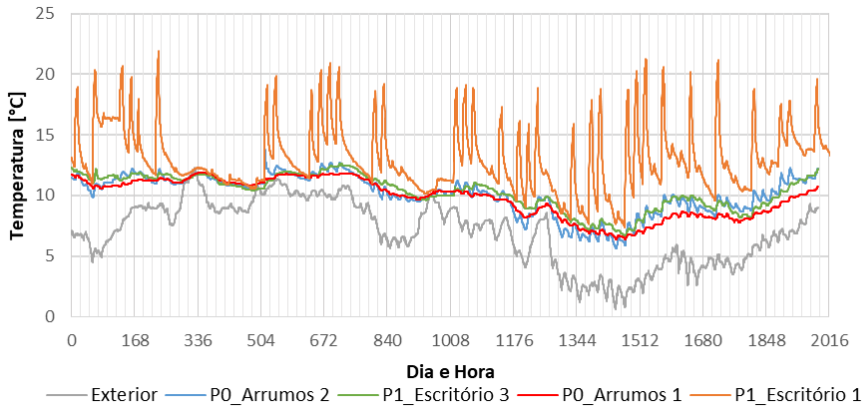


Figura 4 – Condições de temperatura interior

No escritório 1 é possível identificar uma relação de temperatura entre dias consecutivos, pois em dias consecutivos de aumento de temperatura, a temperatura mínima que a divisão atinge é sempre superior à do dia anterior, nunca chegando a atingir a temperatura inicial. A figura 5 representa o pormenor observado. Este pormenor revela que os materiais presentes na divisão, nomeadamente, as paredes estruturais de 50 cm de granito e soalho e teto em madeira, apresentam uma boa capacidade de retenção de energia, ou seja, apresentam boa inércia térmica.

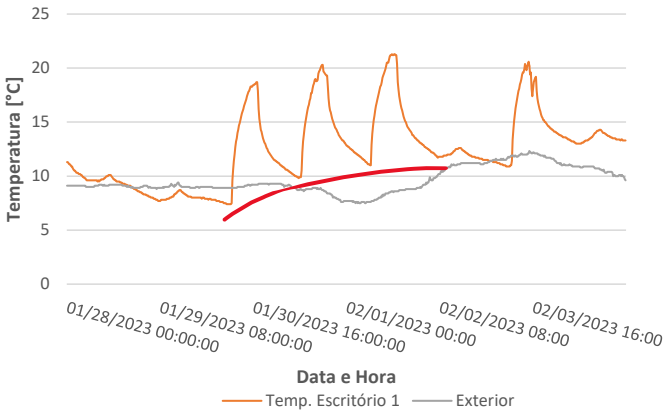


Figura 5 – Pormenor de monitorização de temperatura

De forma contrária, a figura 6 avalia quanto tempo após o aquecimento a divisão demora a atingir a temperatura inicial sem que a mesma divisão seja aquecida. Na figura 6 apresentam-se dois períodos de três dias consecutivos. No primeiro período apresentado, entre os dias 9,10 e 11 de dezembro de 2022, ocorreu um aquecimento da divisão entre as 8h e as 16h, variando entre os 11,7°C e os 21,9°C; após aproximadamente 2,5 dias, a temperatura da divisão volta a atingir a temperatura anterior ao aquecimento, de 11,8°C. No segundo período apresentado, entre os dias 6, 7 e 8 de fevereiro de 2023, ocorreu um aquecimento entre as 12h e as 15h, variando entre os 11,5°C e os 20,1°C; após 1,5 dias, a divisão volta a atingir a temperatura anterior ao aquecimento, de 11,4°C. Através desta análise, percebe-se que quanto mais elevada a temperatura após o aquecimento, maior o tempo de recuperação da temperatura inicial, ou seja, maior o período de arrefecimento. Este facto deve-se à boa inércia térmica do material das paredes, que permite a retenção do calor num maior período.

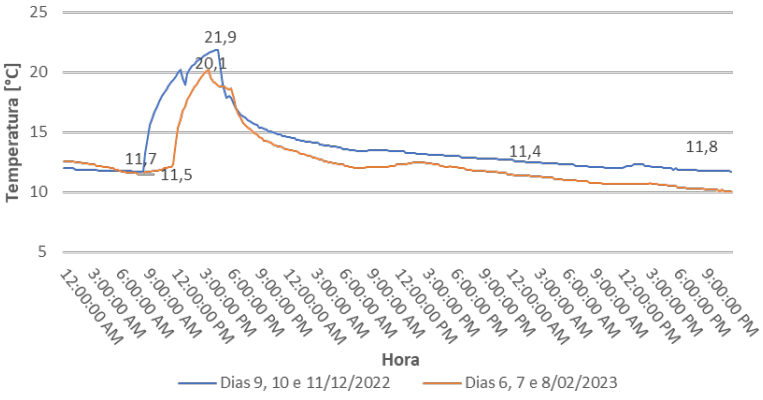


Figura 6 – Temperatura após aquecimento

De forma a completar a figura anterior, surge a figura 7, que apresenta igualmente as curvas de temperatura do escritório 1 num período de 34 horas (00h até às 10h do dia seguinte), em três dias

distintos: 9 de dezembro de 2022, 30 de janeiro de 2023 e 7 de março de 2023. Nos três dias o aquecimento dá-se de forma semelhante ao apresentado na figura anterior (figura 6), no entanto, pela análise das tangentes à curva, torna-se evidente que quanto maior é o ganho de energia enquanto a divisão é aquecida, mais rapidamente ocorre a queda da temperatura (maior declive), porém, a energia demora mais tempo a dissipar; quanto menor é o ganho de energia derivado do aquecimento, menor a queda de temperatura (menor declive), mas mais rapidamente se atinge a temperatura anterior ao aquecimento.

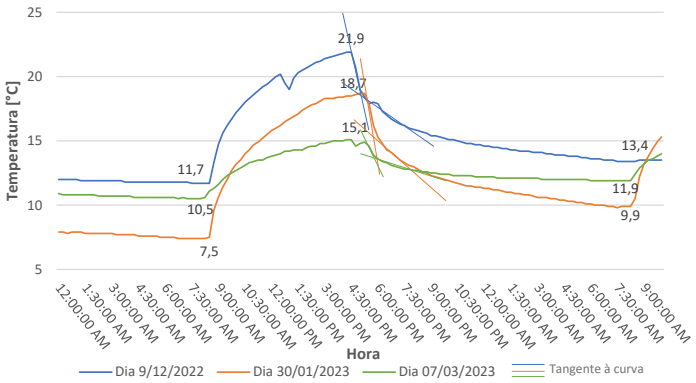


Figura 7 – Temperatura após aquecimento

A figura 8 corresponde à semana de 28 de janeiro a 4 de fevereiro de 2023 e nela identifica-se a relação de comportamento de duas divisões contíguas, o escritório 1 e o escritório 3. A curva de temperatura do escritório 1 demonstra uma regularidade de ocupação da divisão, apresentando grandes oscilações de temperatura, entre os 7°C e os 21°C; por outro lado, a curva referente ao escritório 3 apresenta um comportamento mais regular, variando apenas entre os 6°C e os 10°C. Percebe-se que ambas as divisões apresentam um comportamento distinto, no entanto, é possível notar pequenos aumentos de temperatura ao longo dos dias no escritório 3, devido a duas possíveis situações: uma primeira devido ao aquecimento do escritório 1; e uma segunda devido ao aumento da temperatura exterior, que é mais evidente a partir do dia 2 de fevereiro. Esta análise permite perceber a influência que uma divisão tem sobre outra quando são introduzidas alterações e, embora não seja evidenciado de forma imediata, a diferença é notável ao longo dos dias. Mais uma vez, esta situação pode ser justificada pela boa inércia térmica do granito, pois o granito apresenta uma elevada capacidade de absorção de calor, libertando-o gradualmente para o meio ambiente.

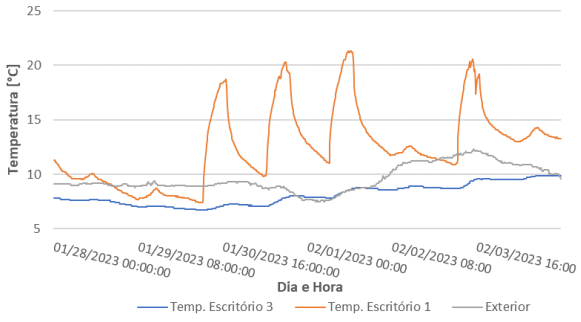


Figura 8 – Variação de temperatura interior vs temperatura exterior

Relativamente à humidade, o clima de Sortelha apresenta maioritariamente valores superiores a 90%. A figura 9 representa uma relação entre a temperatura e a humidade entre os dois pisos do edifício. Destaca-se nesta tabela as curvas do escritório 1 (piso 1), uma vez que são mais expressivas,

salientando-se picos opostos entre a temperatura e a humidade. Relativamente às restantes divisões do edifício, a divisão de arrumos 1 e escritório 3, regista-se uma grande proximidade nas curvas de temperatura; no entanto, embora as oscilações nas curvas de humidade apresentem um comportamento semelhante, a diferença entre as duas divisões é maior, chegando a diferenciar cerca de 20%. Percebe-se com isto, que o piso térreo apresenta geralmente valores de humidade inferiores aos do piso 1, excetuando casos pontuais em que o escritório 1 apresenta picos de baixa humidade, que coincidem com o aumento instantâneo da temperatura da divisão, que, tal como sugerido anteriormente, indica que a humidade e a temperatura têm um comportamento inversamente proporcional. Esta diferença de humidade entre pisos pode ser justificada pelo nível de isolamento do edifício, uma vez que o piso 1 está mais exposto ao exterior, enquanto que o piso 0 está parcialmente enterrado.

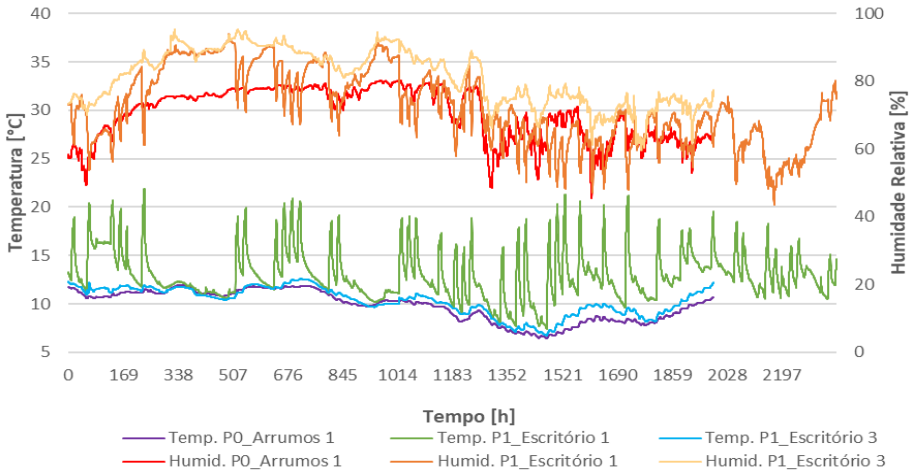


Figura 9 – Variação de temperatura e humidade

4.2. SIMULAÇÃO DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

No software Design Builder com simulador Energy Plus foi ensaiado um modelo do edifício em estudo para posteriormente ser feita uma análise do seu comportamento higrotérmico quando são introduzidas ações de intervenção (figura 10).

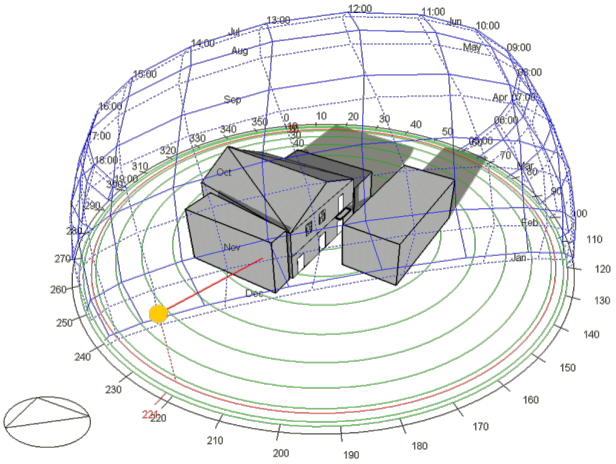


Figura 10 – Modelo em Design Builder

Após a modelação do edifício e antes de se iniciar a análise de comportamento do edifício, é importante proceder à calibração do modelo, de modo a perceber se o modelo desenvolvido é compatível com o edifício em análise. A compatibilização é conseguida seguindo dois passos: primeiramente considerando um edifício desocupado, utilizando os resultados obtidos durante o período de monitorização do sensor TESTO 174H, sem qualquer tipo de equipamentos ou ocupação humana; e por último, considerando um edifício ocupado, considerando um calendário de ocupação e todos os equipamentos existentes no edifício em estudo. O primeiro passo passa por identificar a taxa de infiltração de ar através da modificação dos valores da taxa constante de estanquidade ao ar (taxa constante) até que fosse atingida uma proximidade de comportamento na temperatura interior entre o valores obtidos pela monitorização e pelo modelo; no caso em estudo, foi considerada uma taxa constante de estanquidade ao ar de 3 renovações por hora, que de acordo com Górzeński et al., (2014) é um valor razoável para edifícios antigos recentemente reabilitados). O segundo passo passa por alterar os parâmetros de aquecimento e o tipo de utilização do edifício até que seja atingido um equilíbrio entre a curva resultante da monitorização e da curva obtida pelo modelo (figura 11).

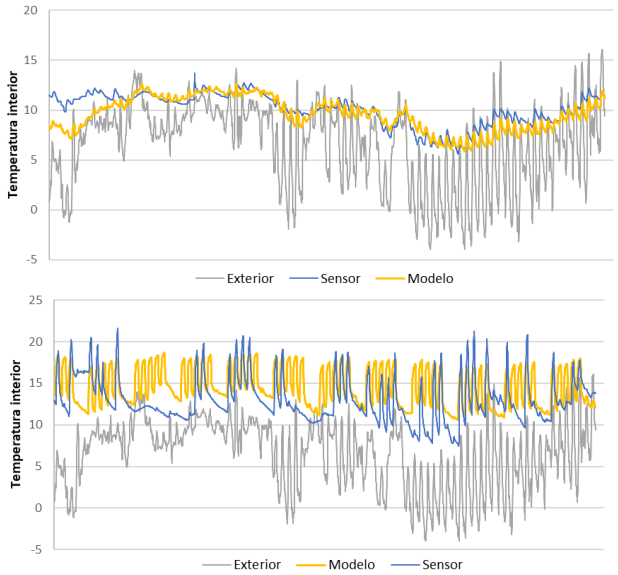


Figura 11 – Ajuste de modelo

Passando ao estudo comportamental do edifício, este baseia-se em duas técnicas de reabilitação: a introdução de uma argamassa de revestimento nas paredes de alvenaria e a intervenção nas caixilharias existentes, pelo que são analisados quatro cenários:

Cenário de referência: situação atual do edifício

Cenário A: simulação do edifício sem qualquer intervenção

Cenário B: simulação do edifício com materiais de revestimento

Cenário de referência

Representa o edifício como ele se encontra na atualidade, ou seja, considera paredes de alvenaria sem qualquer tipo de revestimento, cobertura em laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e caixilharia simples de madeira, com 3 renovações de ar por hora e condutividade da madeira de 0,18 W/mK (Urquart et al., 2007).

Cenário A

Simula o edifício antes da intervenção a que foi sujeito. Consideram-se as paredes sem qualquer tipo de revestimento, uma cobertura com estrutura de madeira e telha cerâmica e caixilharia simples de madeira, com 5 renovações de ar por hora e condutividade da madeira de 0,18 W/mK.

Cenário B

O cenário B é dividido em duas partes, considerando dois tipos diferentes de argamassas, adequadas para aplicação sobre alvenaria de granito, a argamassa tipo 1 e a argamassa tipo 2, ambas definidas de acordo com características técnicas de argamassas existentes no mercado. Ambas são argamassas à base de cal hidráulica natural, de forma a garantir a compatibilidade com a pedra granítica. A argamassa 1 é composta essencialmente por aglomerado de cortiça, enquanto que a argamassa 2 contém diferentes materiais granulares. Ambas as argamassas apresentam uma boa qualidade quando comparadas com outras argamassas existentes no mercado, no entanto, é possível identificar diferenças substanciais, como se verifica no quadro 1.

Quadro 1 – Características das argamassas

Características	**Argamassa 1**	**Argamassa 2**
Condutividade térmica (W/mK)	0,045	0,62
Calor específico (J/kgK)	1000	1700
Densidade (kg/m3)	360 +/- 20	1750

Para a argamassa 1 foram considerados três sub-cenários: revestimento exterior (cenário B1), revestimento exterior e interior (cenário B2) e revestimento interior (cenário B3). Para a argamassa 2 foi considerada uma simulação com revestimento exterior (cenário B4).

4.3. ESTUDO COMPARATIVOS DAS SOLUÇÕES CONSIDERADAS

Cenário de referência vs. Cenário A (figura 12)

A temperatura interior é ligeiramente superior no cenário de referência, variando entre 0,5°C e 1°C, pelo que se pode considerar que o cenário de referência é o cenário mais favorável ao conforto. No entanto, o cenário de referência é composto por uma cobertura em laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas, enquanto o cenário A representa uma estrutura tradicional de madeira.

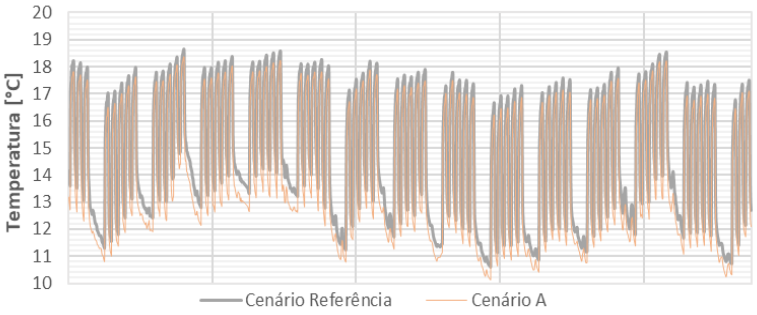


Figura 12 – Cenário A vs cenário de referência

Cenário de referência vs. Cenário B (figuras 13 e 14)

As figuras 13 e 14 apresentam o comportamento do edifício quando é introduzido revestimento pelo exterior (B1 e B4), pelo interior e exterior (B2) e apenas pelo interior (B3). Avaliando a figura 12 percebe-se que a argamassa 1 (B1) permite atingir temperaturas interiores superiores, com diferença de 0,3°C e 1,4°C. Por outro lado, a figura 14 avalia a argamassa 1, considerando a localização do revestimento. Observa-se que o cenário B2 apresenta maiores valores de temperatura, seguido imediatamente do cenário B3 com diferença média de 0,3°C e, posteriormente, do cenário B1 com uma diferença média de 0,7°C para o cenário B2. Percebe-se que a solução de revestimento pelo exterior é a menos eficaz a nível de temperatura e que a mais eficaz é a solução de revestimento em ambos os lados, no entanto, o revestimento pelo interior encontra-se muito próximo deste último.

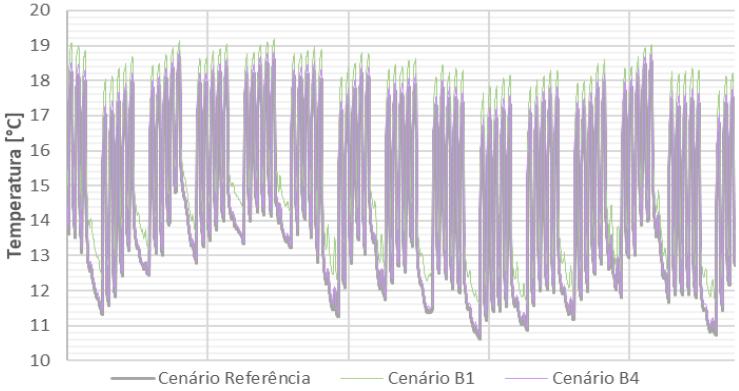


Figura 13 – Cenários B1 e B4

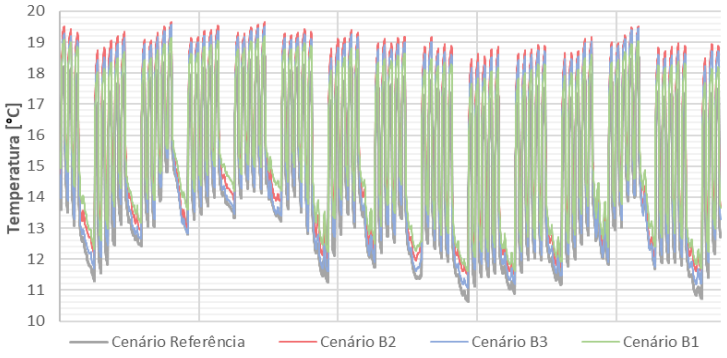


Figura 14 – Cenários B1 a B3

5 CONCLUSÕES

Este trabalho pretende estabelecer uma relação entre os termos sustentabilidade, cultura e conforto, olhando para um caso de estudo concreto. Visa reconhecer a importância dos espaços rurais tradicionais, para que se classifique novamente estes espaços como lugares de confiança, de grande qualidade e segurança e assim se reinicie o realojamento da população.

No que diz respeito ao desempenho térmico-higrométrico avaliado durante a fase de monitorização, verifica-se que os valores mínimos de temperatura e humidade relativa no interior são quase sempre superiores aos registados no exterior, no entanto, pode-se entender que os edificados não apresentam por si só uma inércia térmica suficiente para estabilizar a variação da temperatura e conferir o conforto necessário. Desta forma, o Design Builder permitiu simular diferentes cenários de comportamento do caso de estudo, quando introduzidas duas diferentes soluções de revestimento.

O cenário A representa um edifício tradicional com estrutura em pedra granítica e cobertura em madeira com revestimento a telha cerâmica. A temperatura interior é inferior ao cenário de referência, que carrega uma cobertura em laje aligeirada de betão, com uma diferença média de 0,6°C. Em contrapartida, foi introduzida uma técnica moderna num edifício tradicional.

O cenário B1 representa um edifício tradicional com estrutura em pedra granítica revestida exteriormente por uma argamassa à base de cortiça e cal. Esta solução permite aumentar a temperatura interior em média 0,7ºC.

O cenário B2 representa um edifício tradicional com estrutura em pedra granítica revestida exteriormente e interiormente pela mesma argamassa à base de cortiça e cal. Esta solução permite aumentar a temperatura interior em média 1,5ºC.

O cenário B3 representa um edifício tradicional com estrutura em pedra granítica revestida interiormente pela mesma argamassa à base de cortiça e cal. Esta solução permite aumentar a temperatura interior em média 0,9ºC.

O cenário B4 representa um edifício tradicional com estrutura em pedra granítica revestida exteriormente por uma argamassa à base de cal, sem cortiça. Esta solução permite aumentar a temperatura interior do edifício atual em média 0,2ºC.

Os resultados deste estudo revelam que as soluções tradicionais nem sempre são as mais eco eficientes, uma vez que requerem maior consumo energético e a sua manutenção exige maior dispêndio económico. No entanto, a utilização de materiais naturais locais deve ser contemplada para reduzir o custo da construção, promover a economia local e permitir às aldeias manter a sua identidade. O conforto térmico está diretamente relacionado com a compatibilidade entre os materiais e técnicas utilizadas, varia de acordo com a inércia térmica, isolamento e ventilação que estes materiais conferem quando atuam em conjunto, e também de fatores humanos como os hábitos diários de cada um.

Este trabalho não pretende alcançar uma solução ótima de reabilitação para todos os edificados, pretende apenas dar a conhecer a previsão de comportamento de um edifício quando sujeito a determinada intervenção, de modo a facilitar a escolha da intervenção e a prevenir uma escolha que provoque a descaracterização do edificado e consequentemente, do património. Desta forma, cabe ao

interveniente neste tipo de ações ter a sensibilidade de perceber qual o melhor tipo de intervenção a fazer.

REFERÊNCIAS

Barati, K., Shen, X. (2016). Operational level emissions modelling of on-road construction equipment through field data analysis. Automation in Construction, 72(3):338-346. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.010

Benitez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J.E., Huerta-Guevara, O.F., García-León, A.M., Rueda-Avellaneda, J.F. (2021) Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context. Journal of the Air & Waste Management Association, 71(11):1415-1427. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040

Górzeński, R., Szymański, M., Górka, A., & Mróz, T. (2014). Airtightness of buildings in Poland. International Journal of Ventilation, 12(4), 391–400. https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684032

Historic England. (2016). Energy Efficiency and Historic Buildings. Secondary Glazing for Windows.

Silva, A., Dias, J.L., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013a). Statistical models applied to service life prediction of rendered façades. Automation in Construction, 30:151–160. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.028

Silva, A., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013b). Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding directly adhered to the substrate. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2):227–235. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000588

Silva, A., Neves, R., De Brito, J. (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 50:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

Urquart, D., Anderson, M., Brown, S., Cram, I., Cunliffe, J., Gough, I., Leet, L., MacPherson, S., Montgomery, S., & Watson, M. (2007). Conversion of traditional buildings : application of the Scottish Building Standards. Historic Scotland.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

UTILIZAÇÃO DE PÓ DE VIDRO PARA O DESENVOLVIMENTO DE BETÕES SUSTENTÁVEIS COM REDUZIDA UTILIZAÇÃO DE CIMENTO

Othon Moreira[a]; Aires Camões[b]; Raphaele Malheiro[b]

[a]Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, othonmoreira@gmail.com

[b]CTAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, aires@civil.uminho.pt, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

RESUMO

A utilização de resíduos como materiais cimentícios suplementares (SCMs) na produção de betão tem sido uma prática comum, que vai ao encontro da promoção da sustentabilidade, sem perdas significativas no que se refere à resistência mecânica e durabilidade. Neste contexto, o resíduo de vidro tem sido uma alternativa cada vez mais estudada e, em alguns países, já utilizada como substituto parcial do cimento, em pequenas proporções. No entanto, a redução do consumo de cimento através da sua substituição por pó de vidro em proporções elevadas é ainda pouco explorada e requer mais investigação. Com o objetivo de contribuir para colmatar esta lacuna no conhecimento, realizou-se uma investigação experimental com foco nas propriedades mecânicas e durabilidade do betão com a substituição do cimento por pó de vidro (PV) em elevadas proporções (50%). Foram utilizados dois teores de ligante (cimento mais PV), 300 e 500 kg/m^3, e pó de vidro com D50 igual a 26 µm. Os resultados são promissores quanto ao uso de elevadas proporções de PV em betões. No que se refere às características mecânicas, os betões com 500 kg/m^3 de ligante (50% do qual PV - PV250) atingiram quase 55 MPa aos 28 dias. O provete com a resistência mais baixa (PV150) atingiu 32 MPa no mesmo período. Este resultado pode estar relacionado com o elevado índice de atividade pozolânica do PV utilizado. No que se refere aos indicadores de durabilidade, relativamente à porosidade aberta, os betões com 50% de PV apresentam uma porosidade inferior à dos betões de referência (0% de PV). A menor redução (21%) ocorreu no betão com 300 kg/m^3 de ligante (50% do qual PV - PV150). A redução da porosidade proporcionada pela finura do PV pode ser a principal causa deste elevado desempenho. No que diz respeito à absorção capilar, os betões PV apresentam uma redução que varia entre 47% para o PV150 e 67% para o PV250. Este facto pode estar relacionado com a existência de uma maior quantidade de poros capilares de maiores dimensões nos betões de referência. Em termos de difusão de cloretos também foram obtidos melhores resultados dos betões PV, tendo sido registado até 91% de redução no coeficiente, como no caso do PV250 aos 90 dias. Estes resultados apontam para uma redução do consumo de cimento sustentada, através da utilização do resíduo de vidro transformado em pó, contribuindo para construção de um caminho mais sustentável na indústria do betão.

PALAVRAS-CHAVE

Betão, Pó de vidro, Sustentabilidade, Durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O betão é o material manufaturado mais consumido no planeta. Atualmente, são consumidos cerca de 14 bilhões de metros cúbicos, com estimativa de crescimento entre 12% e 23% neste consumo até 2050 (GCCA 2022). A produção de cimento, o principal aglutinante no betão, é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO_2 (IEA 2022). Aliando-se o alto consumo com as significativas emissões, é fácil perceber os motivos que o tornaram um alvo prioritário para ações de redução de emissões globais de CO_2. Portanto, é essencial desenvolver novas maneiras de produzir betão de forma mais sustentável. Tem havido um investimento significativo na comunidade científica na busca por materiais alternativos para substituir parcialmente o cimento na produção de betão (Rodier *et al.*2018; Esmaeli e*t al*. 2021; Moreira *et al*. 2023). Entre as alternativas estudadas, muitas são provenientes da utilização de resíduos industriais ou agrícolas. A recuperação desses resíduos contribui não apenas para uma produção de betão mais sustentável, mas também promove a economia circular, reduzindo os impactos nos aterros sanitários.

O vidro é um resíduo muito promissor nesse sentido. A produção mundial cresceu devido à industrialização e à substituição crescente de embalagens plásticas por vidro, o que gerou um total de resíduos de vidro na UE, em 2020, de 17.830.000 toneladas. Destes, em torno de 50% são reciclados. Em Portugal, no ano de 2021 foram contabilizadas 410.243 toneladas de resíduos oriundos de embalagens de vidro, sendo que 205.157 toneladas foram encaminhadas a reciclagem (Eurostat 2022). O uso de PV derivado de recipientes de vidro, incorporado ao betão como um substituto parcial do cimento, tem mostrado um potencial promissor (Tagnit *et al*. 2018; Moreira *et al*. 2024). É um produto abundante e barato, além de fácil de transformar em matéria-prima. Estudos mostram que quando o vidro é usado como um pó finamente moído, as partículas de vidro fino se comportam como um material pozolânico (Malheiro *et al*. 2022), reagindo com os hidratos de cimento para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário, aumentando a resistência e a durabilidade do betão a longo prazo. Portanto, o tamanho das partículas de vidro é um fator chave em sua utilização como substituto do cimento. Partículas maiores que 75 µm são potencialmente desfavoráveis às reações pozolânicas além de suscitarem preocupações quanto à durabilidade do betão, devido a maior probabilidade de ocorrência da reação danosa alcalis-sílica (Zheng 2016; Aliabdo *et al*. 2016).

Ao avaliar o desempenho do betão com PV em termos de resistência mecânica, alguns autores obtiveram uma redução e outros um aumento na resistência (Guo *et al*. 2020). No entanto, entender as condições sob as quais esses resultados ocorreram é talvez a parte mais importante da análise. Além disso, uma diminuição na resistência nem sempre significa que o betão não possa ser usado. Pode não ser indicado para um propósito específico, mas pode ser benéfico para outro. Ajustar as dosagens do betão às suas demandas pode ser um dos pontos fundamentais na obtenção de um betão sustentável.

Existe uma tendência para o uso de PV em misturas de betão na faixa de 10% a 30% de substituição, pois os benefícios têm se mostrado melhores nessa faixa. No entanto, não há tanta informação disponível para taxas de incorporação mais altas, especialmente quando se utiliza redutores de água na mistura. Muitos estudos têm se concentrado em encontrar a dosagem ideal que maximize o comportamento mecânico da incorporação do pó de vidro. No entanto, a maior parte do consumo mundial não exige grandes resistências do betão. Em 2019, 86% do betão consumido na Europa era da classe C30/C37 ou inferior (ERCMO 2022). Portanto, um betão que atinja uma resistência média de cerca de 35 MPa a 40 MPa em corpos de prova cúbicos padrão pode ser viável para a maioria das aplicações comuns.

Com esse objetivo, uma campanha de pesquisa experimental foi realizada com o objetivo de desenvolver um betão sustentável de alto desempenho, reduzindo a porcentagem de cimento em sua composição (50%). Espera-se que a introdução do PV leve a uma redução nos requisitos de água da mistura e a um fortalecimento das ligações químicas entre os compostos, melhorando o desempenho geral.

2. MATERIAIS

Foram produzidos provetes de betão utilizando agregado fino e grosso, cimento, PV, água e superplastificante. Como agregado fino utilizou-se areia siliciosa natural rolada (0/4), com um diâmetro máximo de 4 mm, módulo de finura de 2,10 e uma densidade de 2620 kg/m^3. O agregado grosso utilizado foi a brita granítica (4/10) com um diâmetro máximo de 16 mm, módulo de finura de 8,08 e uma densidade de 2197 kg/m^3. Foi utilizado cimento com 95% de clínquer (CEM I 42.5R). O superplastificante utilizado foi o Masters Builders Solutions, MasterGlenium Sky 617, com uma densidade relativa de 1041 g/cm^3 e um teor de sólidos de 20%. O PV foi obtido a partir de vidros reciclados.

O vidro foi coletado na cidade de Guimarães, Portugal, e submetido a um processo de limpeza e descontaminação. Em seguida, foi moído em condições de laboratório, até atingirem um diâmetro semelhante ao do cimento, a fim de evitar a reação álcali-sílica (ASR), uma vez que investigações anteriores indicam que a ASR não ocorre quando o tamanho das partículas de pó de vidro é inferior a 75 µm. A Figura 1 resume o processo.

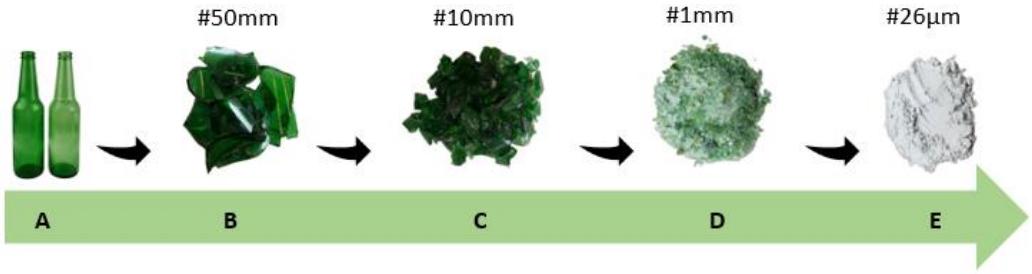


Figura 1. Sumário do processo de obtenção do PV.

A. Vidro de embalagens: Limpeza e descontaminação (retirada de rótulos e sujidade);
B. Produção de fragmentos de vidro: As garrafas foram quebradas manualmente;
C. Moagem primária: Os fragmentos foram introduzidos em um britador de mandíbula, passando por dois ciclos, com duração de aproximadamente 5 minutos;
D. Moagem intermediária: Os grãos obtidos foram inseridos em um moinho de martelos, passando novamente por dois ciclos no equipamento, com duração de aproximadamente 5 minutos;
E. Moagem final: O material foi introduzido, em porções de 5 kg, em um moinho de bolas metálicas ou "moinho de Los Angeles", onde permaneceu por 40 ciclos de 15 minutos cada, totalizando 10 horas de moagem (33 rpm), com uma massa abrasiva de 8,410 kg.

Os ligantes utilizados foram caracterizados fisicamente conforme Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física dos ligantes.

	Blaine	Densidade	Diâmetros característicos (µm)		
	Se (m²/kg)	*ρ* (kg/m³)	D_{10}	D_{50}	D_{90}
CEM I 42,5R	599	3142	4.68	21.90	54.60
PV	493	2604	4.57	26.00	106.00

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica dos ligantes e agregados utilizados.

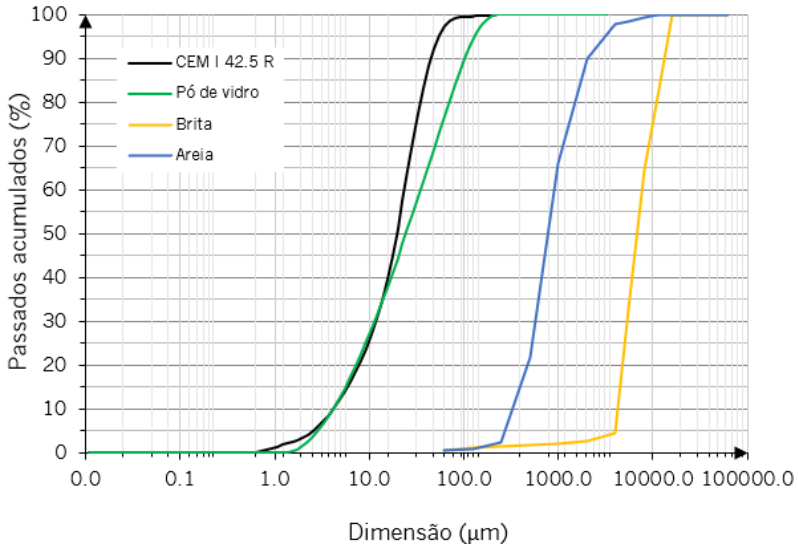


Figura 2. Curva de granulometria dos materiais.

As composições químicas do cimento e PV, foram obtidas por meio de fluorescência de raios X (Hitachi - EA1000VX), e são mostradas na Tabela 2. É possível observar que o vidro do tipo sódio-cálcio usado tem uma predominância de sílica (69,2%), óxido de sódio (13,4%) e óxido de cálcio (11,8%).

Tabela 2. Caracterização química dos ligantes.

Material	**CEM I 42,5 R**	**PV**
CaO	62.77	11.80
Fe_2O_3	3.06	1.30
SiO_2	20.25	69.20
Al_2O_3	4.43	2.30
MnO	-	0.10
MgO	2.01	1.00
SO_3	3.11	-
TiO_2	-	
K_2O	0.76	0.90
Na_2O	0.25	13.40
LOI	2.74	-
RI	1.23	-

Os resultados obtidos na análise físico e química do PV indicam que o mesmo cumpre os requisitos da norma ASTM C1866 2020.

3. COMPOSIÇÕES E MÉTODOS

Foram produzidos provetes de betão conforme as composições constantes na Tabela 3. Os ensaios foram executados conforme os procedimentos indicados, nas idades sugeridas, conforme Tabela 4.

A mistura de referência "CP300" foi preparada sem adições, com um teor de ligante de 300 kg/m^3. Foi estabelecida para representar um betão comum, com uma resistência de cerca de 35 Mpa (classe C30/37). O objetivo era ter como referência um betão que representasse a maior parcela do consumo cotidiano. As misturas PV foram produzidas com uma substituição parcial de 50% do volume de cimento por pó de vidro, em uma tentativa de maximizar a redução no consumo de cimento. Portanto, na mistura PV150, temos 124,26 kg de PV ocupando o mesmo volume que 150 kg de cimento e na mistura PV250 temos 207,23 kg de PV ocupando o mesmo volume que 250 kg de cimento.

Tabela 3. Composições dos betões (kg/m^3).

Mistura	Ligante	CP	% *	PV	Areia	Brita	SP	Água	Razão A/L
CP300	300	300.00	0%	0.00	511.06	1087.66	0.00	206.38	0.65
PV150	274.26	150.00	50%	124.26	580.21	1158.51	5.53	145.32	0.50
PV250	457.23	250.00	50%	207.23	371.70	1125.11	9.15	162.77	0.35

* % substituição de cimento por PV.

Tabela 4. Sumário de ensaios.

Ensaio	Normativo	Geometria (mm)	Unid. por Idade	Idade (dias)
Resistência à compressão	EN 12390-3 2009	Cubo 100 × 100 × 100	3	7,14,28,90
Absorção por imersão	LNEC E394 1993	Cubo 100 × 100 × 100	3	28,90
Capilaridade	LNEC E393 1993	Cubo 100 × 100 × 100	3	28,90
Migração de cloretos	LNEC E463 2004	Cilindro H200 × D100	2	28,90

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi executado de acordo com o *setup* mostrado na Figura 3. O desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo é apresentado na Figura 4. Os resultados mostrados correspondem à média de três amostras e o seu desvio padrão.

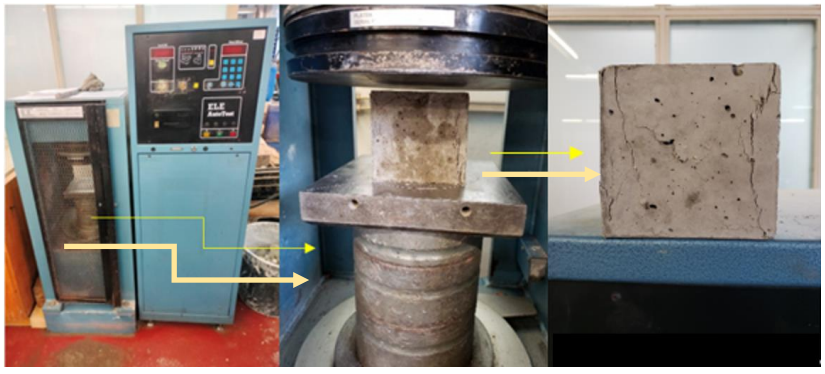
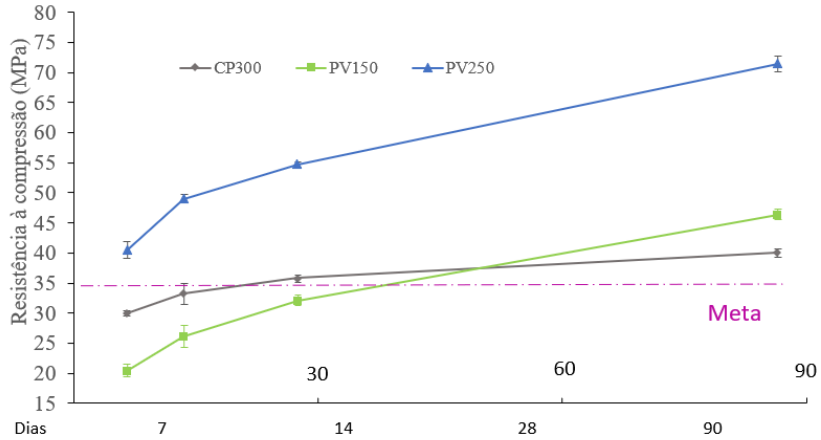


Figura 3. *Setup* ensaio de resistência à compressão.



Dias	7	14	28	90
CP300	29.99	33.20	35.80	40.00
PV150	20.47	26.15	32.09	46.42
PV250	40.50	49.01	54.74	71.50

Figura 4. Desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo.

A Figura 4 mostra claramente um aumento nos valores de resistência à compressão com a progressão do período de cura. Este aumento é mais pronunciado para o betão com 50% de PV em comparação com o betão de referência (CP300) durante o período estudado, especialmente após os primeiros 28 dias. A principal causa está associada ao desenvolvimento de reações pozolânicas que são características de betões contendo SCM. Entre 7 e 28 dias, há um aumento na resistência à compressão de apenas 5,81 MPa (19,37%) para o betão de referência (CP300), enquanto o aumento nos betões com 50% de PV é de 11,62 MPa (56,76%) no PV150 e 14,24 MPa (35,16%) no PV250. Entre os 7 e 90 dias essas diferenças são de 10,01 MPa (33,4%) para CP300, 25,95 MPa (126,8%) para PV 150 e 31,00 MPa (76,54%) para o PV250. Isso ocorre principalmente porque as reações pozolânicas ocorrem mais tarde do que as reações de hidratação e são mais prolongadas em betões com a adição de pó de vidro.

Com uma dosagem de cimento muito baixa de apenas 150 kg/m^3, foi possível alcançar 32,09 MPa em 28 dias e 46,42 MPa em 90 dias. Essas resistências tornam esses betões adequados para uso na maioria dos projetos de construção atuais. Esses valores são semelhantes aos obtidos por outros autores. Du *et al*. (2017) fizeram betão com PV como substituto de cimento em 60% de peso e obtiveram betão com quase 40 MPa após 28 dias, com apenas 152 kg/m^3 de cimento. Deep Paul *et al*. (2022) obtiveram 48,15 MPa de resistência à compressão em 28 dias, para betão com 40% de substituição e uma dosagem de 221,28 kg/m^3 de cimento. Segundo os autores, esses resultados podem ser atribuídos à formação adicional de C-S-H a partir da reação pozolânica do PV. O gel de C-S-H fortalece a interface na zona de transição.

À medida que se elevou a dosagem de ligante, foi possível obter resistências mais expressivas, contudo é importante ter em mente que nem sempre será necessário adotar esta estratégia. Conforme dito na introdução do trabalho, o maior benefício de ajustar a dosagem à demanda está no fato de que o uso de menor teor de cimento já é suficiente para suprir as necessidades e quanto menor a utilização de CP, maior será o benefício ambiental. O uso racional de CP permite obter um betão mais sustentável, sem comprometer seu desempenho.

4.2 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

O ensaio de absorção de água por imersão (porosidade aberta) foi executado de acordo com o *setup* mostrado na Figura 5. Os resultados de absorção de água por imersão dos betões estudados (Tabela 3) são mostrados na Tabela 5. Os resultados correspondem aos valores médios dos três corpos de prova estudados.

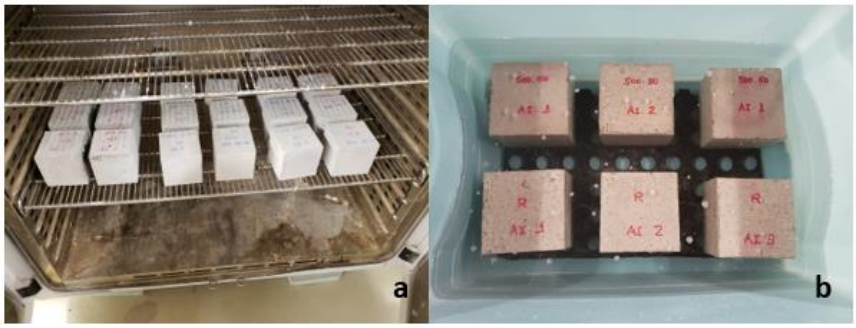


Figura 5. *Setup* ensaio de absorção por imersão (a) secagem, (b) recipiente com água.

Tabela 5. Porosidade dos betões aos 28 e 90 dias.

	28 Dias		90 Dias	
	Abs. Imersão (%)	DP*	Abs. Imersão (%)	DP*
CP300	15.39	0.19	16.02	0.51
PV150	12.16	0.11	10.88	0.49
PV250	9.00	0.41	9.67	0.55

*DP – Desvio padrão

Observando a Tabela 5, os betões com substituição de 50% de cimento por PV apresentam melhor desempenho em termos de absorção de água por imersão em comparação com o betão de referência (CP300), em qualquer idade. Foi observada uma redução na absorção de água de aproximadamente 21% aos 28 dias e 32% aos 90 dias para o PV150, e 42% aos 28 dias e 40% aos 90 dias para o PV250. Os resultados obtidos são consistentes com os encontrados por Deep Paul *et al*. (2022), indicando que a percentagem de absorção de água diminui com o aumento do teor de pó de vidro. A redução percentual na absorção de água foi de 15% para betão com incorporação de pó de vidro de 40%.

Como o teste de absorção de água por imersão é um indicador da porosidade aberta do betão, pode-se dizer que os betões PV150 e PV250 têm menor porosidade do que os betões de referência. A diminuição da porosidade com o aumento do teor de PV é devido à microestrutura porosa densa dos betões PV fornecida pela reação pozolânica.

4.3 ABSORÇÃO CAPILAR

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado de acordo com o *setup* mostrado na Figura 6. A cinética de absorção capilar é apresentada na Figura 7, que mostra a capilaridade dos espécimes aos 90 dias de cura.

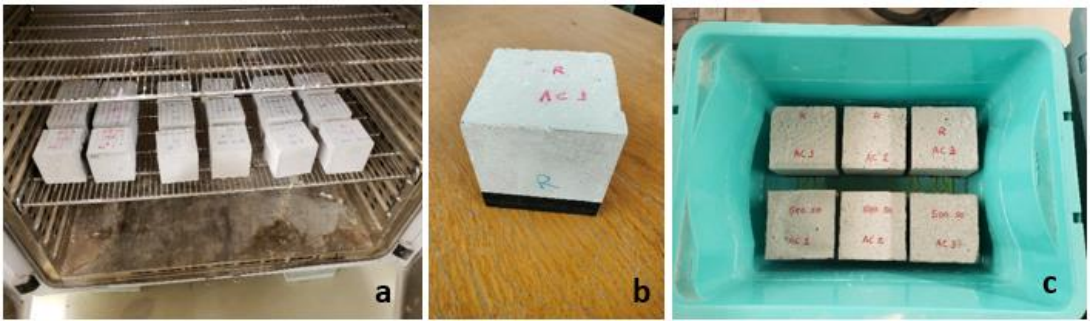


Figura 6. *Setup* ensaio de absorção por capilaridade (a) secagem, (b) preparação e (c) recipiente com água.

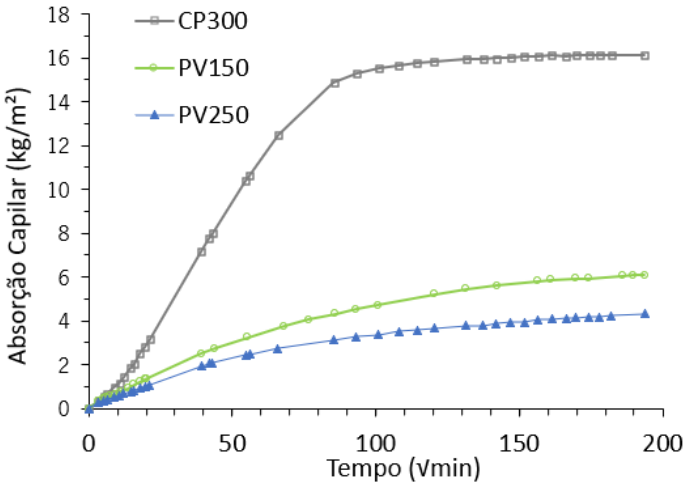


Figura 7. Absorção capilar dos betões após 90 dias de cura.

Conforme esperado para esse tipo de teste, o comportamento observado na Figura 7 reflete uma absorção capilar mais significativa na fase inicial, com uma curva mais íngreme. Durante essa fase, a água penetra através dos poros acessíveis com dimensões maiores. Após a fase inicial, a um ritmo mais lento, eventualmente atinge um patamar de estabilização que representa o preenchimento da rede capilar.

O betão de referência (CP300) apresenta uma curva com uma inclinação significativamente maior em comparação com as curvas dos betões com PV. Esse fato pode estar relacionado à existência de uma quantidade maior de poros capilares de tamanho maior no betão de referência. Os coeficientes de absorção capilar calculados para as primeiras 4 horas de teste, 0,130 $kg/m^2 \times min^{0.5}$ para o CP300, 0,063 $kg/m^2 \times min^{0.5}$ para o PV150 e 0,049 $kg/m^2 \times min^{0.5}$ para o PV250, mostram uma redução acentuada de 52% e 62% respectivamente para os espécimes com PV quando comparados ao de referência.

A análise combinada dos resultados obtidos a partir dos testes de absorção de água por imersão (Tabela 5) e absorção capilar de água (Figura 7) nos permite delinear um perfil macroestrutural do comportamento da rede porosa nos betões estudados. Em geral, o betão de referência apresenta uma porosidade aberta (poros interconectados) mais alta em comparação com os betões com 50% de PV. No entanto, a diferença mais significativa parece estar na distribuição de poros. Observando os perfis de absorção na Figura 7, pode-se notar um comportamento distinto entre o betão de referência e os

betões com 50% de PV. A quantidade de poros de maior tamanho acessíveis é significativamente maior no betão de referência em comparação com os betões com PV. Isso resulta em uma diferença notável na taxa de absorção capilar.

4.4 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

O ensaio de migração dos cloretos foi executado de acordo com o *setup* mostrado na Figura 8. A Figura 9 mostra os resultados do coeficiente de difusão por migração de cloretos dos betões estudados. Os resultados correspondem ao valor médio dos três espécimes testados.

Figura 8. *Setup* ensaio de migração dos cloretos (a) vácuo, (b) execução e (c) medição.

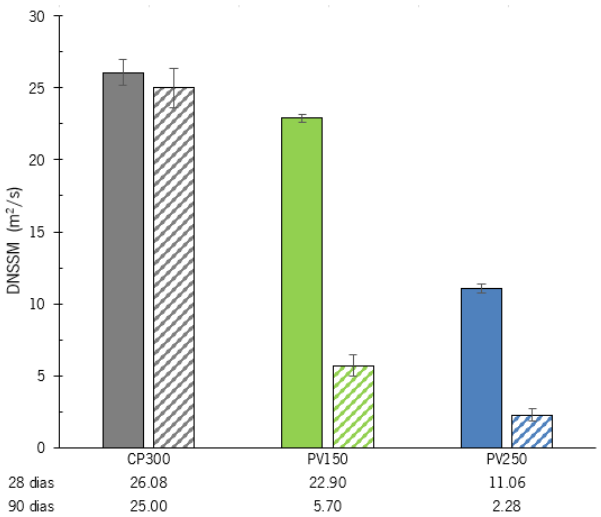


Figura 9. Migração de cloretos nos betões após 28 e 90 dias de cura.

De acordo com a Figura 9, a influência do uso de PV no coeficiente de migração de cloretos é evidente. Há uma clara tendência de redução no coeficiente de migração de cloretos para os betões com 50% de PV. Para o PV150 a redução no coeficiente de migração é ligeira (12%) aos 28 dias, mas muito pronunciada (77%) aos 90 dias. Já para o PV250 as reduções são mais pronunciadas, 58% aos 28 dias e 91% aos 90 dias.

Esses resultados corroboram pesquisas anteriores (Deep Paul *et al*. 2022; Sujjavanich *et al*. 2005; Du *et al*. 2015). Para uma taxa de substituição de cimento de 40% por pó de vidro, o betão modificado de Deep Paul *et al*. (2022) obteve uma redução de 37,5% aos 28 dias. Du *et al*. (2015) alcançaram uma redução de 90% para betão com 60% de PV como substituto de cimento em comparação com a referência.

A resistência à penetração de íões cloreto para o betão com PV foi fornecida pelo efeito de preenchimento devido aos PVs de tamanho micron e, portanto, otimização do empacotamento granular, e pela atividade pozolânica, que fornece C-S-H extra e diminui ainda mais o tamanho e a conectividade dos poros.

5. CONCLUSÕES

A utilização de resíduos de vidro moído (PV) para produzir betão sustentável de alto desempenho foi estudada experimentalmente, considerando uma alta incorporação (50%) de PV. O objetivo era produzir betões com reduzido teor de cimento, capazes de atingir uma resistência à compressão de cerca de 35 MPa (viável para a maioria das aplicações usuais) sem comprometer a durabilidade.

Neste sentido, os betões PV apresentaram resultados satisfatórios em relação à resistência à compressão e durabilidade perante os ensaios executados. A granulometria do PV, a redução na relação água/cimento, a cura dos espécimes, os métodos de mistura e as reações pozolânicas combinadas com baixa porosidade tornaram possível obter betão com baixo teor de cimento com comportamento satisfatório para usos habituais.

A menor dosagem de cimento estudada, PV 150, alcançou 32,09 MPa aos 28 dias. Em reduções menores no consumo de cimento, PV250, obteve-se 54,74 MPa. Essas resistências permitem uma ampla utilização destes betões. E percebeu-se que nos betões PV as reações pozolânicas ocorrem mais lentamente, sugerindo que estes resultados podem ser ainda melhores em idades posteriores.

Os resultados de porosidade indicam uma diminuição na porosidade para betões contendo 50% de PV em comparação com o betão de referência. A introdução de partículas de vidro permite um melhor empacotamento na mistura, reduzindo o teor de vazios. Além da atividade pozolânica verificada para o PV estudado, os resultados de porosidade podem ajudar a explicar os resultados muito bons obtidos nos testes de resistência à compressão.

A taxa de absorção de água capilar dos betões com 50% de PV é significativamente menor do que a taxa do betão de referência. Os valores obtidos mostraram reduções entre 45% e 66% nos coeficientes.

Além disso, há uma clara tendência para uma redução no coeficiente de difusão de cloretos para betões com 50% de PV. Essa redução é maior com uma maior quantidade de ligante usado e mostra-se mais proeminente em idades mais avançadas.

Embora neste estudo seja claro que composições com dosagens mais altas de ligante tenham melhores resultados, isso não implica necessariamente que dosagens mais fracas sejam inúteis ou mesmo ruins. Para evitar desperdício, para determinar a dosagem ideal deve-se levar em consideração as necessidades ou requisitos da aplicação do betão. Este estudo buscou demonstrar que mesmo na dosagem (supostamente) mais fraca, é possível obter betões de qualidade que podem ser úteis para uma infinidade de demandas.

Os resultados indicam que a elevada substituição de cimento por PV pode ser uma alternativa viável. No entanto, é vital expandir este estudo para idades superiores (90, 180 e 365 dias) e avançar com uma investigação pormenorizada ao nível da microestrutura. Além das vantagens em um nível técnico, o uso de betão com baixo teor de cimento promove a redução das emissões de CO_2 e do

consumo de energia relacionados à produção de cimento, além de contribuir para minimizar o impacto do depósito de vidro em aterros sanitários.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio dos fundos nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do projeto com a referência 2022.03197.PTDC (https://doi.org/10.54499/2022.03197.PTDC), GlassCON.

Referências

Aliabdo, A.A.; Abd Elmoaty, A.E.M.; Aboshama, A.Y. (2016) Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Constr. Build. Mater., 124, 866–877.

ASTM C1866 (2020); Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

Du, H.; Tan, K.H. (2017) Properties of high-volume glass powder concrete. Cem. Concr. Compos., 75, 22–29.

Du, H.; Tan, K.H. (2015) Transport Properties of Concrete with Glass Powder as Supplementary Cementitious Material. ACI Mater. J. 112, 429–438.

EN 12390-3 (2009); Testing Hardened Concrete—Part 3, Canada.

ERCMO—European Ready Mixed Concrete Organization. Ready Mixed Industry Statistics 2019. https://ermco.eu/statistics-previous-years/, (accessed 2022/08/15).

Esmaeili, J.; Al-Mwanes, A.O. (2021) A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement. Mater. Today, Proc., 42, 1958–1965.

Eurostat Data Set: Recycling Rates of Packaging Waste for Monitoring Compliance with Policy Targets, https://ec.europa.eu/eurostat (accessed 2022/11/20).

Global Cement and Concrete Association, http://gccassociation.org (accessed 2022/08/15).

International Energy Agency, Cement Roadmaps 2009, www.iea.org/roadmaps (accessed 2022/08/15).

Guo, P.; Meng, W.; Nassif, H.; Gou, H.; Bao, Y. (2020) New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. Constr. Build. Mater., 257, 119579.

LNEC E394 (1993); Determinação da Absorção de Água por Imersão. Lisbon, Portugal.

LNEC E393(1993); Determinação da Absorção de Água por Capilaridade. Lisbon, Portugal.

LNEC E463 (2004); Determinação do Coeficiente de Difusão de Cloretos por Ensaio de Migração em Regime Não Estacionário. Lisbon, Portugal.

Malheiro, R.; Moreira, B.; Pontes, K.; Jesus, C.; Camões, A. (2022) Utilização do pó de Vidro como Substituto Parcial do Cimento: Uma Abordagem Experimental Acerca da Resis-tência Mecânica; CLBMCS: Salvador, Brazil.

Moreira, O., Malheiro, R., Jesus, C., Camões, A., & Ribeiro, M. (2023). Incorporação de lamas provenientes do corte de rochas ornamentais em materiais cimentícios. Engenharia Civil UM, 66(66), 51–64. https://doi.org/10.21814/ecum.5552.

Moreira, O.; Camões, A.; Malheiro, R.; Jesus, C. (2024) High Glass Waste Incorporation towards Sustainable High-Performance Concrete. CivilEng, 5, 41–64. https://doi.org/10.3390/civileng5010003.

Paul, D.; Bindhu, K.; Matos, A.M.; Delgado, J. (2022) Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution. Constr. Build. Mater., 355, 129217.

Rodier, L.; Savastano, H. (2018) Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. J. Clean. Prod., 184, 333–341.

Sujjavanich, S.; Sida, V.; Suwanvitaya, P. (2005) Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer. ACI Mater. J., 102, 177.

Tagnit-Hamou, A.; Zidol, A.; Deschamps, N.S.J.; Omran, A. (2018) Ground Glass Pozzolan in Conventional, High, and Ultra-High-Performance Concrete. MATEC Web Conf., 149, 01005.

Taha, B.; Nounu, G. (2009) Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. J. Mater. Civ. Eng., 21, 709–721.

Zheng, K. (2016) Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction. Cem. Concr. Compos., 67, 30–38.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARATERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.

Alice A. Muati Modesto[a]; Pedro C. Cunha Lamas[b]; Fernando F. S. Pinho[c]

[a]NOVA Shool of Sciences and Technology, Quinta da Torre, 2829-516, Caparica, Portugal, modesto@campus.fct.unl.pt

[b]GeoBioTec (NOVA Shool of Sciences and Technology, Quinta da Torre, 2829-516, Caparica, Portugal) pcl@fct.unl.pt

[c]CERIS NOVA (NOVA Shool of Sciences and Technology, Quinta da Torre, 2829-516, Caparica, Portugal) ffp@fct.unl.pt

RESUMO

Com vista a dar novas aplicabilidades a resíduos provenientes da indústria transformadora de pedras ornamentais, têm vindo a ser realizados diversos estudos para otimizar a utilização destes resíduos na construção, minimizado assim, entre outros, a degradação da paisagem, a destruição de habitats e a contaminação de solos e aquíferos por descargas diretas de efluentes. Neste contexto, foi efetuada uma campanha experimental na FCT NOVA utilizando provetes de argamassa incorporando um agregado normalizado, resíduos da indústria de transformação de mármore e de granito em proporções de 10%, 15% e 20%, em massa, e cimento Portland.

Os trabalhos laboratoriais incluem duas séries de provetes, diferindo nos respetivos traços: a série 1, que correspondente a provetes de argamassa ao traço 1:3 (ligante:agregado), e a série 2, relativa a provetes ao traço 1:5 (idem). O agregado utilizado na produção das amassaduras foi uma areia normalizada e o ligante foi cimento Portland do tipo II/B-L-32,5 N. Os provetes de ambas as séries foram então submetidos a ensaios de caracterização física e mecânica.

Os resultados são analisados e comparados com os de trabalhos realizados por outros autores, que efetuaram estudos no âmbito da incorporação de resíduos da mesma natureza em argamassas. Verificou-se que as argamassas produzidas com incorporação de 10, 15 e 20% de resíduos, mantêm-se adequadas para fins de revestimento, não tendo as mesmas sofrido alterações significativas relativamente ao comportamento físico e mecânico, quando comparadas com argamassas convencionais do mesmo traço.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Resíduos de mármore, Resíduos de granito, Argamassas, Propriedades mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

Os impactes ambientais gerados pela indústria transformadora de rochas ornamentais têm merecido na atualidade crescente preocupação, sendo cada vez mais importante proceder a uma gestão consciente e sustentável dos resíduos produzidos por essa atividade. Para além dos impactes mais notórios como a degradação da paisagem e a destruição de habitats por descarga direta de efluentes em linhas de água, existem outros impactes associados diretamente a esta indústria, como a contaminação da água e dos solos, libertação de gases nocivos, acréscimo de ruídos, que afetam todo o ambiente envolvente das áreas de exploração (Velho *el al*., 1998). Estes resíduos são criados maioritariamente nas fases de extração e transformação por serragem, que geram partículas sólidas ao cortar a pedra, responsáveis pelos impactes ambientais enumerados. A serragem consiste no esquadrejamento dos blocos, geralmente através do uso de equipamentos de corte por fio diamantado, o qual possui um sistema de refrigeração por injeção de água. Na serragem de blocos de granito recorre-se a uma mistura abrasiva e lâminas estriadas. Desta mistura abrasiva, constituída por água, granalha de aço, cal e estéreis provenientes do processo de serragem, depende a qualidade do produto final (INETI, 2001). Quanto maior o corte, maior o volume de resíduos produzidos. Cerca de 5% das partículas é lançado para o ar e o restante é removido pelo fluído de arrefecimento, que irá ser submetido a um processo de decantação resultando na acumulação de lamas (Mendoza et al. 2014). A minimização deste problema ambiental passa, entre outras soluções, por agregar pelo menos parte dos resíduos produzidos por este importante setor da economia em argamassas usualmente utilizadas na construção civil.

Neste artigo é apresentada uma caraterização física e mecânica de argamassas com diferentes traços ponderais e diferentes teores de agregado de mármore e de granito, provenientes de centros de corte de rochas, com vista a verificar a sua viabilidade de utilização para o referido fim. Para tal, foram realizadas duas séries de provetes de argamassa com traços distintos, 1:3 e 1:5 (em massa) que, seguidamente, foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos.

Inicialmente, procedeu-se à caraterização das propriedades dos agregados constituintes das argamassas, determinando-se a baridade e granulometria dos mesmos. Feitas as misturas, procedeu-se à execução de ensaios físicos sobre as argamassas produzidas, como as massas volúmicas, real e aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por capilaridade, a que se seguiu a caraterização das mesmas argamassas do ponto de vista mecânico, que abrangeu as resistências à compressão e à tração por flexão, o módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de aderência. Os resultados foram comparados com os obtidos por outros autores que realizaram trabalhos experimentais semelhantes.

2 MATERIAIS E TRABALHOS REALIZADOS

No âmbito dos trabalhos conducentes a uma dissertação de mestrado (Modesto 2022) foram realizadas duas séries de provetes, ambas com sete composições distintas, compostas por uma argamassa de referência (Ref), três argamassas com incorporação de diferentes teores de mármore (M1, M2 e M3) e outras três de resíduos de granito (G1, G2 e G3). Os resultados obtidos na campanha experimental são expostos sob a forma de gráficos de barras e tabelas nas quais constam o valor médio e o desvio padrão relativos aos valores apresentados.

Após a caraterização dos constituintes da argamassa, segue-se o processo de produção da mesma. Foram então definidas duas séries (Série 1 e Série 2), correspondentes a um traço de 1:3 e 1:5 (ligante

: agregado, para ambos os casos) respetivamente. Cada série é constituída por sete composições diferentes: uma de referência; três amassaduras com diferentes teores de incorporação de mármore (10%, 15% e 20%); e outras três com diferentes teores de granito (10%, 15% e 20%). Dentro de cada série, relativamente à nomenclatura utilizou-se a M1, M2, M3 para os provetes com uma incorporação de resíduos de mármore nas proporções de 10%, 15% e 20% em massa; a designação G1, G2, G3 para provetes com uma incorporação de resíduos de granito nas proporções de 10%, 15% e 20% em massa; e a designação de "Ref" para a argamassa de referência, Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1 - Composição dos provetes de argamassas realizados para a Série 1.

S1					
Argamassa	Areia (g)	Mármore (g)	Granito (g)	Cimento (g)	Água (mL)
Ref	4015.0	-	-	1350	675
M1	3645	377.5	-	1350	675
M2	3442.5	566.3	-	1350	675
M3	3240	755	-	1350	675
G1	3645	-	355	1350	675
G2	3442.5	-	532.7	1350	675
G3	3240	-	710.3	1350	675

Quadro 2 - Composição das argamassas realizadas para a Série 2.

S2					
Argamassa	Areia (g)	Mármore (g)	Granito (g)	Cimento (g)	Água (mL)
Ref	2700	-	-	540	270
M1	2430	253.2	-	540	378
M2	2295	379.8	-	540	378
M3	2160	506.4	-	540	378
G1	2430	-	238.2	238.2	240.8
G2	2295	-	357.3	357.3	240,8
G3	2160	-	476.4	476.4	240,8

Por fim, faz-se referência a outros autores como Silva (2016), Seghir et al. (2019), Chen et al. (2020), Jain et al. (2022), Lezzerini et al. (2022), Paes et al. (2022), que desenvolveram estudos com incorporação de materiais da mesma natureza em argamassas.

A caraterização das argamassas no estado fresco incidiu na realização de ensaios à pasta fresca, antes de ser colocada nos moldes. Para tal, foi determinado o valor de consistência por espalhamento e procedeu-se à determinação da massa volúmica fresca de cada pasta realizada. As normas utilizadas na execução dos ensaios à argamassa fresca foram a EN 1015-3:1999 (CEN, 1999), para a consistência por espalhamento e a EN1015-6:1999 (CEN, 1999), para a determinação da massa volúmica.

A caraterização das argamassas no estado endurecido compreendeu a realização de ensaios aos provetes submetidos a um período de cura ao ar durante 28 dias, numa temperatura +/- 22ºC. Os

ensaios efetuados pretenderam obter parâmetros físicos e mecânicos da argamassa em estudo, recorrendo-se para tal à seguinte normalização: NP EN 14146 (IPQ 2006) para o módulo de elasticidade dinâmico, EN 1015-11 (CEN, 1999/2006) para as resistências à tração por flexão e à compressão, NP EN 1015-11 (CEN, 1999) para a aderência ao suporte, NP EN 1936 (IPQ 2009) para a massa volúmica aparente e porosidade aberta e EN 15801 (CEN, 2008) para a absorção de água por capilaridade

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARATERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

3.1.1 Determinação da consistência por espalhamento

Na Figura 1 são apresentados os valores de espalhamento obtidos, observando-se variações significativas na S1 (Traço 1:3) comparativamente a S2 (Traço 1:5). A maior variação em S1 situa-se nos 5,75%, correspondendo à argamassa que incorpora 10% de substituição de resíduo de mármore (M1) e a segunda maior variação situa-se nos 4,75%, correspondendo à pasta que incorpora 20% de substituição de pó de mármore (M3). A terceira maior variação da série 1 registou-se na pasta que incorpora 10% de resíduo de granito (G1). Na série 2 (Traço 1:5) as variações registadas em relação à pasta de referência foram bastante inferiores às registadas na S1. A maior variação foi registada na pasta que incorpora 20% de resíduo de granito (M3) e situa-se nos 2,75%.

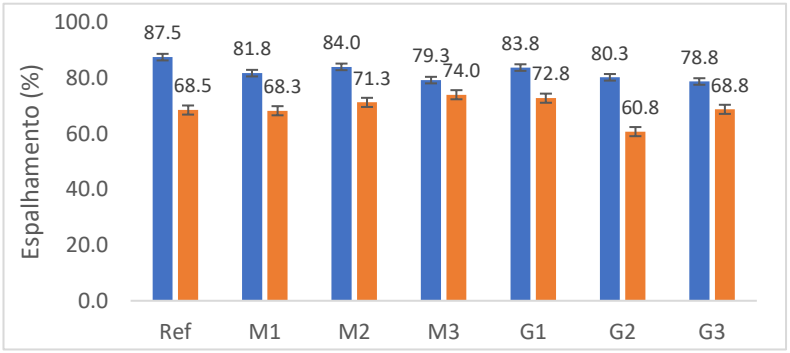


Figura 1 - Resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento nos provetes de argamassa (barras azuis: Série 1; barras laranja: Série 2.

3.1.2 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

A massa volúmica tem implicações nas propriedades mecânicas. Quanto maior for o valor de massa volúmica, melhor o desempenho mecânico da argamassa. Para as argamassas que incorporam resíduos de mármore registou-se um ligeiro aumento da massa volúmica aparente, relativamente à argamassa de referência em ambas as séries, mantendo-se a ordem de grandeza, Figura 2a. Para as argamassas que incorporam resíduos de granito, os valores de massa volúmica aparente também apresentam um aumento ligeiro, relativamente ao valor da argamassa de referência.

Relativamente aos ensaios de porosidade aberta, verificou-se que na série 1 os provetes que contêm uma maior percentagem de resíduos (15% e 20%) possuem valores mais elevados em relação à argamassa de referência, tanto no granito como no mármore, Figura 2b. Na Série 2 (traço 1:5) o mesmo não se verifica, sendo que observamos para os dois tipos de resíduos valores superiores aos da argamassa de referência nos provetes com maior e menor teores de resíduos incorporados (10% e 20%, respetivamente).

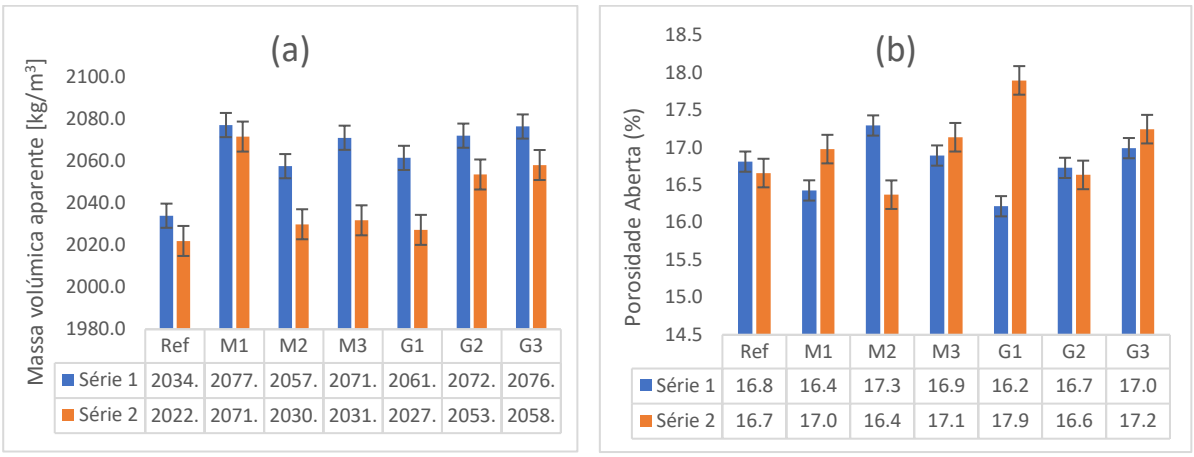


Figura 2 - Massa volúmica aparente (a) e Porosidade aberta (b) obtidas nos provetes de argamassa.

Relativamente às argamassas incorporando granito, para um traço de 1:3 verifica-se uma diminuição da porosidade aberta para teores de 10 e 15%, porém, para teores de 20% foi verificado um ligeiro aumento. Para a série 2, com um traço de 1:5, verificou-se um aumento para as argamassas que contém 10 e 20% (G1 e G2, respetivamente) de granito incorporado, sendo este muito significativo para a primeira (G1). Já na argamassa com um teor de incorporação de 15% verificou-se uma diminuição, porém na mesma ordem de grandeza do resultado obtido na argamassa de referência.

3.1.3 Absorção de água por capilaridade

Relativamente às argamassas com incorporação de resíduos de mármore, Figura 3a, para a série 1 verificou-se uma diminuição do valor de coeficiente de capilaridade nas argamassas que incorporam resíduos de mármore, traduzindo uma melhor distribuição das partículas e consequente aumento de resistência. Na série 2, para os mesmos agregados, os valores são consideravelmente superiores, devido ao traço volumétrico. A condição verificada para a série 1 registou-se apenas para a incorporação de 10%, tendo-se registado para os restantes provetes da série 2, com incorporações de 15 e 20% (M2 e M3), um aumento do coeficiente de capilaridade, consequência da redução do ligante.

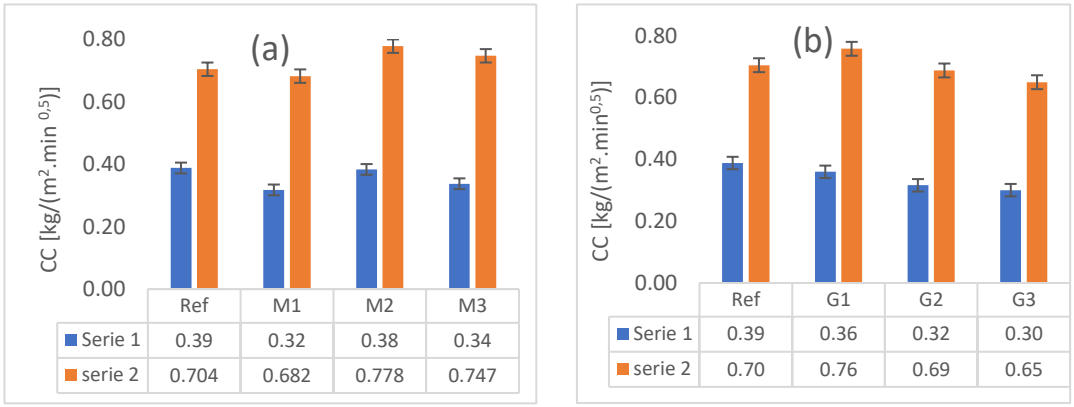


Figura 3 - Coeficientes de capilaridade para as argamassas com incorporação de resíduo de mármore (a) e de granito (b).

Para as argamassas incorporando resíduos de granito, Figura 3b, relativamente à série 1 observa-se uma diminuição do coeficiente de capilaridade com a adição do resíduo. Para a série 2 a diminuição ocorre para percentagens de incorporação de resíduo superiores, G2 e G3 (15 e 20%).

3.2 CARATERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Comparando ambas as séries de argamassas que incorporam resíduos de mármore, Figura 4, verifica-se que nas duas séries ocorre um aumento deste parâmetro em função do teor de incorporação desse resíduo. Constata-se que em ambas as séries, M1, M2 e M3, registaram um valor médio superior ao valor médio obtido para cada provete de referência (Ref). Relativamente ao desempenho das argamassas com incorporação de agregado de granito, para a série 2 verifica-se um comportamento semelhante ao das argamassas contendo agregados de mármore, ou seja, um aumento da resistência relativamente à argamassa de referência, nos três teores de incorporação (G1, G2 e G3). Na série 1, verifica-se o mesmo comportamento para teores de incorporação de granito de 10 e 15%, porém, para um teor de incorporação de 20% ocorreu uma ligeira quebra nesta propriedade.

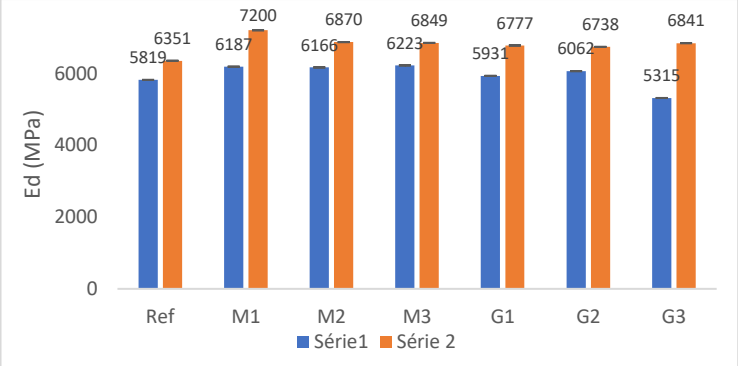


Figura 4 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico obtido nos provetes de argamassa.

3.2.2 Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Relativamente à resistência à flexão dos provetes de argamassa que incorporam agregado de mármore, verifica-se uma tendência inversa entre as duas séries composicionais produzidas, Figura 5a. Na primeira série, verifica-se uma diminuição das propriedades resistentes relativamente à argamassa de referência com o aumento do teor de incorporação de mármore. Quanto às argamassas que incorporam agregados de granito, ocorre exatamente a mesma tendência observada para as argamassas do mesmo traço com incorporação de agregados de mármore. Já na série 2, esta tendência não se verifica, uma vez que foram registados aumentos para os teores de incorporação de granito de 15 e 20%, relativamente aos valores obtidos na argamassa de referência. Porém, para um teor de incorporação de granito de 10% regista-se uma ligeira diminuição relativamente à argamassa de referência.

Efetuando uma análise geral entre as séries, na série 2 verifica-se um aumento da resistência para uma formulação que incorpora 10% de agregado de mármore. Para as restantes argamassas, com teores de incorporação de mármore superiores a 10%, verifica-se uma diminuição das mesmas propriedades. Observando os resultados obtidos nas argamassas com resíduos de granito, para as argamassas com um traço de 1:3 verifica-se que para uma incorporação de 15 e 20% (G2 e G3) ocorre uma melhoria das propriedades relativamente aos valores obtidos nas argamassas de referência. Apenas na argamassa onde ocorre uma incorporação de 10% de granito, se verificou uma diminuição da resistência.

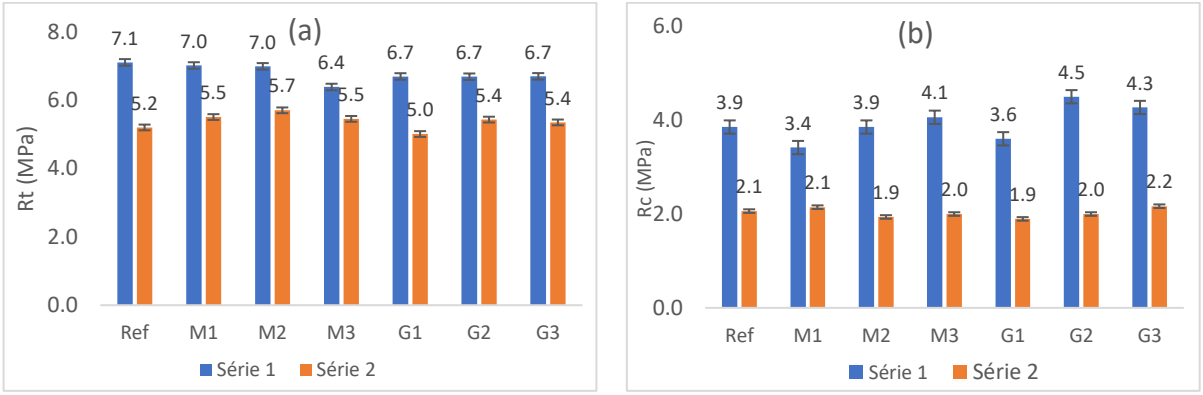


Figura 5 - Valores de resistência à tração por flexão (a) e de resistência à compressão (b) obtidas nos provetes de argamassa.

Analisando os resultados de resistência à compressão obtidos por Lazzerini et al. (2022), que optaram pela substituição do cimento, ao invés do agregado verifica-se que, para as argamassas com uma incorporação de 10% de resíduos de mármore, ocorre uma ligeira redução da tensão de compressão. Contudo, para teores superiores de substituição ocorre melhoria das propriedades mecânicas. Jain et al. (2022) verificaram ligeira diminuição das propriedades resistentes, porém nem sempre proporcional à adição de resíduo. Em resíduos de granito, regista-se de um modo geral um aumento das propriedades mecânicas das argamassas. Com o aumento da incorporação do teor em granito, para cada formulação de argamassas, Gupta & Vyas (2018) verificaram a mesma tendência para as duas séries de argamassas produzidas com teores de 30 e 40% de granito incorporado. No presente trabalho as mesmas condições foram verificadas para a argamassa com um traço de 1:3, contendo uma incorporação de 15% de granito, registou-se um valor a todas as restantes formulações (10% e 20%) da respetiva série.

3.2.3 Aderência ao suporte

Analisando os tipos de rotura obtidos para a série 1, verifica-se uma tendência para uma rotura do tipo adesiva, à exceção da argamassa que incorpora uma percentagem de granito de 20%, que apresentou um tipo de rotura mista. Estando na presença de uma rotura adesiva, pode-se afirmar que os valores obtidos no ensaio correspondem ao valor de resistência de aderência. Em relação à série 2, verifica-se para todos os provetes uma rotura pelo substrato. Este evento sucedeu devido à fraca natureza do tijolo de suporte, não permitindo inferir acerca do valor de resistência de aderência de todas as argamassas da série. Apesar disso, os valores vão representados nos gráficos das Figura 6.

Relativamente aos valores de aderência ao suporte obtidos nas argamassas com resíduos de mármore, Figura 6a, constata-se que o maior valor foi obtido na argamassa com uma incorporação de 15% (M2). A formulação com 10% (M1) obteve um valor igual ao obtido na argamassa de referência, enquanto na formulação com 20% desse material (M3), foi registada uma diminuição do valor em relação à argamassa de referência (Ref). Para as argamassas que incorporam resíduos de granito, verificou-se uma tendência semelhante à observada nas argamassas com resíduos de mármore, tendo-se obtido um valor mais elevado na argamassa com incorporação de 15% de granito (G2). Nos restantes teores de incorporação, para 10% (G1), verificou-se uma diminuição do valor em relação á argamassa de referência, enquanto para um teor de incorporação de 20% (G3) dos mesmos resíduos, ocorreu um aumento em relação à mesma.

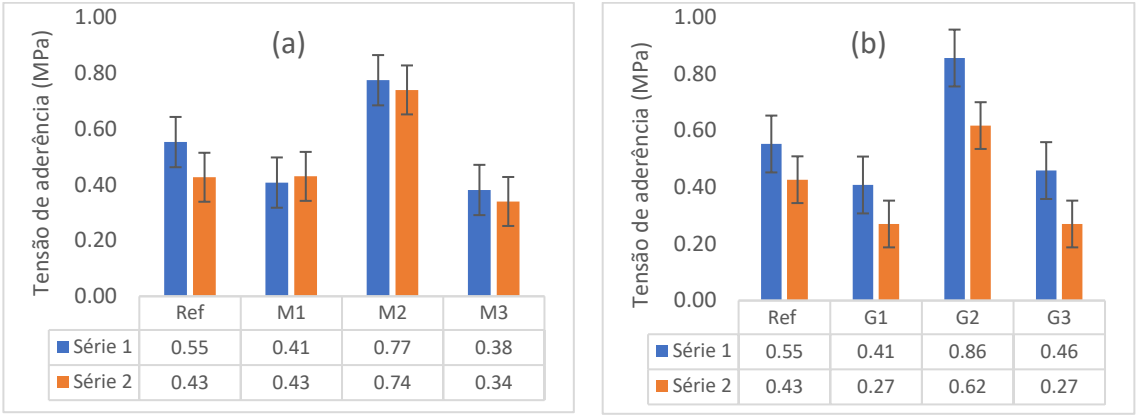


Figura 6 - Tensão de aderência para os provetes de argamassa que incorporam resíduos de mármore (a) e de granito (b).

4 CONCLUSÕES

Neste artigo pretendeu-se refletir sobre a incorporação de materiais provenientes da indústria extrativa no setor da construção, promovendo uma simbiose entre os dois e, deste modo, reduzir os impactes em ambos os setores. Relativamente à trabalhabilidade das argamassas, os resultados obtidos nos ensaios realizados à argamassa no estado fresco indicam que a incorporação de resíduos de mármore não condiciona a trabalhabilidade, para o caso de argamassas de revestimento, uma vez que possui uma granulometria favorável ao preenchimento dos espaços vazios existentes. O resíduo de granito, uma vez que é mais anguloso, pode levar a uma necessidade de adição de água. A angulosidade das partículas consequentemente gera atrito interno entre partículas, não favorecendo um preenchimento uniforme dos espaços vazios. De acordo com os resultados de espalhamento obtidos, segundo a NP EN 998-1(2017), constata-se que para as diferentes proporções de 10, 15 e 20% de substituição, as argamassas produzidas no presente estudo são adequadas para revestimento. Relativamente ao comportamento mecânico, verificou-se que a incorporação dos resíduos de mármore e de granito para argamassas, em ambos os traços, nas três proporções (10, 15 e 20%), não provoca alterações significativas, quando comparadas com argamassas convencionais do mesmo traço. As grandes diferenças observadas resultam do traço composicional e não das variações da percentagem de resíduos. Para inferir que a interferência da percentagem de incorporação de resíduos é necessário testar percentagens maiores de incorporação dos mesmos. Em relação às caraterísticas físicas, pode afirmar-se que estas traduzem os valores de resistência obtidos para ambas as séries. Os resultados obtidos no ensaio de aderência acabaram por não ser representativos para ambas as séries devido à natureza do suporte utilizado na execução dos provetes.

Para continuidade do presente trabalho sugere-se a caraterização química dos constituintes das argamassas: granulometria de varrimento laser, difratometria de Raios-X; a incorporação de aditivos na mistura de argamassa; a realização de ensaios das caraterísticas físicas e mecânicas aos 7 dias de cura.

REFERÊNCIAS

Chen, J.J.; Li, B.H. & Kwan, A.K.H. (2020). Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and Improve performance of mortar. Journal of Cleaner Production, Vol. 364

CEN - EN 1015-3:1999. Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: 1999

CEN - EN 1015-6:1999 / A1:2007. Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels: 1999

CEN - EN 1015-11:1999 / 2006. Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: 1999

CEN - EN 15801:2009. Conservation of cultural property - Test methods - Determination of water absorption by capillarity. Brussels

Gupta, L.K. & Vyas, A.K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. Elsevier. Construction and Building Materials, Vol 191, 155-164.

INETI (Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial). (2001) Guia técnico. Setor da Pedra Natural, Lisboa

IPQ (Instituto Português da Qualidade) - NP EN 1936: 2008. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica.

IPQ (Instituto Português da Qualidade) - NP EN 14146: 2006. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Caparica

IPQ (Instituto Português da Qualidade) – Especificação de argamassas para alvenarias: parte 1: argamassas para rebocos interiores e exteriores. Caparica. NP EN 998-1(2017)

Jain, D.; Gupta, R.; Choudhary, R.; Alomayri, T. & Agrawal, V. (2022). Utilization of marble dust and fly ash in composite mortar as partial cement substitute. Materials Today: Proceedings (60)

Lezzerini, M.; Luti, L.; Aquino, A.; Gallello, G. & Pagnotta, S. (2022). Effect of Marble Waste Powder as a Binder Replacement on the Mechanical Resistance of Cement Mortars. Applied Sciences. 2076-3417

Mendoza, J.; Capitano, C.; Peri, G., Josa, A., Rieradevall, J. & Gabarrel, X. (2014). Environmental management of granite slab production from an industrial ecology standpoint. Journal of Cleaner Production, Vol. 84

Modesto, A. M. (2022) Caraterização experimental de agregados provenientes do processamento de rochas. NOVA School of Science and Technology

Paes, A.L.; Alexandre, J.; Xavier, G.d.C.; Monteiro, S.N. & Azevedo, A.R.G (2022). Feasibility Analysis of Mortar Development with Ornamental Rock Waste for Coating Application by Mechanized Projection. Sustainability, [s. l.], v. 14, n. 9

Seghir, N.; Mellas, M.; Sadowski, L.; Krolicka, A.; Zak, A. & Ostrowski, K. (2019). The Utilization of Waste Marble Dust as a Cement Replacement in Air-Cured Mortar. Sustainability

Silva, A. (2016). Resíduos de mármore e resíduos de construção e demolição no cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

Velho, J.; Gomes, C. & Romariz, C. (1998). Minerais Industriais. G.C. – Gráfica de Coimbra, Lda. Coimbra, Portugal

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REVESTIMENTOS INTERIORES COM BASE EM GESSO – EFEITO DA COMPOSIÇÃO E DA APLICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À FENDILHAÇÃO

Fábio Brigas[a]; Teresa Freire[b,c]; Ângela Sousa[b]; Paulina Faria[c]

[a] NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal, f.brigas@campus.fct.unl.pt

[b] SIVAL – Gessos Especiais, Lda., R. Emídio Oliveira Faria, 2425-879 Souto da Carpalhosa, inov-ge@sival.pt; angela.sousa@sival.pt

[c] CERIS, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal, paulina.faria@fct.unl.pt

RESUMO

Os rebocos interiores dos edifícios devem aderir bem ao suporte, apresentar capacidade mecânica adequada às ações a que vão estar sujeitos, não ser nocivos para o ambiente interior e contribuir para o conforto e estética dos espaços onde são aplicados. No entanto, a sua aplicação em interfaces entre suportes distintos resulta frequentemente numa maior suscetibilidade à fendilhação, prejudicando o desempenho e obrigando a reparações com custos financeiros e utilização limitada dos espaços associados.

Neste artigo avaliam-se os efeitos da incorporação de fibras soltas em argamassas com base em gesso, e procura-se estimar a espessura ideal de aplicação que permita a substituição do uso de redes de reforço em zonas de maior risco de fendilhação. Para tal, analisa-se o aparecimento de fendas nas argamassas de revestimento, com e sem fibras, aplicadas com espessuras variáveis em suportes de tijolo cerâmico e de betão. Verifica-se que a introdução destas fibras contribui para atenuar a fendilhação e faz-se a comparação com o uso de rede de reforço.

Para além disto, avaliam-se também as tensões de aderência das diferentes soluções, concluindo-se que a incorporação de fibras soltas nas argamassas traduz-se em resultados melhorados para espessuras de aplicação mais baixas.

Conclui-se, ainda, que a incorporação de fibras soltas no seio das argamassas com base em gesso constitui uma boa alternativa ao uso de rede de reforço, com as vantagens adicionais de facilitar a sua aplicação e exigir menos mão de obra.

Palavras-chave: argamassas com base em gesso, revestimentos interiores, fissuração, fibras, espessura de aplicação

1 INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade do século XX, as estruturas reticuladas de betão armado tornaram-se o método construtivo preponderante nos novos edifícios em Portugal, substituindo o uso de paredes resistentes, e passando as alvenarias a servir na sua maioria apenas como enchimento das malhas estruturais. Com o avançar do tempo, começaram a observar-se algumas anomalias neste novo tipo de construção, maioritariamente nas paredes e coberturas (Miranda Dias, 2010). Estas anomalias podem ter origem em fenómenos físico-mecânicos e/ou químicos.

Das anomalias observáveis nas paredes de alvenaria de preenchimento, destacam-se a fendilhação dos rebocos aplicados no interior e no exterior, que pode ser devida à constituição e aplicação do próprio reboco ou ao suporte no qual está aplicado, e as anomalias resultantes da presença de humidade devido a infiltrações. A fendilhação, tema principal deste estudo, deve-se também muitas vezes à deformação excessiva da malha estrutural quando sujeita a cargas horizontais ou amplitudes térmicas. As alvenarias adjacentes aos elementos de betão armado, tendo uma rigidez diferente da estrutura, não conseguem deformar-se sincronicamente, resultando em fendas na interface entre os dois suportes (Miranda Dias, 2010; Cheng *et al*. 2022).

Segundo Okochi *et al*. (2000), a fendilhação é de grande relevo para a preservação do tempo de vida útil de um edifício visto ser, frequentemente, um fenómeno de agravamento gradual, que não só afeta o aspeto estético do edifício, como também facilita a infiltração de águas pluviais quando ocorre no exterior, resultando na exposição progressiva do betão e armaduras a ataques químicos.

De modo a aumentar a resistência à tração dos rebocos, reduzindo a sua propensão para fendilhação devido à própria constituição, aplicação ou a problemas associados ao suporte, começou a adotar-se o uso de redes de reforço nas zonas de risco, como as zonas de transição entre suportes ou zonas de concentração de tensões, como seja na diagonal de aberturas de vãos de janelas (Brito e Flores-Colen 2014; Cheng *et al*. 2022). A desvantagem desta técnica prende-se com o facto de se estar a introduzir um corpo estranho à argamassa, podendo afetar a sua coesão, e com a sua forte dependência da qualidade da aplicação, em contexto prático.

No que diz respeito aos revestimentos interiores em Portugal, as argamassas com base em gesso são as mais comumente utilizadas O gesso é uma rocha encontrada em grande abundância na crosta terrestre (Freire, 2016), sendo que a sua composição química difere conforme o grau de hidratação do sulfato de cálcio que a constitui. Existe em abundância em algumas regiões do Brasil, Espanha, França, Alemanha e Marrocos, entre outros. Ocorre de diversas formas, sendo as mais comuns o sulfato de cálcio dihidratado ($CaSO_4.2H_2O$) e a anidrite ($CaSO_4$). O gesso hemi-hidratado β, relevante para este estudo por ser o mais usado na construção, é obtido a partir da desidratação parcial da rocha de gesso (por simplificação designa-se a partir daqui como gesso). A temperatura da desidratação parcial, descrita por diferentes autores, encontra-se no intervalo de 120 a 180°C (Karni e Karni 1995; Wirsching 2000; Freire 2016). Estas temperaturas são bastante baixas quando comparadas com as necessárias para a produção de cal aérea (cerca de 900°C) e de cimento Portland (cerca de 1450°C) (Karni e Karni 1995; Kingery *et al*. 1988, Panarese *et al*. 1991). O gesso requer, assim, uma quantidade de energia para a sua produção muito inferior à dos restantes ligantes correntemente usados na construção, causando uma menor pegada ambiental, desde que a distância de transporte seja limitada (Santos *et al*. 2021).

Com o objetivo de simplificar o processo construtivo, mantendo, ou até mesmo melhorando, as características requeridas para um bom funcionamento de rebocos, a empresa SIVAL - Gessos Especiais, produtora de argamassas com base em gesso, desenvolveu formulações com incorporação

de fibras de acrilonitrilo. Neste estudo avaliam-se duas dessas formulações, comparando-as com as suas correspondentes sem fibras, e ainda com estas últimas usando rede de fibra de vidro como reforço do reboco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a avaliar a eficácia da utilização de argamassas com base em gesso com incorporação de fibras de acrilonitrilo com 4 mm de comprimento e 16 mícron de diâmetro nas zonas de transição entre materiais de suporte diferentes, e outras zonas mais propícias a fendilhação em geral, é necessário primeiro perceber o seu comportamento individualmente sobre cada tipo de suporte pretendido, bem como as espessuras de aplicação necessárias para garantir essa eficácia.

Neste estudo ensaiaram-se dois tipos de argamassas pré-doseadas nas versões sem, e com, fibras soltas: argamassas para aplicação manual - SIVAL Reabilita (SIVAL, s.d._a) e Sival Reabilita Anti-fissuras (SIVAL, s.d._b) - e argamassas para aplicação mecânica - SIVAL Project Light (SIVAL, s.d._c) e Sival Project Light Fibras (SIVAL, s.d._d). Salienta-se, no entanto, que a argamassa Project Light foi aplicada manualmente, ao contrário da projeção mecânica recomendada, podendo assim os resultados não ser representativos na totalidade. Os produtos utilizados foram desenvolvidos pela SIVAL – Gessos Especiais, e são classificados como B1 de acordo com a norma EN 13279-1 (2008), em vigor. As amassaduras foram realizadas em laboratório com um misturador mecânico, usando as proporções mássicas de 45,5% de água na SIVAL Reabilita e 47,6% nas restantes (Reabilita Anti-fissuras, Project Light e Project Light fibras).

Utilizaram-se como suporte tijolos cerâmicos e lajetas de betão com dimensões em plano semelhantes, procurando representar os suportes de alvenaria e de betão armado da estrutura reticulada corrente.

Definiu-se um plano experimental, posto em prática na fábrica de gessos da SIVAL, no Souto da Carpalhosa, Leiria, executado em duas fases: a primeira fase compreendeu aplicações de espessura variável entre 1 e 10 mm (Figura 1) e entre 2 e 20 mm, para seleção das espessuras de aplicação a usar no estudo; a segunda fase envolveu a preparação de provetes com as espessuras escolhidas, com os quais se realizaram ensaios *pull-off* para determinar a tensão de aderência entre as argamassas e os suportes, e se avaliou o grau de fendilhação, após 28 dias.

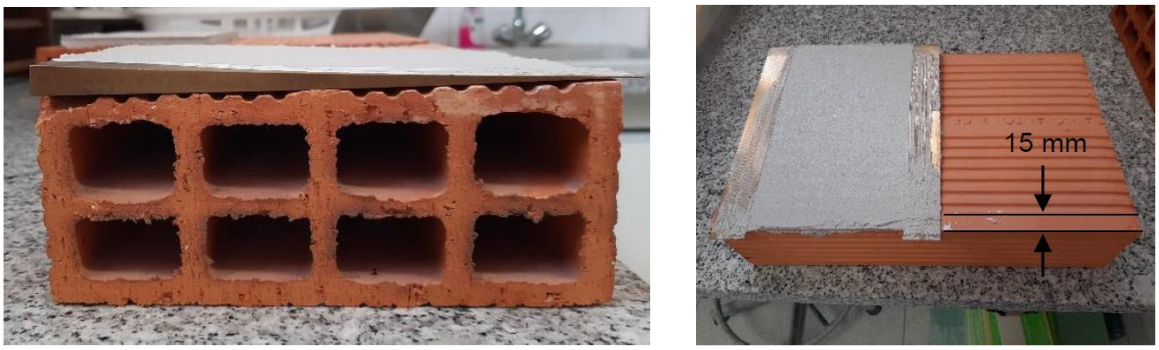


Figura 1 – Aplicação de argamassa usando guias metálicas de espessura variável entre 1 e 10 mm

Tal como esquematizado na Figura 2, tentou-se, em todas as aplicações de massas com fibras soltas, neutralizar o efeito de arranjo unidirecional das fibras, espalhando a argamassa em direções perpendiculares. Este efeito poderia ser prejudicial para os resultados pois retiraria o efeito de “ponte”

das fibras numa determinada direção, anulando a resistência à tração e promovendo a fendilhação na direção perpendicular.

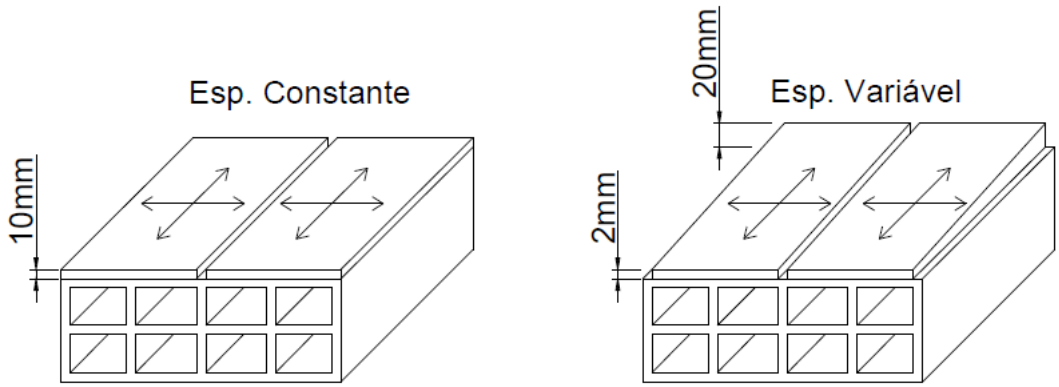


Figura 2 – Metodologia esquemática de aplicação das argamassas em provetes de espessura constante e variável, do lado esquerdo de cada tijolo, sem fibras (referência), e do lado direito, com fibras.

Com o intuito de simular ao máximo as condições adversas de uso prático em obra, decidiu-se não humedecer os suportes antes da aplicação das argamassas de gesso, agravando a absorção destes. As guias auxiliares utilizadas para calibração da espessura de aplicação das argamassas (Figura 1) também impedem o correto aperto destas, resultando num revestimento menos coeso e mais propício a fendilhação, comparativamente ao que seria expectável numa aplicação em obra bem executada. Todas estas características foram tidas em conta e aceites como uma forma de obter resultados representativos de situações extremas.

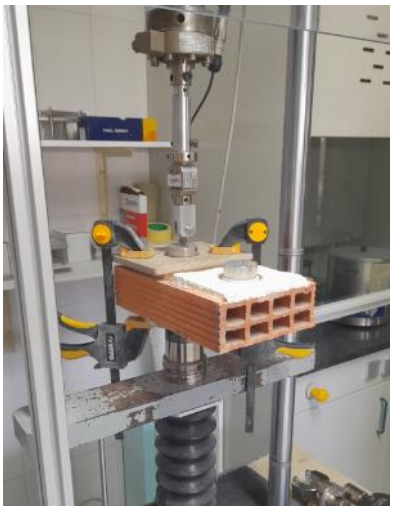
Visando conseguir analisar corretamente o comportamento de cada argamassa em determinado suporte, considerou-se pertinente dividir os provetes em duas partes simétricas, com aplicação de argamassas de referência, do lado esquerdo, e de argamassas com fibras soltas, à direita (Figura 2). Todos os ensaios foram realizados em triplicado.

Por fim, e como forma de determinar se estas formulações com função anti-fendilhação são adequadas para substituir o uso das redes de reforço correntemente utilizadas, executaram-se provetes comparativos com aplicação de rede de fibra de vidro, com abertura de malha de 4 mm x 5 mm e 160 g/m^2, embebida na espessura de argamassa. As redes foram manualmente calcadas (Figura 3a), com o cuidado de ficarem a cerca de metade da espessura de aplicação, de modo a melhor exercerem a sua função.

No total prepararam-se 48 provetes, que foram armazenados no exterior, em local coberto, com ventilação natural, para simular condições de aplicação reais em obras com franca ventilação.

Retiradas as conclusões quanto ao comportamento à fendilhação, seguiu-se a comparação das tensões de aderência (Figura 3b), das diversas soluções. A tensão de aderência é, de acordo com a norma de ensaios EN 13279-2 (2014), medida como sendo a carga máxima suportada quando um disco metálico com 50 mm de diâmetro colado à superfície da argamassa caroteada é tracionado na perpendicular ao plano do revestimento. Foi usada uma taxa de aplicação de carga de 0,013 N/(mm^2.s). Após alguma tentativa e erro, determinou-se que o correto número de carotes a realizar por provete seriam de um, nos de espessura de 10 mm, e dois, nos de 5 mm. Esta diferença deve-se à área disponível em cada tipo de provete, resultante das guias usadas na aplicação das argamassas.

(a)



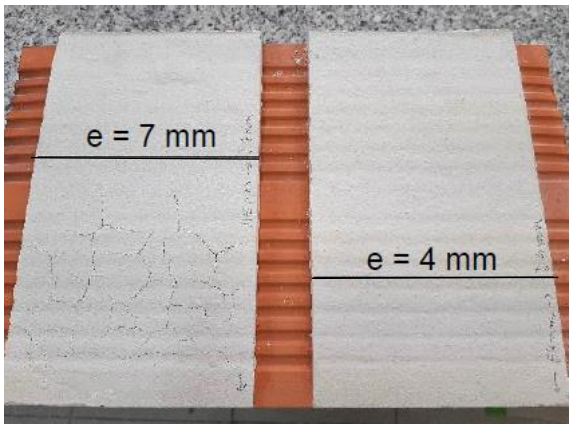
(b)

Figura 3 – Rede de fibra de vidro a ser embebida na espessura da argamassa fresca (a); ensaio de determinação da tensão de aderência (b)

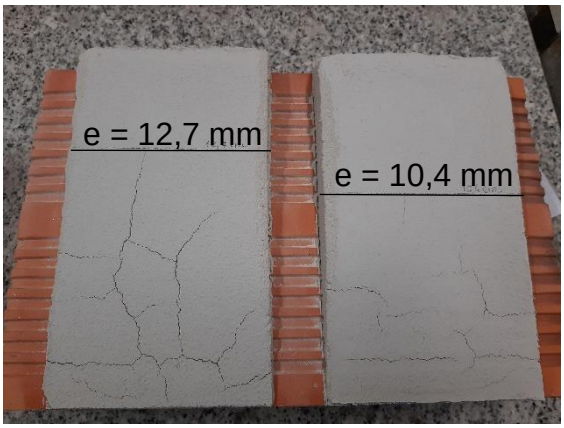
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 APLICAÇÕES COM ESPESSURA VARIÁVEL

A influência das fibras é visível nas formulações dos revestimentos aplicadas à direita (Figura 4), observando-se uma diminuição significativa do grau de fendilhação, tanto em relação ao comprimento das fendas, como à sua espessura de abertura. Os resultados evidenciam que, com estas formulações, é possível realizar aplicações a partir de espessuras de 4 mm (para o SIVAL Reabilita Anti-fissuras) e de cerca de 10 mm (para o SIVAL Project Light Fibras). Assim, decidiu-se proceder para a fase seguinte utilizando aplicações com espessuras de 5 e 10 mm.



(a)



(b)

Figura 4 –SIVAL Reabilita vs. SIVAL Reabilita Anti-fissuras, aplicados de baixo para cima, com espessura crescente entre 1-10 mm (a) e SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light Fibras, aplicados de baixo para cima, com espessura crescente entre 2-20 mm (b)

3.2 APLICAÇÕES COM ESPESSURA CONSTANTE

Nas aplicações sobre tijolo cerâmico, observou-se uma clara melhoria do comportamento à fendilhação nas argamassas com reforço (fibras, ou rede). No caso das aplicações em que o suporte foram lajetas de betão armado, as argamassas não fendilharam de todo. Tal se pode atribuir à característica menos absorvente das lajetas em comparação com os tijolos cerâmicos. Tendo as lajetas de betão pré-fabricadas maior compacidade e, por isso, menor porosidade do que o betão moldado *in situ*, levantou-se a questão de se tratar de um suporte menos absorvente do que o que se pretende simular, resultado das lajetas serem produzidas num ambiente fabril controlado, com maior rigor na sua composição, método de vibração e, consequentemente, qualidade. No entanto, este aspeto foi assumido como desprezável por haver também uma grande variabilidade na qualidade do betão moldado em obra, e por serem utilizados produtos descofrantes oleosos que acabam por prejudicar a sua absorção.

Na Figura 5 apresentam-se imagens das aplicações de revestimentos SIVAL Reabilita, SIVAL Reabilita Anti-fissuras e SIVAL Reabilita com rede, sobre suporte cerâmico, para espessuras de 5 mm. Verifica-se que a resistência à fendilhação foi bastante superior no caso das argamassas com reforço, não apresentando qualquer fenda independentemente da solução, indiciando que a argamassa com incorporação de fibras soltas é uma alternativa adequada à argamassa reforçada com rede de fibra de vidro, para esta espessura.

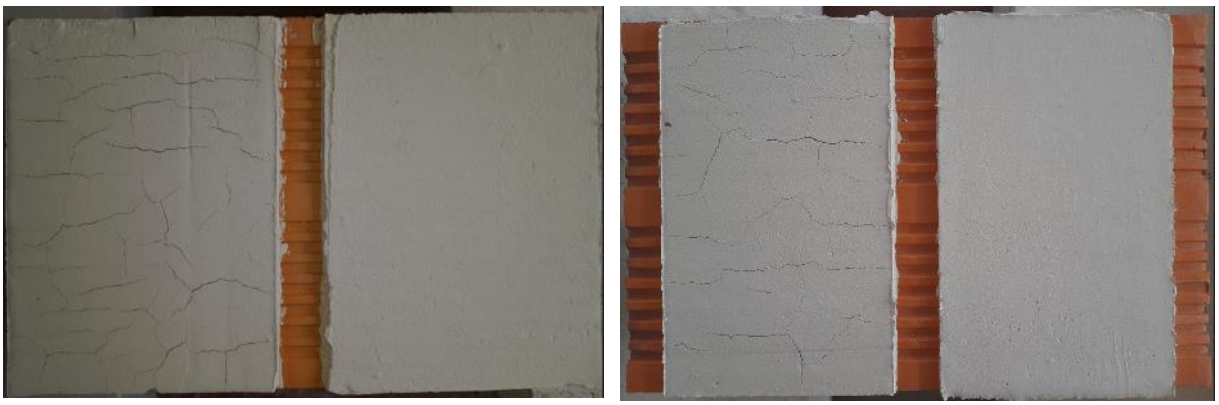


Figura 5 – SIVAL Reabilita vs. SIVAL Reabilita Anti-fissuras (esquerda) e SIVAL Reabilita vs. SIVAL Reabilita com rede de reforço (direita), aplicadas com espessura de 5 mm

Para espessuras de 10 mm, nenhuma aplicação das argamassas SIVAL Reabilita apresentou fendilhação, pelo que se conclui que qualquer das soluções, mesmo a que não tem reforço, é viável.

No caso das aplicações de argamassas SIVAL Project Light com 5 mm de espessura (Figura 6), a melhoria do comportamento à fendilhação das soluções com reforço foi menos significativa, continuando a observar-se fendas, embora em menor quantidade e de menor abertura. Neste caso, a solução com rede de fibra de vidro apresenta uma ligeira vantagem em relação à argamassa com fibras soltas.

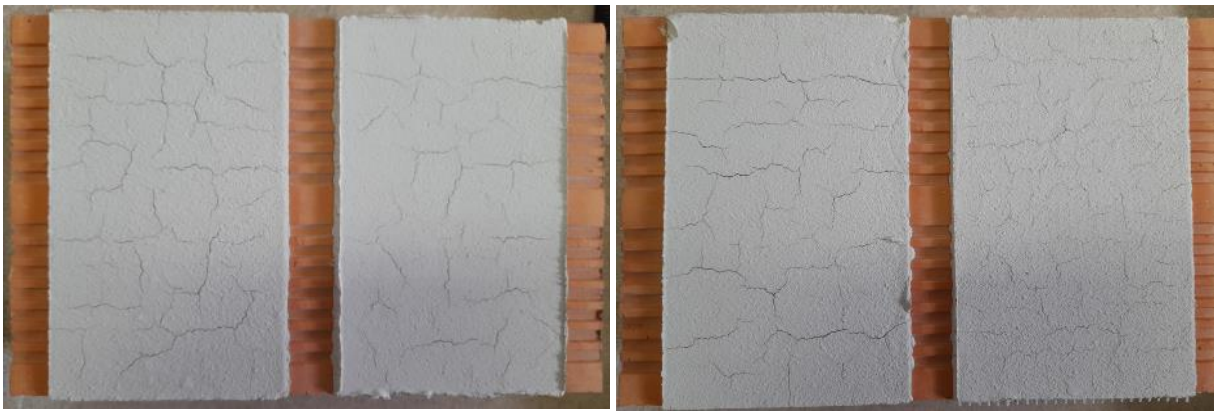


Figura 6 – SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light Fibras (esquerda) e SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light com rede de reforço (direita), aplicados com espessura de 5 mm

Para espessuras de 10 mm, ocorreram duas situações distintas: nas aplicações de SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light Fibras, nenhuma das argamassas fendilhou; já nas aplicações de SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light com rede de fibra de vidro, todas fendilharam, notando-se, no entanto, alguma atenuação nos provetes onde se usou a rede (Figura 7). Não se encontrou qualquer explicação para o facto de não ter ocorrido fendilhação no primeiro caso, sendo que a única diferença entre as aplicações foi o facto de terem sido feitas em dias diferentes, podendo as condições de secagem ter tido alguma influência.

Figura 7 –SIVAL Project Light vs. SIVAL Project Light com rede de reforço, aplicados com espessura de 10 mm

Nas recomendações de utilização deste tipo de produto, a SIVAL indica uma espessura mínima de aplicação de 10 mm. Este facto tem em conta que, em obra, a aplicação é feita por projeção mecânica e as massas são apertadas. Nenhum destes requisitos foi cumprido neste caso, pelo que é expectável que os resultados em condições reais sejam bastante melhores.

Na avaliação das tensões de aderência ao suporte, o valor normativo para validar a conformidade de uma argamassa para revestimento tem de ser superior a 0,1 MPa. O procedimento para estes ensaios seguiu as indicações da norma de ensaios EN13279-2 (2014) e os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 8 e 9.

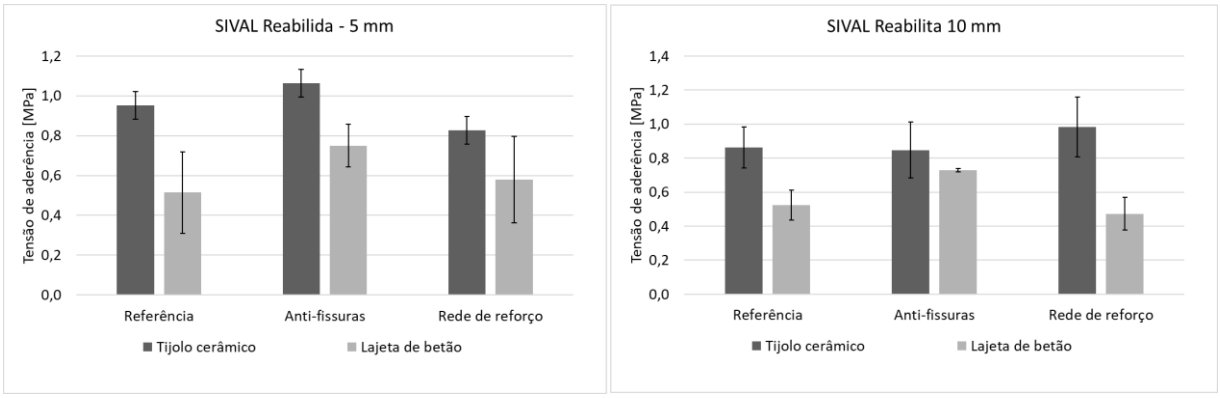


Figura 8 – Tensão de aderência dos provetes de SIVAL Reabilita com 5 e 10 mm de espessura sem fibras, com fibras soltas e com rede de reforço

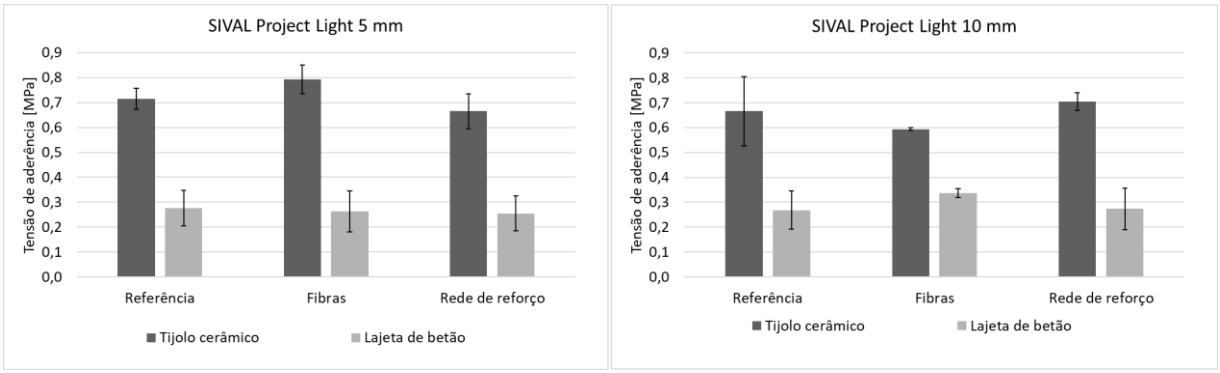


Figura 9 – Tensão de aderência dos provetes de SIVAL Project Light com 5 e 10 mm de espessura sem fibras, com fibras soltas e com rede de reforço

Analisando os resultados dos provetes sobre tijolo cerâmico, observa-se que todas as soluções apresentam ótimos resultados, sendo que as formulações com fibras até se destacaram como tendo uma maior tensão de aderência para uma gama de espessuras mais baixas. Bons resultados de aderência foram também observados nos provetes sobre lajetas de betão, para ambas as espessuras ensaiadas. No que toca a estes últimos, os resultados são, no entanto, muito inferiores aos obtidos sobre suporte cerâmico, o que é explicável pelo facto de se tratar de um material com menor porosidade, maior regularidade superficial e menor absorção. Nos provetes de SIVAL Reabilita e SIVAL Reabilita com rede de reforço, em aplicações de 5 mm, surgem, no entanto, desvios-padrão elevados. Este fenómeno deveu-se ao facto de, durante os ensaios, alguns carotes adjacentes aos tracionados se terem destacado com o choque da lajeta sobre a base onde se encontrava no momento de rotura, apesar de se ter tentado fixar todo o conjunto com a ajuda de garras (Figura 3b). Ainda assim, os resultados obtidos indicam conformidade com os valores normativos, e uma melhoria, em média, das tensões de aderência das formulações com reforço.

Relativamente ao tipo de rotura observada, sobre tijolo cerâmico estas foram maioritariamente coesivas em ambos os tipos de argamassa, significando que a tensão de adesão é superior aos valores obtidos. Em alguns casos foi possível observar uma rotura coesiva no suporte, como ilustrado na Figura 10. Nessa mesma figura é ainda possível observar um fenómeno que ocorreu na maioria dos provetes com incorporação de rede de reforço: a rotura coesiva ocorreu na zona da rede. Isto pode dever-se ao facto de se tratar de um corpo estranho à matriz da argamassa, o que afeta a sua estrutura, e/ou à possível má impregnação da rede de reforço.

Figura 10 – Padrões de rotura por *pull-off* dos rebocos em suporte de tijolo cerâmico

Em lajetas de betão, as roturas foram maioritariamente adesivas (Figura 11), implicando que o valor medido é igual à tensão de adesão do reboco a esse suporte. Excetuam-se casos em que a rotura se deu por falha na interface de colagem, ensaios esses repetidos conforme o previsto pela norma de ensaios EN 13279-2 (2014).

Figura 11 – Padrão de rotura por *pull-off* dos rebocos em suporte de lajeta de betão

4 CONCLUSÕES

Este estudo evidencia a enorme influência das características do suporte no comportamento à fendilhação das argamassas ensaiadas: nos provetes sem reforço aplicados sobre tijolo cerâmico observou-se recorrentemente fendilhação, embora com grau de severidade bastante variável, indicando a clara influência que a porosidade e irregularidade da absorção deste tipo de suporte têm sobre a ocorrência deste fenómeno; nos provetes aplicados sobre lajetas de betão, não se observou fendilhação em qualquer das espessuras de aplicação (5 e 10 mm) .

Os resultados obtidos sobre tijolo cerâmico permitiram também concluir que a absorção do suporte agrava muito a fendilhação das argamassas quando aplicadas em espessuras inferiores, devido à sucção de água da matriz que, no caso do gesso, é necessária para a sua reação, e que as soluções de reforço ensaiadas ajudam a atenuar esse efeito.

A adição de fibras soltas demonstrou ser uma alternativa ao uso de redes de reforço, com várias vantagens, tais como a de facilitar o processo de aplicação, evitando o uso de um corpo estranho no meio da matriz de argamassa, por sua vez mais sujeito a causar descontinuidades no sistema, implicar mais mão de obra e mais especializada, uma vez que o resultado dependerá muito da forma como a rede é embebida na argamassa fresca.

Os ensaios *pull-off* permitiram reforçar a ideia de que as soluções com presença de fibras soltas no seio das argamassas são mais favoráveis que o uso de rede de reforço, tendo-se obtido resultados superiores de tensão de rotura em todas as suas aplicações, com exceção das espessuras de 10 mm em suporte cerâmico. No caso da solução com rede de reforço verificou-se que a rotura, por vezes, se dá na zona onde se encontra a rede, confirmando a descontinuidade na matriz da argamassa provocada pela respetiva introdução.

Estão em curso aplicações de revestimentos, feitos com as argamassas usadas nos ensaios em provetes, sobre muretes construídos com lajetas simulando elementos de betão armado e panos de alvenaria de tijolo cerâmico furado, para avaliar o comportamento em zonas de transição entre materiais de suporte distintos, de modo a simular as zonas de interface entre as malhas estruturais dos edifícios reticulados de betão armado e as respetivas alvenarias cerâmicas de preenchimento.

REFERÊNCIAS

Brito, J. de, Flores-Colen, I. (2014). Gypsum Plasters. Materials for Construction and Civil Engineering, 123–184. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_3

Cheng, P., Zhang, L., Lin, G., Qian, X., Du, Y., Qian, K. (2022). Effect of different strengthening materials on tensile behaviour of plasters and renders. Journal of Building Engineering, 56, 104615. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104615

EN 13279-1 (2008). Gypsum binders and gypsum plasters- Part 1: Definitions and requirements. CEN, Brussels.

EN 13279-2 (2014). Gypsum binders and gypsum plasters- Part 2: Test methods. CEN, Brussels.

Freire, M. T. (2016). Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: characterization and development of compatible gypsum-based products. Tese de Doutoramento. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Karni, J., Karni, E. (1995). Gypsum in construction: origin and properties. Materials and Structures, 28, 92–100. https://doi.org/10.1007/BF02473176

Kingery, W. D., Vandiver, P. B., & Prickett, M. (1988). The Beginnings of Pyrotechnology, Part II: Production and Use of Lime and Gypsum Plaster in the Pre-Pottery Neolithic near East. Journal of Field Archaeology, 15(2), 219. https://doi.org/10.2307/530304

Miranda Dias, J. (2010). Durabilidade de edifícios com estrutura reticulada de betão armado associada a paredes de alvenaria de preenchimento. BE2010 – Encontro Nacional de Betão Estrutural, LNEC, Novembro de 2010.

Okochi, H., Kameda, H., Hasegawa, S. I., Saito, N., Kubota, K., Igawa, M. (2000). Deterioration of concrete structures by acid deposition—An assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens. Atmospheric Environment, 34(18), 2937-2945. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00523-3

Panarese, W. C., Allen, G. E., & Cumming, S. (1991). Design and control of concrete mixtures. S. H. Kosmatka (Ed.). Canadian Portland Cement Association [CPCA].

Santos, T., Almeida, J., Silvestre, J.D., Faria P. (2021). Life cycle assessment of mortars: a review on technical potential and drawbacks. Construction and Building Materials, 288, 123069. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123069

SIVAL (s.d._a). SIVAL Reabilita. https://sivalge.pt/zArchives/Products/16/Files/ft-sival-reabilita-v20200520pt.pdf

SIVAL (s.d._b). SIVAL Reabilita Anti-fissuras, https://sivalge.pt/zArchives/Products/15/Files/ft-sival-reabilita-anti-fissuras-v20201022pt.pdf

SIVAL (s.d._c). SIVAL Project Light. https://sivalge.pt/zArchives/Products/21/Files/ft-sival-project-light-v20052020pt-compressed.pdf

SIVAL (s.d._d). SIVAL Project Light Fibras. https://sivalge.pt/zArchives/Products/29/Files/ft-sival-project-light-fibras-v20211011pt.pdf

Wirsching, F. (2000). Calcium sulfate. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. https://doi.org/10.1002/14356007.a04_555

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DE LAMA DE DRAGAGEM EM COMPÓSITOS DE CIMENTO SULFOALUMINATO DE CÁLCIO

Luís Tambara[a,b]; Isabela D. Batista[a]; Juliane C. Carneiro[c], Luíz Gustavo C. H. da Silva[c], Jonas Alexandre[d], Gustavo de Castro Xavier[d], Afonso R. G. De Azevedo[d]

[a]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Materiais Avançados, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brazil. Luistambara@gmail.com, devesaisabela@gmail.com

[b]Division 7.4 Technology of Construction Materials, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12205, Berlim, Alemanha.

[c]Porto do Açu Operações, Rio de Janeiro 22210-010, Brazil. juliane.carneiro@portodoacu.com.br, gustavo.cruz@portodoacu.com.br

[d]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brazil. jonasuenf@gmail.com, gxavier@uenf.br, afonso@uenf.br

RESUMO

Este estudo investigou a substituição de lama de dragagem (DM) em compósitos de cimento sulfoaluminato de cálcio (CSA). O cimento CSA pode apresentar benefícios devido a potencial redução na pegada de carbono em comparação com cimentos convencionais, devido a menores temperaturas de queima e menor energia de moagem, além de possibilitar incorporação de subprodutos industriais. A lama de dragagem foi obtida através da dragagem de sedimentos portuário localizado no Rio de Janeiro. Três diferentes níveis de substituição (0%, 10%, e 30% em peso) foram investigados. A pesquisa buscou compreender o impacto dessa adição nas propriedades do cimento, com ênfase em aspectos como microestrutura, trabalhabilidade e propriedades mecânicas. Pastas foram avaliadas por meio de calorimetria isotérmica de condução, difração de raios-X e porosimetria por intrusão de mercúrio. As argamassas foram avaliadas através de ensaios de teor de ar incorporado, absorção de água por capilaridade e resistência de aderência à tração. Os resultados mostraram que as substituições aumentaram a resistência inicial com maior formação de etringita no sistema, atuando como pontos de nucleação para a hidratação das fases de sulfoaluminato de cálcio (principalmente etringita e hidróxido de alumínio). Em argamassas foram observados elevado teor de ar incorporado no estado fresco e redução de absorção de água por capilaridade aos 28 dias para as amostras contendo DM. A substituição de 30% de DM melhorou a resistência de aderência à tração das argamassas devido ao aumento da rugosidade das amostras.

Palavras-chave: Cimento sulfoaluminato de cálcio, Microestrutura, Resíduo de dragagem, Hidratação

1 INTRODUÇÃO

O cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA) é reconhecido como um cimento hidráulico com propriedades de endurecimento e tempo de pega rápido (Sharp *et al*., 1999; Tambara Jr *et al*., 2020). Composto por uma mistura de compostos de sulfoaluminato de cálcio e sulfato de cálcio (Cuesta *et al*., 2014), o CSA apresenta características notáveis, como elevada resistência inicial, baixa permeabilidade e resistência ao ataque de sulfato (Zhang e Glasser, 2002).

A lama de dragagem, por sua vez, emerge como um subproduto resultante dos processos de dragagem, que envolve a remoção de sedimentos e detritos de corpos d'água (OSPAR, 2024). Este material é tipicamente composto por uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, incluindo minerais argilosos como caulinita (Ferrans *et al*., 2021). A caulinita caracterizada por sua baixa plasticidade, estabilidade química elevada e área superficial considerável, figura como um mineral argiloso singular (Spagnoli *et al*., 2018).

O uso de resíduos de dragagem como substituto parcial de cimento em cimento de sulfoaluminato pode apresentar várias vantagens. Os resíduos de dragagem são resíduos prontamente disponíveis que podem ser reciclados e usados como alternativa sustentável aos materiais de cimento tradicionais (Cheng *et al*., 2019). Além disso, a adição de resíduos de dragagem ao cimento sulfoaluminato de cálcio pode melhorar as propriedades mecânicas de concretos, como resistência à compressão e durabilidade, devido à pozolanicidade dos resíduos (Monzó *et al*., 1996). Além disso, o uso de resíduos de dragagem em cimento CSA também pode reduzir o impacto ambiental da indústria do cimento, desviando resíduos de aterros sanitários e reduzindo a pegada de carbono associada à produção de cimento tradicional. No entanto, é importante avaliar cuidadosamente a composição e as propriedades dos resíduos de dragagem para garantir que sejam compatíveis com o cimento de sulfoaluminato e não afetem adversamente o desempenho ou a durabilidade do concreto resultante.

Incorporar caulinita no cimento CSA pode ter múltiplos efeitos nas propriedades da pasta de cimento resultante. Em primeiro lugar, a adição de caulinita pode melhorar a trabalhabilidade da pasta, pois as partículas de caulinita podem atuar como lubrificante, reduzindo o atrito interparticular entre as partículas de cimento e facilitando a trabalhabilidade da pasta (Zhou *et al*., 2022; Zakira *et al*., 2022). Além disso, a caulinita pode servir como um local de nucleação para a formação de etringita, a principal fase mineral que contribui para a resistência do cimento CSA. No entanto, adicionar caulinita também pode aumentar a porosidade da pasta, pois podem preencher os espaços entre as partículas de cimento e aumentar a permeabilidade da pasta, o que pode afetar a durabilidade do concreto. Além disso, incorporar caulinita pode influenciar a cinética de hidratação do cimento e alterar o desenvolvimento de resistência e tempo de pega do cimento (Avet e Scriviner, 2018). Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da lama de dragagem no cimento de sulfoaluminato de cálcio em níveis de substituição de 0%, 10% e 30% em peso, analisando resistência mecânica, cinética de hidratação e microestrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais usados nas misturas foram: cimento comercial de sulfoaluminato de cálcio (CSA), e um lodo de dragagem (DM), seco em 100 °C por 48 h. A composição química dos materiais utilizados, determinado por fluorescência de raios-X (XRF), são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição química dos materiais utilizados

Material	Conteúdo [%, em massa]									
	CaO	SO_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	SrO	Outros	PF*
CSA	49,8	17,5	14,9	11,6	0,9	0,7	0,5	0,1	0,2	3,8
DM	9,2	0,9	22,2	32,8	10,3	1,1	1,0	0,1	0,3	22,1

* Perda ao fogo.

A Figura 1 apresenta um conjunto de resultados de caracterização do CSA e DM. Dentre a composição mineralógica observada por difração de raios-X (DRX) (Figura 1a), foram identificadas as fases cristalinas de yelimita ($C_4A_3\$$), anidrita (C$), belita ($C_2S$), gehlinita ($C_2AS$) e periclásio (MgO) no CSA, enquanto que o DM apresentou caulinita [$Al_4(Si_4O_{10})(OH)$], ilita [$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$], mulita [$1,4Al_2O_3(SiO_2)$], quartzo ($SiO_2$), hematita ($Fe_2O_3$) e calcita ($CaCO_3$).

A Figura 1b mostra os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para CSA e DM. A microestrutura foi analisada em pastilhas preparadas com 300 mg de KBr e 10 mg da amostra problema. A análise de FTIR foi realizada em uma faixa de análise de 4000 a 400 cm^{-1}. Os espectros foram adquiridos com 54 acumulações e uma resolução de 8 cm^{-1}. As principais bandas do espectro de DM seco foram associadas à caulinita: vibrações υ_4 Si-O a 515 cm^{-1} e 470 cm^{-1}, υ_3 AlO_4 a 1110 cm^{-1} e 995 cm^{-1}, υ_1 AlO_4 a 790 cm^{-1} e 750 cm_{-1}, $Al^{(VI)}$-OH a 1640 cm^{-1} (Chukanov, 2014). As bandas de vibração em 3440 cm^{-1} e 3680 cm^{-1} são geradas pelas ligações $Al^{(VI)}$-OH da camada octaédrica da caulinita, e a banda em 3620 cm^{-1} corresponde à absorção de $Al^{(VI)}$-OH da ilita. A anatase foi identificada em 570 cm^{-1}, e a calcita com as bandas C-O foi identificada em 1460 cm^{-1} e 915 cm^{-1} (Nyquist e Kagel, 1971). As principais bandas de CSA associadas à yelimita foram 1190 cm^{-1}, 1100 cm^{-1} para vibrações de estiramento assimétrico de SO_4^{2-} e 855 cm^{-1}, 805 cm^{-1} para υ_1 AlO_4. A anidrita foi observada em 995 cm^{-1}, 682 cm^{-1}, 595 cm^{-1} para υ_1 SO^4 e o C_2S foi inferido em 1000 cm-^{1,} 915 cm^{-1} para υ_3 SiO, em 855 cm^{-1} υ_1 Si-O e 525 cm^{-1} para υ_4 Si-O (Tambara Júnior *et al*., 2021).

De acordo com a análise de tamanho de partícula (Figura 1c). 90 % das partículas de CSA foram menores que 35,64 µm, 50 % menores que 9,78 µm e 10 % menores que 2,57 µm. As partículas de DM eram 90 %, 50 % e 10 % menores do que 48,84 µm, 7,65 µm e 2,37 µm, respectivamente. A área superficial específica BET de CSA e DM foi de 2,47 m²/g e 30,31 m²/g, respectivamente.

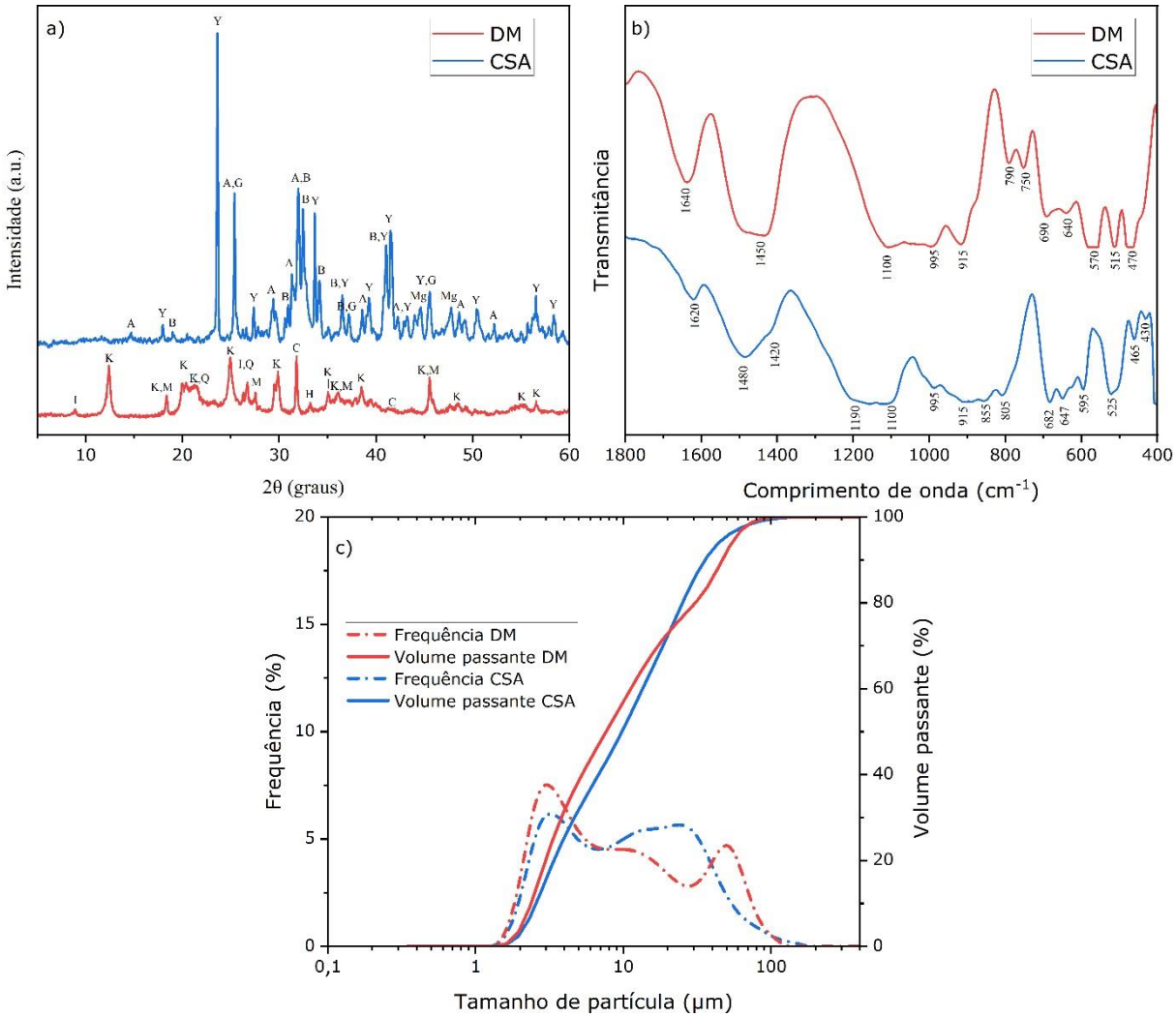


Figura 1 – a) Difratometria de raios-X, b) espectroscopia infravermelha de transformada de Fourier (FTIR) e c) distribuição de tamanho de partícula do CSA e DM anidro. Legenda: Y – yelimita, A – anidrita, B – belita, G – gehlinita, Mg – Periclasa, K – caulinita, I – ilita, M – mulita, Q – quartzo, C – calcita, H - hematita

2.1.1 Métodos

O DM foi incorporado ao cimento CSA em níveis de substituição de 0 %, 10 % e 30 % em peso, totalizando três misturas de pasta. A nomenclatura das amostras foi realizada de acordo com a porcentagem de conteúdo de DM, por exemplo, DM0, DM10 e DM30 representam amostras contendo 0 %, 10 % e 30 % de DM, respectivamente. As pastas foram preparadas para analisar a hidratação em três idades (1 d, 28 d e 90 d). Todas as pastas foram preparadas com uma relação líquido/aglutinante (l/a) de 0,5 em massa. Um misturador mecânico a 2000 rpm foi usado para preparar as pastas, que foram misturadas por 3 min.

A resistência mecânica foi testada em seis espécimes cilíndricos (30 cm x 20 cm) por idade e tipo de pasta, de acordo com a norma ASTM C1231. As amostras foram curadas em uma câmara climática a 25 ± 2 °C e umidade relativa de 65% até serem testadas. Após o ensaio de resistência mecânica, os fragmentos foram moídos até se tornarem um pó fino, e a hidratação foi interrompida com álcool isopropílico para posterior análise microestrutural.

A calorimetria de condução isotérmica foi realizada em um I-CAL 2000 HPC a uma temperatura constante de 25 °C. As pastas foram preparadas com 75 g de água deionizada e destilada (armazenada na mesma temperatura) e misturadas por 3 minutos, imediatamente após as pastas terem sido colocadas no calorímetro e medidas por 45 h.

O difratômetro de bancada Proto AXRD foi usado para realizar a análise de difração de raios X (DRX). O difratômetro foi equipado com uma fonte de radiação Cu-Kα (λ = 0,1541) e operado a 30 kV e 20 mA. Foram usados um estágio de amostra rotativo, um filtro de níquel e um raio de goniômetro de 143 mm. Os experimentos de difração foram registrados usando uma fenda de divergência de 5 mm, com uma faixa de ângulo 2θ de 5°-60°, um tamanho de passo de 0,02°, multiplicador de passo de 1 e um tempo/passo de 2,5 s. Para o ensaio de DRX foram selecionados pontos de intersecção de reações durante o ensaio de calorimetria.

O volume e a distribuição de tamanho dos poros na mistura foram analisados usando a porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) realizada com um Micromeritics Autopore IV 9500. Um fragmento de amostra com 28 dias foi mantido com uma tensão superficial de mercúrio de 0,485 N/m e um ângulo de contato de 130°. A amostra foi mantida em álcool isopropílico por 7 dias, após isso foi seca em dissecador até constância de massa.

Para o estudo em argamassa, foram utilizadas as mesmas proporções dos estudos em pastas com traço de 1:6 de (CSA+DM) e areia, traço indicado para argamassa de revestimento. A areia quartzosa utilizada apresentou dimensão máxima característica de 1,2 mm. Para o estado fresco foi avaliado o teor de ar incorporado, conforme ABNT NBR 13278:2005. No estado endurecido foi observado a absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 15259:2005) e resistência de aderência à tração ao substrato (ABNT NBR 13258-1:2019 e ABNT NBR 13258-2:2019), ambos aos 28 dias de cura das amostras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho buscou identificar o efeito da substituição de CSA por DM em até 30 % em massa. Para o ensaio de resistência mecânica das pastas (Figura 2), as misturas foram testadas em 1 d, 28 d e 90 d de cura. DM0 atingiu 9,9 MPa em 1 d, aumentando para 24,7 MPa em 28 d e diminuindo em ~23% em 90 d. A resistência no início da idade foi melhorada com o uso de 10 % (DM10) e 30 % (DM30) de lama de dragagem, ~58% e 8,5% mais resistência do que as amostras simples em 1 d de cura, respectivamente.

Aos 28 dias, a resistência foi ligeiramente maior para DM10 e ~48 % menor para DM30 do que para DM0. A redução de resistência para DM0 está associada à transformação da etringita, que aumenta a porosidade, conforme observado posteriormente nos resultados de XRD e MIP. A diminuição em idades mais avançadas não foi observada em níveis de substituição de lama de dragagem (DM10 e DM30). O aumento dos níveis de substituição de CSA reduziu o ganho de resistência entre 1 d e 28 d.

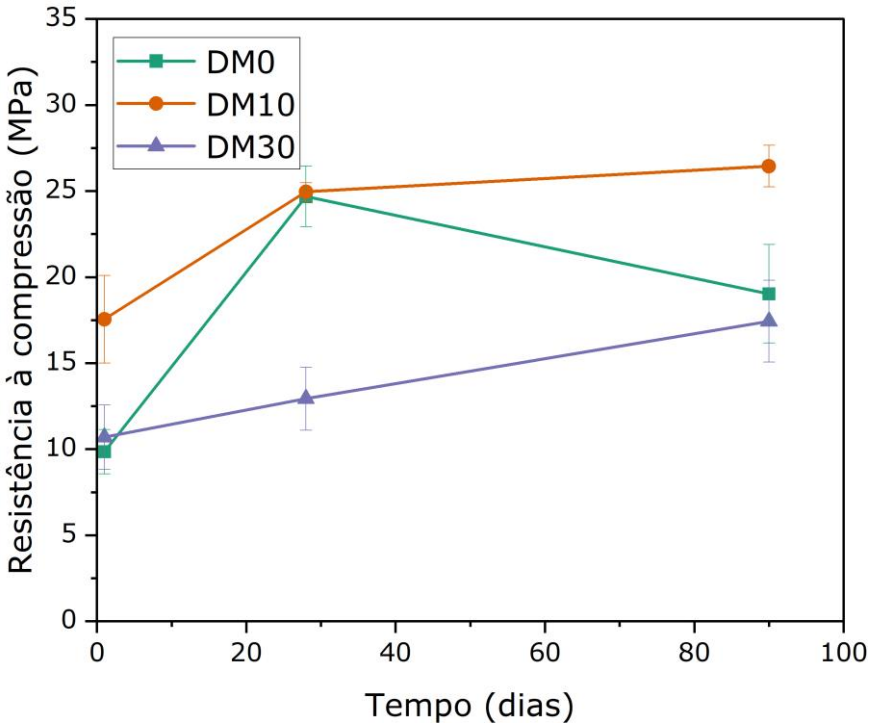


Figura 2 – Resistência mecânica à compressão das pastas

Para os resultados de calorimetria de condução isotérmica, é observado na Figura 3 que o primeiro contanto da água com o cimento gerou um pico inicial não detectado no calorímetro. A curva de fluxo de calor para a pasta de referência mostrou uma reação rápida (primeiro pico em 0,17 h), seguida por um ombro em 0,5 h e um segundo pico menos intenso em 8,01 h. Há uma desaceleração das reações iniciais ao usar qualquer percentual de lama de dragagem em até 50 horas de ensaio, no entanto, as reações que ocorrem entre ~1 e 10 h são concentradas em um pico formado em 1.27 h e 0.9 h para DM10 e DM30, respectivamente. Os calores totais liberados em até 45 h foram de 155 J/g, 138 J/g e 114 J/g para 0 %, 10 % e 30 % de DM, respectivamente.

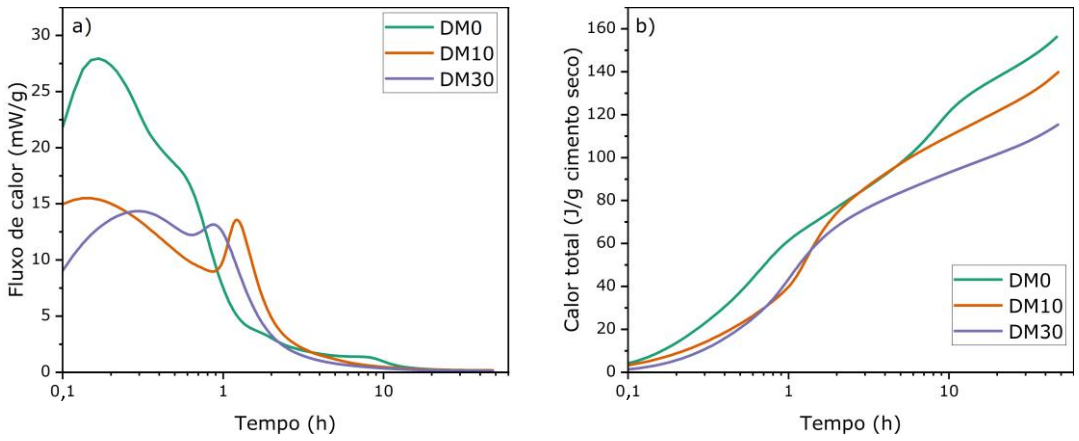


Figura 3 – a) Fluxo de calor e calor total liberado das pastas

Foram utilizados os padrões do banco de dados do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) para identificar as fases por DRX. Para entender melhor a cinética da reação observada nos testes de calorimetria, foram realizadas análises de XRD nos seguintes tempos de hidratação: DM0 (0,17 h,

1,41 h, 3,65 h e 12 h), DM10 (0,8 h, 3,65 h e 12 h) e DM30 (0,58 h, 3,85 h e 12 h). Estes períodos foram escolhidos devido aos pontos de mudança no fluxo de calor observado durante ensaio de calorimetria. A Figura 3 apresenta uma comparação dos picos mais intensos das principais fases observadas na DRX com o calor liberado durante as reações.

Para todas as amostras, observou-se que os picos calorimétricos estão associados à dissolução de yelimita e anidrita e à formação de etringita e micro cristais de AH_3, conforme identificado por DRX. O pico mais intenso observado no DM0 mostrou uma formação mais rápida de etringita em 1,41 h. Embora o DM10 tenha apresentado picos mais baixos de etringita após o primeiro pico, foi observado um maior consumo de fases anidras e formação de etringita no final do segundo pico (3,65 h). Esse comportamento explica o melhor desempenho mecânico dessa amostra, possivelmente associado a um efeito de nucleação causado pelo resíduo de dragagem. Substituições de 30 % de DM resultaram em picos menos intensos dos produtos de hidratação, sendo associado a uma menor reação do cimento. Estes resultados estão de acordo com a menor resistência dessas pastas. Uma redução gradual na quantidade de caulinita foi observada em todas as pastas contendo DM ao longo do tempo, apresentando reatividade nas primeiras horas de reação.

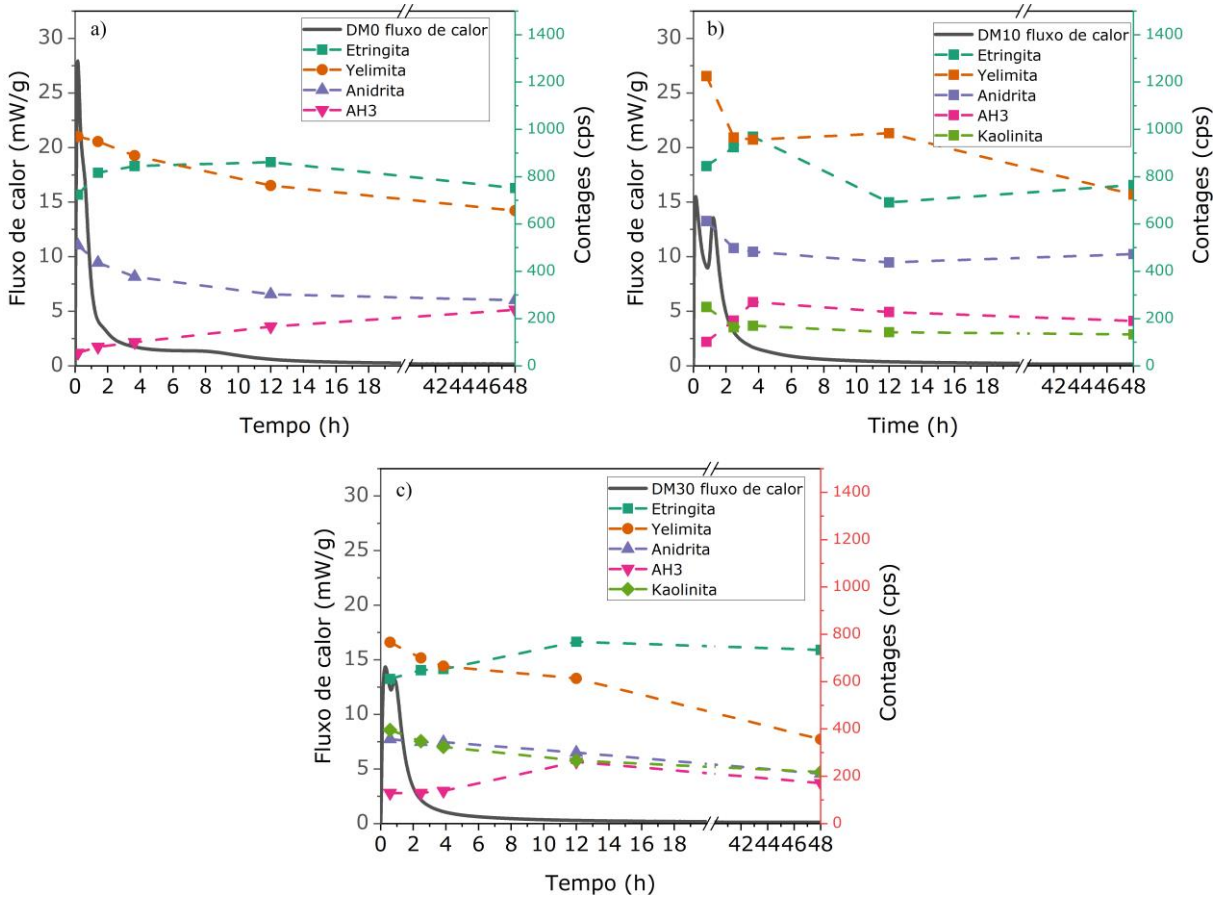


Figura 3 – Análise de picos relativos em conjunto com as curvas calorimétricas de a) DM0, b) DM10 e c) DM30

O volume cumulativo de poros das pastas de cimento aos 28 dias de hidratação medido pelo PIM é mostrado na Figura 4a e a distribuição discreta de tamanho de poros na Figura 4b. A porosidade diminuiu com 10 % de DM, mas aumentou com substituições de 30 % em comparação com a

referência. A porosidade total das amostras foi de 19,9% para DM0, 17,9% para DM10 e 22,8% para DM30. Esses resultados são consistentes com os observados por meio de estudos de resistência à compressão e microestruturais. O teor de etringita formada é crucial para o melhor desempenho mecânico das pastas. Apenas 10% de substituição do cimento por resíduo de dragagem melhorou as características da mistura, atuando como um ponto de nucleação para a formação de mais etringita.

Além disso, a Figura 4c ilustra a distribuição do volume total de poros em todas as amostras avaliadas. Notavelmente, o efeito de preenchimento positivo da lama de dragagem é observado na redução dos poros capilares nas amostras DM10 e DM30. Além disso, a melhoria marginal na resistência à compressão observada na DM10 após 28 dias pode ser atribuída à maior formação de etringita (observada nos resultados dos difratogramas de raios X), que, por sua vez, influenciou o aumento do volume de poros de transição na amostra.

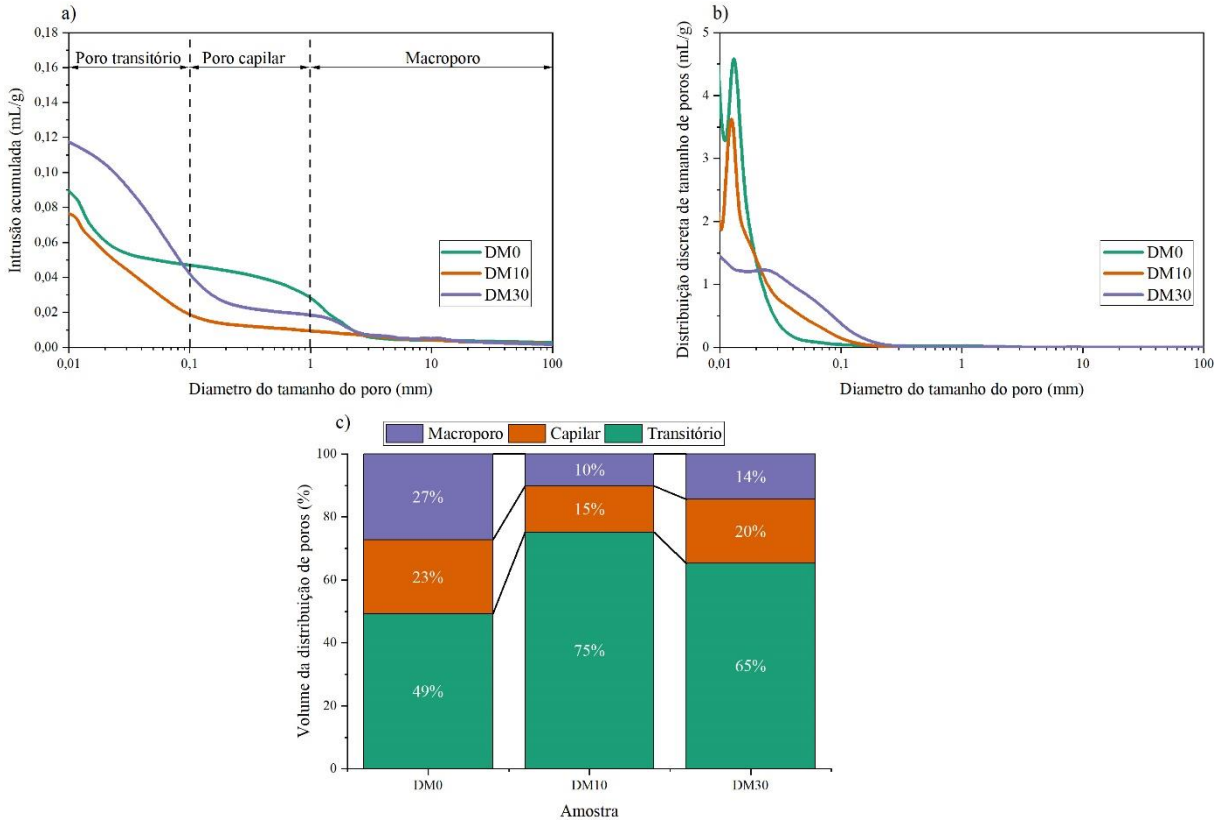


Fig. 8 Resultados de porosimetria para as pastas aos 28 dias

Para os ensaios de argamassa, para os ensaios em estado fresco foi observado um teor de ar incorporado de 6,5 %, 12 % e 15 % para as amostras DM0, DM10 e DM30, respectivamente. Identifica-se um aumento significativo com a substituição de CSA por DM, com pouca variação entre DM10 e DM30.

Para os testes em argamassa no estado fresco, a Figura 9 apresenta os dados de capilaridade aberta das argamassas avaliadas. Na Figura 9a são vistos os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade processados com base no modelo de raiz quadrada do tempo, apresentando os coeficientes de absorção (em g/cm²) por raiz quadrada do tempo (em minutos). Na Figura 9b são

apresentados os coeficientes de capilaridade em (g/dm²/min). Esses resultados mostram que a capacidade filer com o aumento da presença de DM reduziu os poros interconectados das argamassas, resultando numa amostra mais compacta, parâmetro benéfico para a durabilidade das amostras.

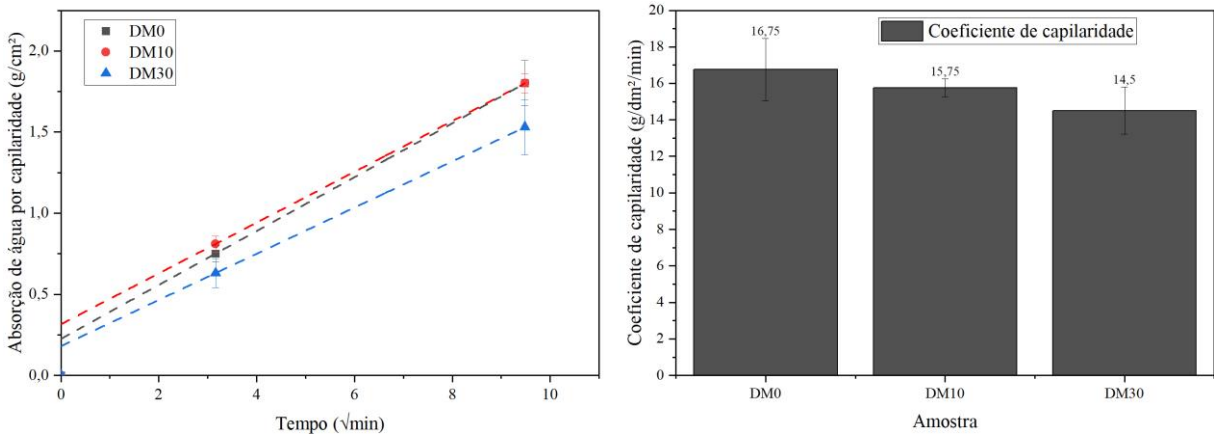


Fig. 9 Resultados de absorção por capilaridade para as argamassas aos 28 dias

Por fim, foram realizados ensaios de arrancamento de placas das argamassas, visto na Figura 10. Observa-se que para a amostra DM30 houve melhora da resistência de aderência à tração das argamassas, devido ao aumento da rugosidade das amostras.

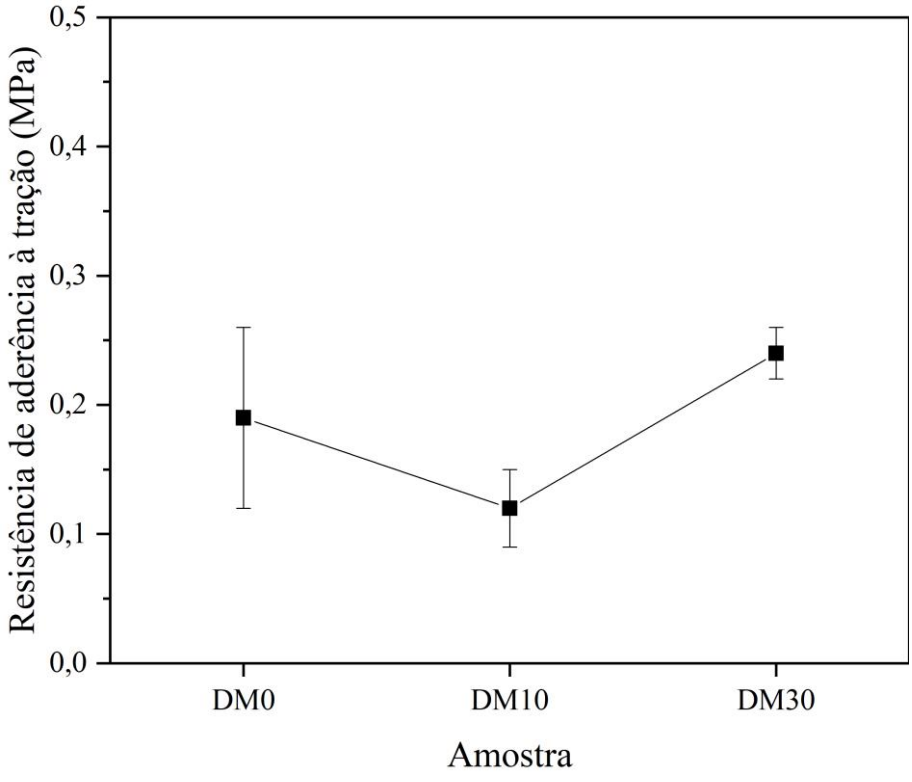


Fig. 9 Resultados de aderência à tração para as argamassas aos 28 dias

4 CONCLUSÕES

O presente estudo investigou o efeito da lama de dragagem como uma substituição parcial (até 30 %) para cimento de sulfoaluminato de cálcio em pastas. A resistência mecânica e as propriedades microestruturais foram avaliadas. Os resultados mostraram que a resistência no início da idade foi melhorada com o uso de 10 % de DM.

As análises de calorimetria e XRD forneceram informações sobre a cinética de reação e mostraram que a formação de etringita é crucial para um melhor desempenho mecânico. Os resultados da calorimetria isotérmica mostraram que a curva de fluxo de calor está associada principalmente à formação de etringita e ao consumo de yelimita e anidrita do cimento CSA.

Os resultados do MIP mostraram que a porosidade das pastas diminuiu com o uso de 10 % de DM, mas aumentou com substituições mais altas de CSA, o que é consistente com a resistência à compressão e os estudos microestruturais. De modo geral, os resultados sugerem que a substituição de 10 % do cimento por resíduos de dragagem pode melhorar as características da mistura e atuar como um ponto de nucleação para a formação de mais etringita, levando a um melhor desempenho mecânico.

Para aplicações em argamassas de revestimento é identificado uma melhora na absorção por capilaridade com o aumento de conteúdo de DM, devido ao melhor empacotamento das partículas, além disso, a amostra DM30 apresentou melhora na resistência de aderência à tração devido aumento da rugosidade nesta mistura.

REFERÊNCIAS

Avet, F.; Scriviner, K. (2018) Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3), Cem. Conc. Res., 107:124-135. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016.

Cheng, M.; Ding, S.; Gao, S.; Fu, Z.; Tang, W.; Wu, Y.; Gong, M.; Wang, D.; Wang, Y. (2019) Efficacy of dredging engineering as a means to remove heavy metals from lake sediments. Sci. Tot. Env., 665:181-190. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.057

Chukanov, N.V. (2014) Infrared spectra of mineral species.

Cuesta, A.; Álvarez-Pinazo, G.; Sanfélix, S.G.; Peral, I.; Aranda, M.A.G.; De La Torre, A.G. (2014) Hydration mechanisms of two polymorphs of synthetic ye'elimite, Cem. Concr. Res., 63:127-136. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.010.

Ferrans, L.; Jani, Y.; Hogland, W. (2021) Chemical extraction of trace elements from dredged sediments into a circular economy perspective: Case study on Malmfjärden Bay, south-eastern Sweden. Res. Env. Sust., 6:100039. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100039.

Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, M.V.; Córcoles, A. (1996) Use of sewage sludge ash (SSA) – cement admixtures in mortars, Cem. Conc. Res., 26:1389-1398. https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00119-6.

Nyquist, R.A.; Kagel, R.O (1971) Infrared Spectra of Inorganic Compounds, Handb. Infrared Raman Spectra Inorg. Compd. Org. Salts. 1–18.

OSPAR Commission, Dumping and Placement of Dredged Material, information on https://oap-cloudfront.ospar.org/ (Acesso em 2024).

Sharp, J.H.; Lawrence, C.D.; Yang, R. (1999) Calcium sulfoaluminate cements – low-energy cements, special cements or what?, Adv. Cem. Res., 11:3-13. https://doi.org/10.1680/adcr.1999.11.1.3.

Spagnoli, G.; Sridharan, A.; Oreste, P.; Bellato, D.; Di Matteo, L. (2018) Statistical variability of the correlation plasticity index versus liquid limit for smectite and kaolinite, Applied Clay Science, 156:152-159. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.02.001.

Tambara Jr, L.U.D.; Cheriaf, M.; M.; Rocha, J.C.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A. (2020) Effect of alkalis content on calcium sulfoaluminate (CSA) cement hydration, Cem. Concr. Res., 128:105953. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105953.

Tambara Júnior, L.U.D.; Rocha, J.C.; Cheriaf, M.; Padilla-Encinas, P.; Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2021) Effect of Alkaline Salts on Calcium Sulfoaluminate Cement Hydration, Molecules, 26:1938. https://doi.org/10.3390/molecules26071938.

Zakira, U.; Bajpayee, A.; Pharr, M.; Banerjee, S.; Birgisson, B. (2022) Grid nanoindentation on calcium sulfoaluminate (CSA)-Kaolinite pastes, Const. Buil. Mat. 335:127523. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127523.

Zhang, F.P.; Glasser, L. (2002) Hydration of calcium sulfoaluminate cement at less than 24 h, Adv. Cem. Res., 14:141–155. https://doi.org/10.1680/adcr.2002.14.4.141.

Zhou, Y.; Wang, Z;. Zhu, Z.; Chen, Y.; Wu, K.; Huang, H.; Anvarovna, K.G.; Xu, L. (2022) Influence of metakaolin and calcined montmorillonite on the hydration of calcium sulphoaluminate cement, Case Studies in Construction Materials, 16:e01104. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01104.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDROS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS

Duarte Ferreira[a]; António Daniel Oliveira[a]; Ricardo Silva[a]; Marco Corrêa[a]; Carlos Jesus[b]; Raphaele Malheiro[b]; Aires Camões[b]

[a]Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal,

duartelimaferreira@outlook.com; pg47027@alunos.uminho.pt ; ricardoffsilva17@hotmail.com ; marcoancorrea@hotmail.com ;

[b]CTAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, cjesus@civil.uminho.pt; raphaelemalheiro@civil.uminho.pt ; aires@civil.uminho.pt ;

RESUMO

A crescente procura por cimento enfrenta grandes desafios ambientais de forma a alcançar as metas para a neutralidade carbónica até 2050, sendo crucial a promoção da economia circular no setor. Uma forma de tentar mitigar esta problemática é através da utilização de resíduos na produção de materiais cimentícios, como é o caso dos betões e das argamassas. Recentemente, houve um impulso na utilização de pó de vidro em betões, especialmente com a publicação da norma ASTM C1866M-20. Neste âmbito, foi realizada uma pesquisa experimental de forma a investigar o potencial da incorporação de resíduos de vidro, numa primeira fase, em argamassas. Foram preparadas argamassas com substituição de 25% de cimento por cinzas volantes (CV) e por pó de vidro (POV), com um tamanho de partícula semelhante à do cimento, tendo em conta diferentes vidros, incluindo resíduo de vidro proveniente da indústria (VRI). Os resultados são promissores. Os ensaios mecânicos apontam para a viabilidade da substituição de cimento por 25% de pó de vidro sem perdas na resistência ou com perdas pouco significativas. Contudo, as argamasas com VRI precisam ser estudadas com menores percentagens de substituição. No que se refere à durabilidade, a resistência das argamasssa com POV aos cloretos é maior do que a resistência das argamassas com CV e significativamente maior do que a das argamassas de referência. O conjunto dos resultados aponta para a viabilidade da utilização destas argamasas sustentáveis, promovendo a circularidade e a sustentabilidade no setor.

Palavras-chave: Resíduo de vidro industrial, Pó de vidro, Argamassa, Durabilidade, Sustentabilidade**.**

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das áreas urbanas devido ao aumento da população mundial está a exercer uma pressão cada vez maior sobre os recursos disponíveis. Esta pressão, por sua vez, intensifica os problemas ambientais globais. A União Europeia (UE) tem sido ativa na definição de metas para combater as alterações climáticas, incluindo a neutralidade carbónica até 2050. Neste contexto, a indústria da construção desempenha um papel crucial e deve adaptar-se para oferecer soluções mais sustentáveis. A utilização de materiais ambientalmente amigáveis torna-se essencial para combater as alterações climáticas e promover uma economia circular.

O setor do cimento é um dos maiores emissores de CO_2 e consumidores de energia do mundo (Moreira et al., 2023). Reduzir o consumo de cimento ao incorporar resíduos industriais, como por exemplo, o vidro reciclado, na produção do betão, tem sido apontada como uma estratégia eficaz. Além disso, a reciclagem de vidro doméstico está a ganhar relevância, com números significativos na UE, a rondar os 76%, tendo como objetivo chegar aos 90% em 2030 (Feve, 2020). Em Portugal a taxa de reciclagem está abaixo da EU, a rondar os 55% (APA, 2022).

As propriedades mecânicas do betão contendo resíduos de vidro e a sua durabilidade têm sido estudadas. A resistência do betão contendo resíduos de vidro como substituto parcial do cimento está relacionada com vários parâmetros, como a percentagem de substituição, o tamanho e formato das partículas do vidro e o tipo de resíduo (Abdelli *et al*. 2020). Alguns estudos investigaram com sucesso o uso potencial de resíduos de vidro finamente moídos como material pozolânico com foco no desenvolvimento da resistência. Olofinnade *et al.* (2017) relataram que o betão contendo vidro em pó apresentou uma melhoria considerável no desenvolvimento da resistência à compressão aos 28 dias em comparação ao betão de controlo devido à atividade pozolânica do pó de vidro. Da mesma forma, Nassar *et al.* (2021) estudaram o desempenho a longo prazo, em campo e em laboratório, do betão produzido com 20% de substituição de cimento por pó de vidro. Os resultados dos ensaios de campo mostraram maior resistência à compressão para os betões com pó de vidro em comparação ao betão normal aos 300 dias. Da mesma forma, os ensaios de laboratório mostraram um ganho de 43% na resistência à compressão e de 28% na resistência à flexão do betão com pó de vidro em comparação ao betão normal aos 90 dias.

Apesar desses avanços, ainda há áreas que necessitam de mais investigação para melhorar a viabilidade e eficácia da substituição do cimento por pó de vidro. Considerando a variabilidade de vidro existente, importa verificar, por exemplo, se resultados como os apresentados acima podem ser reproduzidos para os diferentes tipos de vidro. Karamberi et al. (2005) estudaram a utilização de diferentes vidros produzidos na Grécia como substituto dos agregados e do cimento em argamassas. Apesar de terem utilizado pó de vidro com 90 µm, concluíram que todos os vidros estudados possuíam características pozolânicas, porém o vidro verde apresentava maior atividade pozolânica. Importa estudar ainda o potencial do pó de vidro com granulometrias inferiores neste contexto, além da substituição do cimento por pó de vidro sem substituir o agregado em simultâneo. Os resíduos provenientes da indústria também exercem aqui um papel de destaque.

Este trabalho de investigação tem como objetivo estudar a viabilidade da incorporação de pó vidro em argamassas e betões, como substituto parcial do cimento, considerando diferentes origens deste mesmo pó, tendo como base ensaios de resistência e de durabilidade.

O estudo do pó de vidro proveniente de diferentes resíduos contribuirá para promover o aumento da quantidade de vidro disponível para utilização em argamassas e betões. Nesse sentido, este trabalho

contribui para promover práticas construtivas mais sustentáveis, impulsionando a circularidade e reduzindo o impacto ambiental da indústria da construção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 TRANSFORMAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO EM PÓ DE VIDRO

O resíduo de vidro utilizado é proveniente de garrafas disponibilizadas pelo comércio local da cidade de Guimarães, Portugal, tendo para o efeito, considerado a cor verde (VV), castanho(VC) e transparente (VT). Relativamente ao vidro resíduo industrial (VRI), o mesmo foi disponibilizado pela empresa BA Glass, um dos maiores produtores de embalagens e garrafas de vidro a nível mundial (ECO 2024). O processamento de todo o resíduo de vidro não industrial (VV, VC E VT), até à forma de pó, deu-se, recorrendo às seguintes etapas:

a. Pré-seleção e separação das garrafas por cores;
b. Lavagem e limpeza de restos de cola, com posterior secagem em estufa;
c. Realização de dois ciclos de moagem no moinho de mandÍbulas (Figura 1 (a)) e moinho de martelos (Figura 1 (b)), para cada tipo de vidro;
d. Moagem no moinho de Los Angeles (Figura 1 (c))até obter a dimensão de partícula semelhante à partícula do cimento, 25 µm.

O moinho de Los Angeles é composto por 20 esferas de aço (massa igual a 8,74 Kg), que após a consecutivas rotações do equipamento, provoca o choque entre as esferas e as partículas vidro, fragmentando-as em partículas cada vez mais pequenas. O tempo de moagem totalizou cerca de 825 minutos, para 5 kg de cada tipologia de vidro.

(a) (b) (c)

Figura 1 – Equipamentos utilizados para moagem

Com relação ao VRI o processo foi semelhante ao descrito acima, apenas teve de existir uma pré-seleção do vidro mais criteriosa, pois existiam porcelanas e cerâmicos, entre outros materiais, contidos na amostra que nos foi cedido pela indústria, como é possível observar na Figura 2 (a).

(a) (b)

Figura 2 – Amostras do VR: (a) antes da seleção inicial; (b) depois da seleção inicial

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E DO CIMENTO

Foram realizados ensaios granulométricos de forma a comparar o tamanho das partículas dos diferentes pós de vidro com o tamanho da partícula do cimento. Para tal, utilizou-se um granulómetro a laser, Mastersizer 500. Na Figura 3 é apresentada a curva granulométrica dos resíduos (cinzas volantes e vidro) e do cimento, CEM I 42.5R. Os diâmetros característicos e as massa volúmicas são apresentadas nos Quadros 1 e 2, respectivamente.

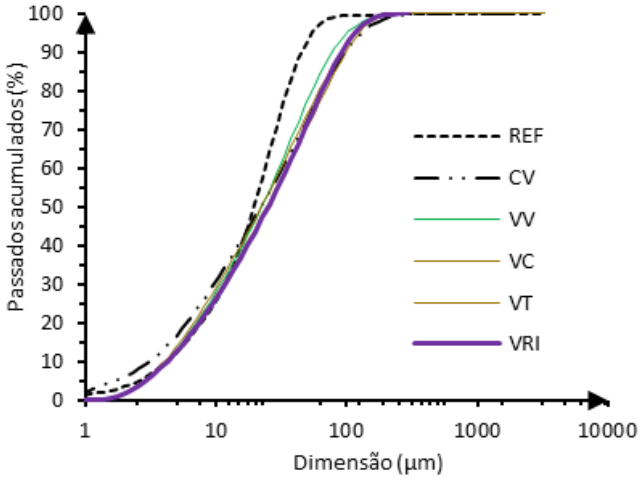


Figura 3 – Distribuição granulométrica dos resíduos e do cimento (REF)

Quadro 1- Diâmetros característicos dos materiais em estudo

Dx (µm)	**REF**	**CV**	**VV**	**VC**	**VT**	**VRI**
D(10)	6,11	6,04	4,67	4,32	4,49	4,66
D(50)	23,25	27,90	24,50	23,80	26,30	27,30
D(90)	54,35	121,00	83,70	95,50	106,00	99,00

Quadro 2- Massa volúmica dos materiais em estudo

ID	REF	CV	VV	VC	VT	VRI
Massa volúmica (kg/m^3)	3142	2364	2603	2514	2603	2525

Todos os ensaios e equipamentos utilizados ao longo desta investigação dizem respeito à Universidade do Minho, com a excessão dos ensaios de granolumetria a lazer, através do equipamento MasterSizer, tendo sido realizados em Viana do Castelo, em parceria com o IPVC, devido ao reduzido tamanho das particulas do pó de vidro, podendo apenas conhecer o seu tamanho recorrendo a difração laser.

Como se pode constatar, recorrendo ao Quadro 1, denotamos que o valor do D(10) e D(50), quer do REF quer dos restantes materiais são bastante próximos entre si, como era pretendido incialmente, ou seja, obter um tamanho de partícula similar à do cimento(REF). No que diz respeito ao D(90), os valores já não são tão similares , percebendo-se uma diferença notavél no caso do REF e do CV com um valor de 54,35 µm e 121,00 µm, respetivamente. No caso do VV com um valor de 83,70 µm, também conseguimos perceber que 90% da amostra(D(90)) tem um diâmetro característico um pouco inferior, quando comparado com os restantes pós de vidro. Como consideramos o tamanho médio de partícula (D(50)), acreditamos que os valores obtidos para o tamanho da partícula eram aceitáveis para avançar com a investigação.

2.4 PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS

Para o ensaio de compressão foram moldados os provetes prismáticos, 40x40x160 mm, que foram ensaiados segundo a NP EN 1015-11. Para além do pó de vidro e do cimento, utilizou-se ainda uma areia siliciosa natural com uma massa volúmica de 2640 Kg/m^3 , tendo sido fixada uma razão àgua/ ligante de 0,5, em toda as argamassas efetuadas.

Relativamente ao vidro de mistura (VM) estudado, o mesmo é composto por 1/3 VV + 1/3 VC + 1/3 VT. Este estudo foi elaborado com o propósito de verificar se existe algum impacto na resistência mecânica e na durabilidade, quando comparado com a incorporação de pó de vidro de uma única cor. Como é sabiado, o vidro proveniente do uso doméstico, encontra-se misturado aquando do processo de reciclagem, sendo um processo dispendioso a separação por cores, apesar de bastante eficiente atualmente.Todas as composições estudadas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3- Composição das argamassas em estudo

ID	PV (%)	PV (kg/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (kg/m^3)
REF	0	0	512	1535	256
CV	0	96	384	1535	256
VV	25	106	384	1535	256
VC	25	102	384	1535	256
VT	25	106	384	1535	256

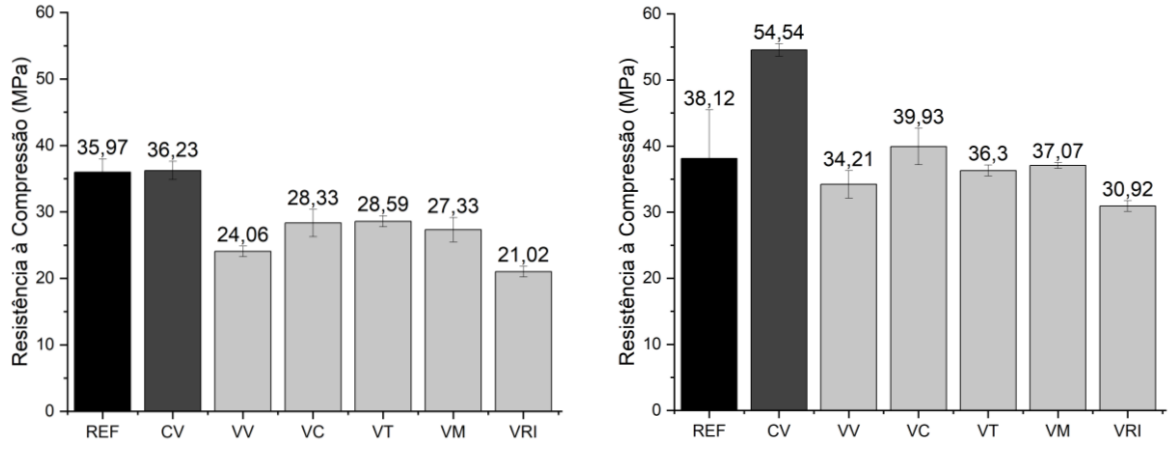
VM	25	35 +34 +35	384	1535	256
VRI	25	103	384	1535	256

Após a realização das diferentes misturas foram moldados os diversos provetes, ficando os mesmos resguardados da luz solar, em ambiente interior e à temperatura ambiente. Após 24 horas, os provetes foram desmoldados e colocados num recipiente com água e cal, para poderem ser ensaiados com os respetivos tempos de cura pretendidos (28 e 90 dias).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Um importante indicador da resistência mecânica dos materiais cimentícios é a sua resistência à compressão. As Figuras 4 (a) e 4 (b) representam, respetivamente, os ensaios dos provetes realizados aos 28 e 90 dias para os provetes de referência (apenas com cimento) e os restantes provetes, designadamente com 25% de substituição de cimento por VV, VC, VT, VM e o VRI. Os valores apresentados na Figura 4 são valores médios relativos ao ensaio de 3 provetes e o respetivo desvio padrão.



(a) (b)

Figura 4 – Resistência à compressão dos provetes de argamassa: a) 28 dias de cura, b) 90 dias cura

A Figura 4 (a) apresenta os valores de compressão para os 28 dias de cura. Neste caso, as argamassas REF e CV apresentam maiores resistências do que as argamassas com substituição de cimento por pó de vidro, independentemente do tipo de vidro. Dentre as argamassas com vidro, VV e VRI apresentam os piores comportamentos. Ao contrário, as argamassas VC, VT e VM apresentam um comportamento semelhante entre si, com perda de resistência de apenas 22% (aproximadamente) em comparação com REF.

Já a Figura 4 (b) apresenta os valores de compressão para os 90 dias de cura. Aqui é possível obeservar um acentuado crescimento na resistência da argamassa CV quando comparada à REF. Este é um comportamento esperado e relaciona-se com as reações pozolânicas, inerentes às CV, que ocorrem mais tardiamente. Dentre as argamassas com vidro, assim como para os 28 dias de cura, VV e VRI apresentam os piores comportamentos. No que se refere às outras argamassas, o VC destaca-se

positivamente, apresentando uma resistência ligeiramente superior à REF e com uma perda de apenas 27% em comparação com CV. O comportamento apresentado por VC corrobora os resultados apresentados por Moreira et al. (2023). Os autores estudaram diferentes tipos de vidros recolhidos em Portugal e, à semelhança deste trabalho, substituíram 25% de cimento por pó de vidro. Aos 90 dias, o melhor comportamento à compressão também foi conseguido para o vidro castanho, 44,76 MPa (D50 igual a 22 µm). Sabe-se que quanto menor a dimensão do pó de vidro, maior será o seu potencial pozolânico (Parghi et Alam 2016; Malheiro et al. 2022). Neste sentido, o menor valor obtido para VC nesta pesquisa, 39,93 MPa, pode estar relacionado com a maior dimensão do pó de vidro utilizado (D50 igual a 23,8 µm).

Os resultados apresentados são positivos e apontam para a viabilidade da substituição de 25% de cimento por pó de vidro sem perdas na resistência (VC e VM), ou com perdas pouco significativas (VV e VT). Considerando dados da literatura recente (Borges 2021), é provável que este comportamento esteja relacionado com a redução da porosidade proporcionada pelo efeito pozolânico e/ou pelo efeito fíler relacionados com o pó de vidro finamente moído.

É importante destacar o comportamento positivo obtido para VM (37,07 MPa aos 90 dias), com valores de resistência muito semelhantes à REF (38,12 MPa aos 90 dias), uma vez que, no ponto de recolha de vidro para reciclagem, o vidro resultante é uma mistura de diversos vidros. Por outro lado, maior atenção deve ser dada à utilização do VRI cuja perda de resistência é de 19% aos 90 dias, em comparação com REF. Apesar disso, a sua utilização como argamassa de revestimento é viável, tendo em conta os requisitos dispostos na norma NP EN 998-1, sendo classificada como nível IV.

Observando a evolução no comportamento das argamassas entre os 28 e os 90 dias, é notório o aumento do valor da resistência à compressão, nos provetes com incorporação de cinzas volantes e pó de vidro, contrariamente à referência, onde o ligante diz respeito unicamente ao cimento. Neste caso, o aumento de resistência é de apenas 2,15 MPa (5,64%). O maior aumento verifica-se na argamassa CV, 18,31 MPa (33,57%). As argamassas com pó de vidro apresentaram os seguintes aumentos: VV - 10,15 MPa (29,67%), VC - 11.96 MPa (29,05%), VT - 7,71 MPa (21,24%), VM - 9,74 MPa (26,27%) e VRI - 9,90 MPa (32,02%), representando este último a maior percentagem de incremento de resistência à compressão dentre os vidros. Este crescimento na resistência à compressão das argamassas com pó de vidro aponta para um possível potencial pozolânico associado ao pó de vidro, que será avaliado no item a seguir.

Esta tendência de crescimento tem sido reportada na literatura, principalmente, para baixas percentagens de incorporação. Aliabdo et al. (2016) produziram betões com diferentes percentagens de substituição de cimento por pó de vidro (0, 5, 10, 15, 20 e 25). Os ensaios realizados aos 7, 28 e 56 dias demonstram que a resistência à compressão aumenta até uma certa percenagem de substituição, tornando-se menor para maiores percentuais de substituição. O uso de 5% do pó de vidro melhora ligeiramente a resistência à compressão. Contudo, o uso do pó de vidro em percentuais superiores a 10% provocou um efeito negativo na resistência à compressão do betão, ao contrário dos resultados alcançados neste trabalho.

Importa, também, estudar estas argamassas em idades mais elevadas pois algumas pesquisas apontam para um crescimento importante na resistência à compressão de materiais cimentícios com pó de vidro entre os 90 e os 120 dias (Moreira 2023 ; Moreira et al. 2023).

3.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Tendo em conta os resultados de resistência à compressão, obtidos para os provetes com substituição de 25% de cimento por pó de vidro ou cinzas volantes, foram calculados os índices de atividade pozolânica através da NP 450-1 (2008), para os provetes CV, VV, VC, VT, VM E VRI. Os resultados, quer aos 28 quer aos 90 dias, encontram-se representados no Quadro 4.

Quadro 4– Índice de atividade pozolânica

IA(%)	CV	VV	VC	VT	VM	VRI
28 dias	100,7	66,9	78,8	79,5	76,0	58,4
90 dias	143,1	89,7	104,7	95,2	97,2	81,1

A NP 450-1 (2008) estabelece que o índice de atividade não deve ser inferior a 75% para ensaios de resistência à compressão de provetes com 28 dias de idade, nem inferior a 85% para provetes com 90 dias de idade. Contudo, estabelece ainda limites inferiores para resultados individuais de 70% e 80%, respetivamente.

De acordo com os valores apresentados no Quadro 3 percebe-se que ,de uma forma geral, com exceção do VV e do VRI aos 28 dias, os valores obtidos para o índice de atividade cumprem os requesitos impostos pela norma, ou seja, apresentação atividade pozolânica. O resultado obtido para o VV contraria os resultados apresentados por Karamberi et al. (2005) que apontam o vidro verde como o mais pozolânico entre os vidros estudados pelos autores.

Aos 28 dias todos a maioria dos provetes cumpriram com o mínimo de 75% de índice de atividade, tendo o VC, VT e VM mantido valores praticamente próximos entre si. No caso do VRI obtivemos um valor de 58,4%, 16,6 % abaixo daquele que seria o limite inferior aceitável pela norma (70%). No caso do VV o valor foi de 66,9%, 3,1% abaixo do limite inferior. Aos 90 dias, todos os valores superam os 85%, com exceção do RVI que cumpre apenas com o limite inferior de 80%, para resultados individuais.

Considerando os resultados apresentados no Quadro 4 e comparando-os com os resultados apresentados na Figura 4, é provável que o aumento da resistência à compressão das argamassas VV e VRI estejam relacionados apenas com o efeito fíler provocado pelo pó de vidro, sem participação do efeito pozolânico. Para verificar esta hipótese seria necessário a realização de ensaios complementares como, por exemplo, Chapelle modificado.

3.3 DIFUSÃO DE CLORETOS POR MIGRAÇÃO

A Figura 5 apresenta o resultado do ensaio de difusão de cloretos por migração, realizado aos 28 dias de cura para os provetes de referência (apenas com cimento) e os restantes provetes, designadamente com 25% de substituição de cimento por VV, VC, VT, VM e o VRI. Os valores apresentados na Figura 5 são valores médios relativos ao ensaio de 3 provetes e o respetivo desvio padrão.

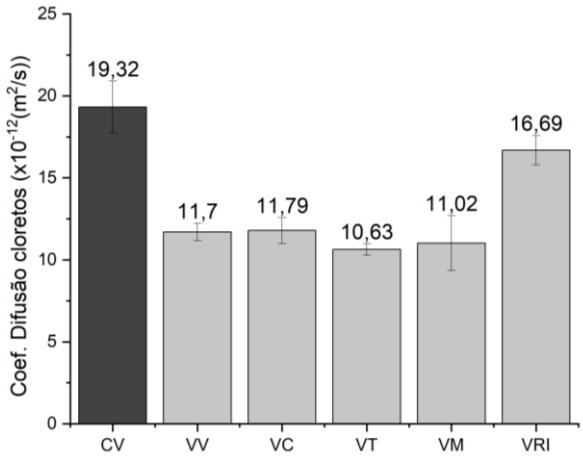


Figura 5 – Difusão de cloretos por migração após 28 dias de cura

O efeito pozolânico aliado ao efeito filler conferem aos compósitos propriedades especiais relacionadas à durabilidade (Medina 2011). A Figura 5 deixa claro este impacto no que se refere à resistência à ação dos cloretos. Todas as argamassas onde houve substituição de cimento por materiais com características pozolânicas (ou potencial), cinzas volantes e pó de vidro, o coeficiente de difusão de cloretos é menor do que aquele apresentado para a argamassa de referência. Os resultados das argamassas curadas por 90 dias serão importantes para verificar a consolidação desta tendência. De fato, no caso onde o índice de atividade pozolânica não está dentro dos limites estabelecidos pela NP 450-1 (2008) para os 28 e os 90 dias de cura, VRI, o coeficiente de difusão de cloretos é mais elevado do que para as outras argamassas com pó de vidro. Neste caso, VRI, é provável que a argamassa tenha se beneficiado apenas do efeito fíler proporcionado pelo pó de vidro.

Além disso, importa ressaltar que, de acordo com a literatura (Malheiro 2018), as cinzas volantes apresentam uma elevada resistência aos cloretos por duas razões principais: efeito pozolânico e efeito fíler (com consequente redução da porosidade); captura dos cloretos livres para formação do Sal de Friedel através da combinação com o óxido de alumínio presente nas cinzas em elevada quantidade (aproximadamente 27%) quando comparada ao cimento (aproximadamente 5%). Uma vez que o vidro possui menos óxido de alumínio do que o cimento (aproximadamente 2%), é provável que este aumento na resistência aos cloretos esteja relacionado apenas com os efeitos efeito pozolânico e efeito fíler proporcionado pelo pó de vidro.

4 CONCLUSÕES

O trabalho experimental apresentado estudou características mecânicas e de durabilidade de argamassas produzidas com cimento e com substituição parcial de cimento por resíduos com potencial pozolânico a fim de determinar a viabilidade da utilização destes resíduos neste contexto.

Para tal, foram moldadas argamassas com 25% de substituição de cimento por diferentes tipos de pó de vidro, incluindo resíduo industrial proveniente da produção de embalagens de vidro, que foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão e de difusão de cloretos.

Os resultados obtidos são promissores, tanto no que se refere à resistência, quanto no que se refere à durabilidade. Sobre a utilização do pó de vidro, para as condições estudadas, os resultados apontam para a viabilidade da substituição de 25% de cimento por pó de vidro sem perdas na resistência (vidro castanho e vidro de mistura (verde, castanho e transparente)), ou com perdas pouco significativas

(vidro verde e vidro transparente). No que se refere ao vidro proveniente de resíduos industriais, é necessário estudar menores percentagens de substituição que conduzam a uma perda de resistência menos significativa. Contudo, a sua utilização como argamassa de revestimento parece ser viável, tendo em conta os requisitos dispostos na norma NP EN 998-1, sendo classificada como nível IV.

A elevada taxa de substituição de cimento por pó de vidro utilizada neste trabalho para a produção de argamassas sustentáveis vai ao encontro das premissas dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), principalmente nos seguintes pontos: colaborando ativamente na construção de cidades mais sustentáveis, que utilizam materiais de construção com menor impacto ambiental (ODS 11); promovendo a redução do impacto ambiental negativo através da gestão de resíduos e sua redução por meio da reciclagem, além do incentivo para adoção de práticas sustentáveis por parte das empresas envolvidas na produção e consumo de argamassas (ODS 12).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio de fundos nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do projeto com a referência 2022.03197.PTDC (https://doi.org/10.54499/2022.03197.PTDC, acessado em 16 de outubro de 2023), GlassCON, e do projeto Norte+Verde, integrado no Financiamento Plurianual do Laboratório de Paisagens, Património e Território (Lab2PT), Ref.ª UIDB/04509/2020, financiado por fundos nacionais (PIDDAC) através da FCT/MCTES. Agradecem ainda à Ba Glass Portugal, S, A pela cedência do resíduo de vidro industrial para a eloboração deste trabalho de investigação.

REFERÊNCIAS

Moreira, Carlos Jesus., Raphaele Malheiro, Aires Camões. (2021). Using glass waste for producing low CO2 cementitious material as a contribution to circular economy. Romanian Journal of Materials 2023, 53(4), 297 – 305.https://solacolu.chim.upb.ro/pg297-305.pdf

FEVE.(2020). Latest glass packaging recycling rate steady at 76%. The European Container Glass Federation. Glass News. Latest glass packaging recycling rate steady at 76% - FEVE

REA.(2022). Reciclagem de resíduos de embalagem. Relatório do estado do Ambiente. APA. Reciclagem de resíduos de embalagens | Relatório do Estado do Ambiente (apambiente.pt)

Abdelli, H. E., Mokrani, L., Kennouche, S., & de Aguiar, J. B. (2020). Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review. Waste Management and Research, 38(11), 1204–1213. https://doi.org/10.1177/0734242X20941090

Olofinnade, O. M., Ndambuki, J. M., Ede, A. N., & Booth, C. (2017). Application of Waste Glass Powder as a Partial Cement Substitute towards more Sustainable Concrete Production. International Journal of Engineering Research in Africa, 31, 2017–2020. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.31.77

Nassar, R. U. D., Soroushian, P., & Sufyan-Ud-Din, M. (2021). Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. Case Studies in Construction Materials, 15. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00745

A. Karamberi, E. Chaniotakis, D. Papageorgiou, A. Moutsatsou. (2005). Influence of glass cullet in cement pastes. China Particuology vol. 4, no. 5, 234-237, 2006. https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60266-8

António Larguesa.(2024).BA GLASS. Gigante do Vidro "quebra" fronteiras.ECO. BA Glass. Gigante do vidro "quebra" fronteiras – ECO (sapo.pt)

Anant Parghi, M. Shahria Alam. (2016). Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR)", Construction and Building Materials, 104, 34–43, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.006

Raphaele Malheiro, Bruna Moreira, Klauss Pontes, Carlos Jesus, Aires Camões . (2022). Utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento: uma abordagem experimental a cerca da resistência mecânica. 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Salvador, Brasil. https://hdl.handle.net/1822/81939

Alexandre Lopes Borges. (2021).Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassa. Universidade Federal de São Carlos. https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14441

A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. Y. Aboshama. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Constr. Build. Mater., vol. 124, pp. 866–877, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016.

Moreira, O. (2023). Betão de elevado desempenho com grandes incorporações de pó de vidro. Universidade do minho.

Moreira, O., Camoes, A., Malheiro, R., Jesus, C.. (2024). High GlassWaste Incorporation towards Sustainable High-Performance Concrete. CivilEng 2024, 5, 41–64 https://doi.org/10.3390/civileng5010003

MEDINA, E. A..(2011). Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálciO. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. https://doi.org/10.11606/D.3.2011.tde-12032012-120653

Raphaele Malheiro. (2018). Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes. Universidade do Minho. https://hdl.handle.net/1822/58335

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DA CURA POR CARBONATAÇÃO ACELERADA EM ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO E CINZAS VOLANTES

Helene Figueiredo[b]; Othon Moreira[b]; Rui Reis[a]; Kubilay Kaptan[b]; Aires Camões[a]; Raphaele Malheiro[a];

[a]CTAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt, aires@civil.uminho.pt, ruicunhareis@gmail.com

[b]Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, pg47237@alunos.uminho.pt, othonmoreira@gmail.com, kaptankubilay@gmail.com

RESUMO

Sendo a produção de cimento responsável por elevadas emissões de CO_2 e consumo de energia, procura-se cada vez mais estratégias que ajudem a reduzir este impacte ambiental negativo, de forma a alcançar a neutralidade carbónica 2050. A redução do consumo de cimento através da sua substituição parcial por resíduos e a captura do CO_2 através da cura por carbonatação acelerada (CCA) de materiais cimentícios são exemplos de estratégias já utilizadas. A fim de contribuir para esta discussão, foi desenvolvida uma campanha experimental exploratória onde foram moldadas argamassas com substituição de 25% de cimento, por pó de vidro (POV) e por cinzas volantes (CV). As argamassas passaram por um processo de cura que se resume em três etapas: pré-cura (água), CCA (5% CO_2), cura residual (água). A resistência mecânica foi avaliada aos 28 dias. Observa-se uma ligeira redução (12-15%) na resistência mecânica de alguns provetes sujeitos à CCA, quando comparados aos provetes sujeitos à cura tradicional. A reduzida percentagem de CO_2 utilizada na CCA pode ser um dos fatores relacionados a este comportamento. No que se refere à substituição do cimento, observa-se também um comportamento promissor do POV quando comparado às CV.

Palavras-chave: Captura de CO_2, Argamassa, Cinzas volantes, Pó de vidro, Neutralidade carbónica.

1 INTRODUÇÃO

A captura de CO_2 por matrizes cimentícias pode acontecer através de um processo químico conhecido como carbonatação. A carbonatação de materiais cimentícios é um processo no qual o CO_2 penetra na estrutura porosa e reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para formar carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Dentre as técnicas de captura de CO_2, a cura de materiais cimentícios por carbonatação acelerada (CCA) tem sido considerada uma alternativa eficaz. Este processo contribui para utilização do CO_2 já emitido, ajudando a reduzir o seu efeito negativo no ambiente. Em contraste com a carbonatação em ambiente atmosférico, durante o processo CCA, CO_2 em alta concentração se difunde no betão nos estágios iniciais de cura resultando em alterações das propriedades físico-mecânicas (Zhang et al. 2017), muitas vezes, melhorando-as.

O impacto ambiental negativo da indústria do cimento é enorme, estando relacionado, principalmente, com as elevadas emissões de CO_2 e consumo de energia (International Energy Agency 2024). Este impacto pode ser atenuado com a utilização da CCA e, simultaneamente, com a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituto parcial do cimento no nos materiais cimentícios. Betões e argamassas produzidos com MCS e curados pelo procedimento CCA contribuirão duplamente para os objetivos sustentáveis, proporcionando menor emissão de CO_2, através da redução do consumo de cimento, e capturando o CO_2 já emitido, através da CCA.

As cinzas volantes (CV) são um caso de sucesso no que se refere à substituição do cimento. Contudo, há uma variedade de resíduos ou materiais reciclados que podem também ser utilizados. Neste contexto, o uso do pó de vidro (POV) é promissor. Estudos mostram que quando o vidro é usado como um pó finamente moído, as partículas de vidro fino se comportam como um material pozolânico, reagindo com os hidratos do cimento para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário, aumentando a resistência e a durabilidade do betão a longo prazo (Olofinnade et al. 2017; Nassar et al. 2021). Além disso, a publicação da ASTM C1866 2020 tem impulsionado seu uso.

No que se refere à utilização de CO_2 para produção de material cimentício, Kamal et al. (2020) produziram betões injetando CO_2 durante a mistura, utilizando dois intervalos de tempo: 3 – 5 minutos e 25 – 30 minutos. Estes betões foram ensaiados à compressão aos 7, 14 e 28 dias, sendo possível observar um aumento na resistência à compressão destes betões quando comparados com aqueles sem CO_2. Já Zhang e Shao (2016) utilizaram o CO_2 durante o processo de cura de betões com (20%) e sem cinzas volantes. Estes betões estiveram no molde durante 6h, depois em contato com o CO_2 durante 12h (5 bar CO_2) e, em seguida, em água até 28 dias. Verificou-se um aumento na resistência à compressão em ambos os casos, sendo mais evidente o aumento nos betões sem cinzas volantes (de 63,12 para 71,56 MPa).

A fim de contribuir para esta importante discussão rumo à neutralidade carbónica, este trabalho experimental exploratório tem como objetivo avaliar o comportamento de argamassas sustentáveis submetidas à CCA. Serão estudadas argamassas com substituição de 25% de cimento por CV ou POV. Os resultados contribuirão para a avaliação das vantagens e desvantagens associadas a utilização destes materiais em contexto de CCA.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi desenvolvida uma campanha experimental com foco na produção de argamassas de cimento e argamassas com substituição parcial do cimento por resíduos com características pozolânicas. Estas argamassas foram curadas sob duas condições: cura com passagem pela câmara de carbonatação (com objetivo de capturar carbono) e cura húmida tradicional.

2.1 MATERIAIS

Para produção das argamassas, além do agregado miúdo e da água, foram utilizados os seguintes materiais com características pozolânicas: cimento, cinzas volantes e pó de vidro. Como agregado miúdo utilizou-se uma areia siliciosa natural rolada (0/4), com um diâmetro máximo de 4 mm, módulo de finura de 2,10 e uma densidade de 2620 kg/m^3. Foi utilizado cimento com composição de 95% de clínquer (CEM I 42,5 R). A escolha de um cimento não misturado teve como objetivo garantir que os resultados obtidos não fossem distorcidos por qualquer influência potencial de materiais adicionados na sua composição. As cinzas volantes foram obtidas a partir da queima de carvão sul-africano e colombiano em centrais termelétricas portuguesas. Já o pó de vidro foi obtido a partir de vidros de garrafas verdes. Estas foram moídas até atingirem um diâmetro semelhante ao do cimento, a fim de evitar a reação álcali-sílica (ASR), pois pesquisas anteriores indicam que a ASR não ocorre quando o tamanho de partícula do pó de vidro é inferior a 75 µm (Matos e Sousa-Coutinho 2012). O processo para obtenção do pó de vidro está detalhado em (Moreira et al. 2024).

A distribuição granulométrica dos materiais pode ser vista da Figura 1, onde é possível observar a semelhança entre as curvas da cinza volante e do pó de vidro utilizado. Devido ao reduzido tamanho das partículas, a distribuição granulométrica foi determinada a laser com recurso ao equipamento MasterSizer 3000. Este equipamento mede o tamanho das partículas e a sua distribuição por tamanhos através de uma difração a laser, após a colocação de determinada quantidade de amostra na água destilada presente no equipamento.

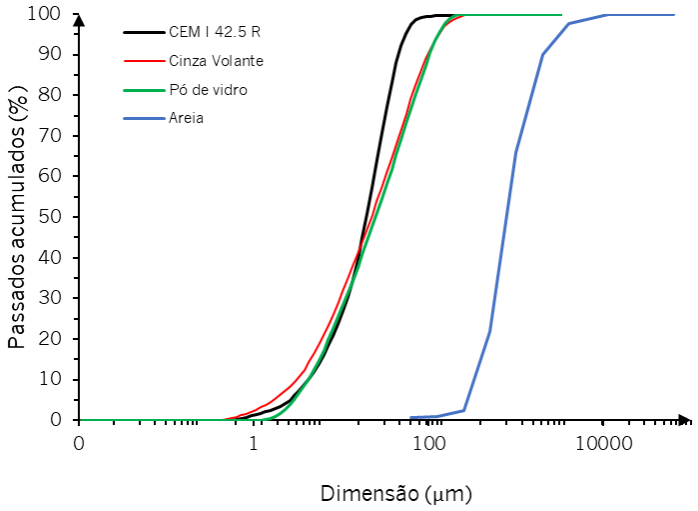


Figura 1 – Distribuição granulométrica dos materiais utilizados

No que se refere aos materiais com características pozolânicas, é possível observar algumas das suas propriedades físicas no Quadro 1, além da respectiva composição química no Quadro 2.

Quadro 1 – Caracterização física dos materiais com características pozolânicas

Material	Blaine (NP EN 196-6)	Densidade (LNEC E 64)	Diâmetros característicos (µm)		
	Se (m²/kg)	*ρ* (g/cm³)	D_{10}	D_{50}	D_{90}
CEM I	599	3,14	4,68	21,90	54,60
CV	740	2,36	3,53	24,00	109,00
POV	493	2,60	4,57	26,00	106,00

Quadro 2 – Composição química dos materiais com características pozolânicas

	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MnO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	RI	LOI
CEM I	62,7	3,06	20,25	4,43	-	2,01	3,11	-	0,76	0,25	1,23	2,74
CV	1,25	12,70	53,70	22,70	-	1,55	0,79	1,60	3,46	1,52	-	6,20
POV	11,8	1,3	69,2	2,3	0,1	1,0	-	-	0,9	13,4	-	-

2.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Após a caracterização dos materiais, foram produzidos diferentes tipos de argamassas que foram moldadas em provetes prismáticos, 40x40x160 mm. Considerando a utilização de diferentes tipos de material com características pozolânicas, optou-se for fixar a relação água/ligante (0,50) a fim de promover uma comparação coerente entre os resultados analisados. O espalhamento das argamassas produzidas foi verificado utilizando a EN 1015-3. A identificação, composição e espalhamento destas argamassas podem ser consultadas no Quadro 3. No que se refere ao espalhamento, observa-se valores mais elevados para as argamassas com substituição de cimento por materiais com características pozolânicas, CV and POV.

Quadro 3 – Identificação, composição e espalhamento das argamassas

ID	Substituição (%)	Cimento (kg/m^3)	CV (kg/m^3)	POV (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (kg/m^3)	Espalhamento (mm)
CEM	0	512	-	-	1335	256	152,33 (0,57)*
CV	25	384	96	-	1335	256	164,67 (0,57)
POV	25	384	-	106	1335	256	158,67 (1,15)

*Desvio padrão calculado com base em três medições

Após o preenchimento dos moldes com as misturas, estes foram cobertos com filme de plástico e armazenados em câmara húmida (18 ± 2ºC, 93 ±2% HR) durante 24 horas. Em seguida, os provetes de argamassa foram retirados dos moldes e divididos em dois grupos:

- Referência (R): foram colocados em um tanque com água da torneira saturada com cal até atingirem os 28 dias;

- Carbonatação (C): foram colocados em câmara de carbonatação (5 ± 0,1% CO_2, 25 ± 2ºC, 60 ±2% HR) durante 24 horas e, em seguida, colocados em um tanque com água da torneira saturada com cal até atingirem os 28 dias.

2.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Após o período de cura, 28 dias, foram realizados alguns ensaios com objetivo de avaliar o impacto dos diferentes materiais utilizados para produção das argamassas e dos diferentes tipos de cura nas suas propriedades no estado endurecido.

2.3.1 Resistividade elétrica

Para determinação da resistividade elétrica do provete de argamassa foi utilizado método das quatro pontas. Durante o teste, uma baixa frequência em corrente alternada (CA) é aplicada entre os dois eléctrodos exteriores, enquanto a tensão é medida nos dois eléctrodos interiores. A leitura foi

realizada imediatamente após a retirada do provete da água, para garantir que todos os provetes estivessem sob a mesma condição, neste caso, saturado. A sonda foi previamente calibrada e mergulhada num recipiente com água, em seguida pressionada sobre as superfícies dos provetes.Para este ensaio utilizou-se um equipamento RESIPOD, da marca Proceq.

2.3.2 Densidade aparente

Após a determinação da resistividade elétrica (de acordo com 2.3.1), as dimensões dos provetes foram medidas com o auxílio de um paquímetro, a fim de determinar a densidade aparente de cada provete de argamassa. Para tal, utilizou-se a Equação 01, onde o ρ é a densidade aparente em g/cm^3, o *M* é a massa em gramas e o *V* é o volume em cm^3.

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad \text{Equação 01}$$

2.3.3 Flexão e compressão

A pós a determinação da densidade aparente (de acordo com 2.3.2), os provetes de argamassa foram utilizados para determinação das resistências à flexão e compressão. O procedimento seguiu a EN 1015-11. De acordo com a norma, a resistência à flexão da argamassa é determinada pelo carregamento de três pontos sob o provete de argamassa endurecida até a sua ruptura. Já a resistência à compressão é determinada utilizando as duas partes resultantes do ensaio de resistência à flexão. Para realização do ensaio foi utilizada uma prensa hidráulica universal LOYD.

2.3.4 Carbonatação

Após a realização do ensaio de resistência à flexão, e antes do ensaio de resistência à compressão, a verificação da carbonatação foi executada utilizando as faces fraturadas dos provetes. Foi utilizado o método colorimétrico da aspersão de fenolftaleína. A superfície fraturada foi pulverizada com uma solução com 1% de fenolftaleína (indicador) e 70% de álcool etílico. A solução de fenolftaleína em meio com o pH inferior a 9, material carbonatado, permanece incolor. Ao contrário, a solução que entra em contacto com um meio de pH superior a 9, apresenta uma cor avermelhada (RILEM-CPC-18, 1988).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção será analisado o impacto dos diferentes materiais utilizados para produção das argamassas e dos diferentes tipos de cura nas suas propriedades no estado endurecido.

3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A Figura 2 apresenta os valores de resistividade elétrica determinados para as argamassas em estudo, após 28 dias de cura. Observa-se que tanto para a situação de referência, quanto para a situação carbonatada, os valores de resistividade apresentam pouca diferença entre si.

Por outro lado, quando se compara os valores de resistividade dos provetes de referência com os valores dos provetes carbonatados, é evidente a diferença entre eles, sendo os carbonatados a apresentarem maior resistividade elétrica. Este resultado vai ao encontro de estudos anteriores sobre resistividade em provetes carbonatados (Reis et al. 2014). Durante a carbonatação o CO_2 reage com o hidróxido de cálcio presente na matriz de cimento, formando carbonato de cálcio e água. O carbonato de cálcio é mais denso e menos poroso do que o hidróxido de cálcio, resultando em uma

estrutura mais compacta. Isso reduz a quantidade de caminhos disponíveis para a condução elétrica através dos poros preenchidos com água, aumentando a resistividade.

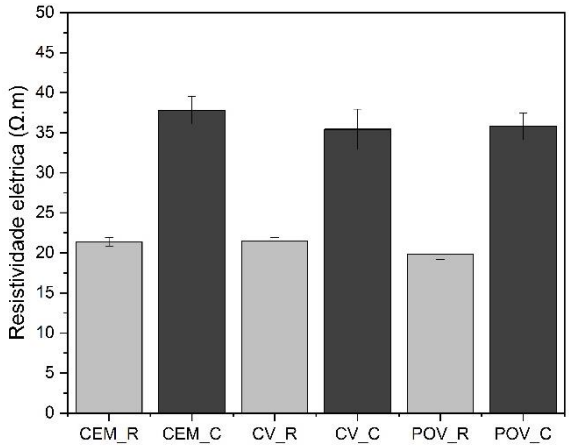


Figura 2 – Resistividade elétrica das argamassas aos 28 dias

3.2 DENSIDADE APARENTE

O Quadro 4 apresenta os valores de densidade aparente calculados para as diferentes argamassas em estudo, após 28 dias de cura.

Quadro 4 – Densidade aparente no estado saturado das argamassas aos 28 dias.

ID	Referência (g/cm^3)	Carbonatado (g/m^3)
CEM	2,18 (0,03)*	2,17 (0,03)
CV	2,16 (0,02)	2,17 (0,03)
POV	2,14 (0,01)	2,14 (0,00)

*Desvio padrão calculado com base em três amostras

Como se pode observar no Quadro 4, os valores de densidade aparente obtidos estão na mesma ordem de grandeza, tanto no que se refere à composição da argamassa, quanto no que se refere à condição de cura. Os desvios padrões são bastante reduzidos, o que valida o comportamento identificado. Contudo, no que se refere à composição, é possível observar uma ligeira tendência para redução da densidade aparente para as argamassas com substituição de cimento por materiais com características pozolânicas. Esta tendência também se verifica para a densidade aparente destes materiais (cimento, cinza volante e pó de vidro), como já apresentado no Quadro 1.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À FLEXÃO

Os resultados de resistência à compressão e à flexão, aos 28 dias, das argamassas estudadas são apresentados nas Figuras 3 e 4, respetivamente.

No que se refere à substituição parcial do cimento por materiais com características pozolânicas, observa-se uma redução na resistência à compressão, independentemente do tipo de cura. Esta redução é mais acentuada para os provetes submetidos à cura de referência (R), chegando a 30% para as CV e 40% para o POV. Este comportamento é o esperado e está relacionado com a menor quantidade de produtos de hidratação formados inicialmente, resultado da substituição parcial do cimento. Além disso, também se deve à natureza mais lenta das reações pozolânicas das CV e do

POV. No entanto, a longo prazo, provavelmente as CV e o POV devem contribuir para uma maior resistência e durabilidade devido ao desenvolvimento contínuo da microestrutura da argamassa. Neste contexto, os resultados alcançados aos 90 dias trarão um importante contributo para esta discussão.

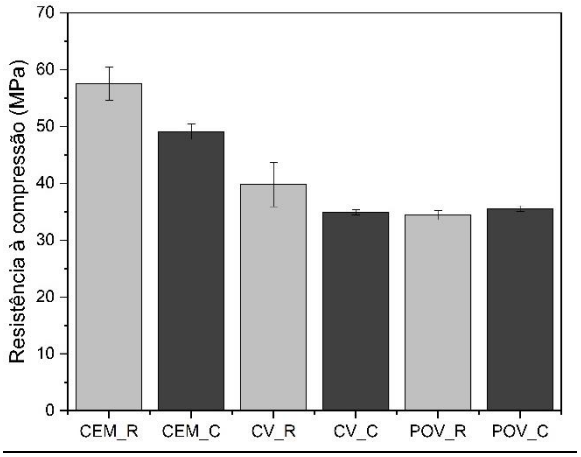


Figura 3 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias

Sobre o impacto do tipo de cura na resistência à compressão dos provetes, há uma tendência para uma redução na resistência dos provetes curados através da carbonatação acelerada (C) quando comparados aos provetes de referência (R). Esta redução é de 15% para os CEM e 12% para as CV. No caso dos POV, há uma ligeira tendência inversa, ou seja, aumento da resistência à compressão para os provetes curado através de carbonatação acelerada.

Considerando a existência de carbonatação nos provetes, identificada através da análise dos resultados de resistividade elétrica e, posteriormente, comprovada qualitativamente através da fenolftaleína, esperava-se que a alteração na microestrutura provocada pela carbonatação favorecesse a resistência à compressão, como verificado em outros estudos (Sharma e Goyal 2018). Contudo, para que se possa avaliar adequadamente este resultado, é importante conhecer melhor a estrutura porosa da zona carbonatada, sendo para isso necessário a realização de um ensaio de absorção de água ou um ensaio mais específico como a porosimetria por intrusão de mercúrio. Vários fatores podem ter influência no resultado alcançado, avançando-se 3 possíveis hipóteses. A primeira, devido aos parâmetros da câmara climática, durante o ataque por carbonatação. É usual a utilização de teores de CO_2 próximos dos 100%, durante horas ou até vários dias. Nesta investigação preconizou-se apenas 5 ± 0,1% CO_2 durante 24 horas. A segunda hipótese, deve-se à elevada taxa de substituição do cimento das misturas pozolânicas (25%). A terceira hipótese, devido à alteração precoce das condições de humidade interna nos provetes. Esta última hipótese já foi avalizada por Leea et al. (2016), no estudo de argamassas de cimento, sem substituição por material pozolânico, submetidas à cura por carbonatação acelerada. Os autores também observaram uma redução na resistência à compressão aos 28 dias quando comparada a situação de referência, possivelmente devido à redução da humidade interna pela reação precoce de carbonatação. Possivelmente, todos estes fatores concorrem para a efetiva redução da capacidade mecânica, após cura por carbonatação. Mas, admitindo que aos 28 dias a matriz cimentícia dos provetes produzidos apenas com cimento está bem consolidada (referência), provavelmente o reduzido teor de CO_2 será a causa mais importante.

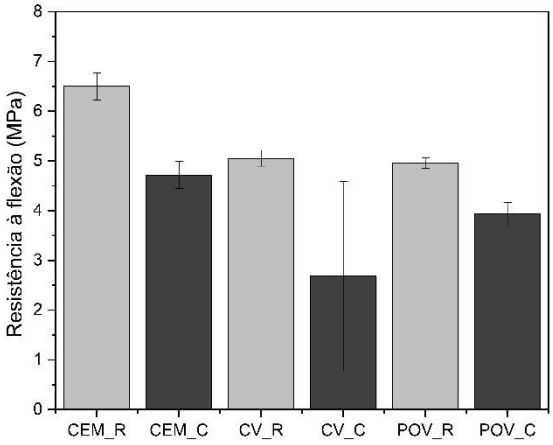


Figura 4 – Resistência à flexão das argamassas aos 28 dias

Assim como para o caso da resistência à compressão, também para resistência à flexão houve uma redução nos valores dos provetes com substituição parcial do cimento por materiais com características pozolânicas quando comparados aos de referência, independentemente do tipo de cura. Sobre o impacto do tipo de cura na resistência à flexão dos provetes observa-se uma redução, independentemente da utilização de materiais com características pozolânicas em substituição ao cimento. Para os CEM a redução é de 27%, para as CV é de 47% e para o POV é de 20%.

Considerando os dois ensaios apresentados neste item, resistência à compressão e à flexão, destaca-se o comportamento do POV quando comparado às CV. No que se refere à cura de referência, na compressão, há uma enorme proximidade entre os valores de CV (39,81 MPa) e POV (34,43 MPa). Já na resistência à flexão, os provetes com CV e com POV apresentaram valores idênticos (5,05 e 4,95 MPa, respectivamente) se considerarmos o desvio padrão. Estes valores corroboram o estudo de Moreira et al. (2023) que aponta para a possibilidade da utilização de POV em substituição às CV (escassas em alguns países da Europa devido ao encerramento das centrais termoelétricas). No caso da cura através da carbonatação acelerada, de uma maneira geral, observa-se que tanto para resistência à flexão, quanto para resistência à compressão, POV apresenta uma melhor resposta quando comparada às CV. No caso da compressão, não houve redução na resistência. No caso da flexão, a redução na resistência foi bastante inferior àquela sofrida pelas CV. Desta forma, também se verifica a possibilidade da utilização de POV em substituição às CV em processos de cura com recurso à carbonatação acelerada.

3.4 CARBONATAÇÃO

Importa verificar se o método utilizado para execução da CCA conduziu, de facto, à carbonatação dos provetes. Conforme explicado no item 2.3.4, a determinação da frente de carbonatação foi executada aos 28 dias, após a realização do ensaio de resistência à flexão, e antes do ensaio de resistência à compressão. A Figura 5 apresenta os resultados alcançados.

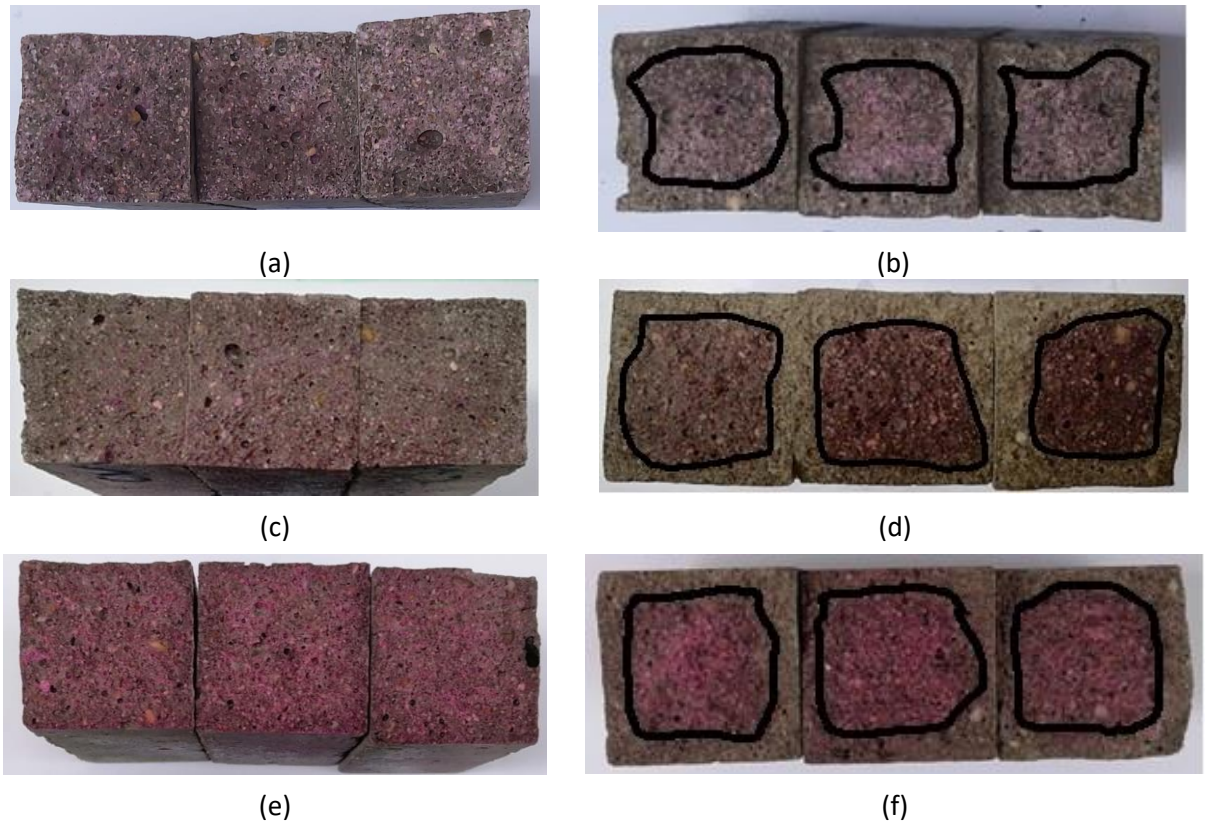


Figura 5 – Verificação da existência de carbonatação após 28 dias de cura: (a) CEM_R; (b) CEM_C; (c) CV_R; (d) CV_C; (e) POV_R; (f) POV_C.

A Figura 5 confirma que nos provetes de referência, como esperado, não há frente de carbonatação, ao contrário dos provetes submetidos à CCA. Todos os provetes submetidos à CCA foram carbonatados, independentemente da existência de CV ou POV. Estes valores vão ao encontro dos valores de resistividade elétrica apresentados na Figura 2, ou seja, os maiores valores de resistividade estão relacionados aos provetes carbonatados (Figura 5 (b)(d)(f)).

A profundidade da frente de carbonatação é similar para as três situações estudadas, com ligeira tendência decrescente no sentido: CV (maior frente), POV, CEM (menor frente). Este é um comportamento esperado uma vez que as CV possuem pouca resistência à carbonatação. A cinza volante, ao reagir no betão, consome hidróxido de cálcio em reações pozolânicas para formar outros produtos cimentícios como o C-S-H. Isso reduz a quantidade de $Ca(OH)_2$ disponível e, portanto, diminui a capacidade do betão de neutralizar o CO_2 que penetra no betão.

Importa perceber a estrutura porosa da zona carbonatada e o impacto que esta carbonatação possui nas propriedades do betão. Nesta fase da pesquisa, ainda exploratória, foi possível verificar que os provetes submetidos à CCA apresentaram uma redução nas suas resistências à compressão e à flexão.

4 CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um trabalho experimental exploratório com objetivo de avaliar o comportamento de argamassas sustentáveis submetidas à cura por carbonatação acelerada (CCA), contribuindo, assim, para alcançar a neutralidade carbónica na indústria do cimento.

Após 28 dias de cura das argamassas produzidas com cimento (CEM) e daquelas com substituição de 25% do cimento por cinza volante (CV) ou por pó de vidro (POV), os resultados de resistência à compressão obtidos mostram-se promissores. Apesar de se verificar uma redução na resistência à compressão para os provetes submetidos à CCA quando comparados aos de referência para as argamassas CEM e com CV, esta redução nunca ultrapassou os 15%. No caso das argamassas com POV, esta redução não se verificou, sendo os valores alcançados muito similares para as duas situações. Destaca-se ainda o comportamento positivo das argamassas com POV face ao das argamassas com CV.

Espera-se que os resultados de resistência à compressão aos 90 dias sejam ainda mais promissores, com tendência para inversão da situação no que diz respeito à redução da resistência à compressão. A idade dos 90 dias, como se sabe, é bastante relevante para os provetes com CV e POV devido ao processamento das reações pozolânicas.

Tratando-se, neste caso, de um estudo ainda em fase exploratória, espera-se que a sua continuidade apresente o comportamento das argamassas aos 90 dias, além duma caracterização aprofundada da estrutura porosa dos materiais estudados, com recurso ao MIP e ao DRX.

REFERÊNCIAS

ASTM C1866/C1866M-22 (2020). Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete.

International Energy Agency: IEA (2024). Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach, https://www.iea.org/reports/cement-3, acesso 30 de maio 2024.

Kamal, M.L.N.; Itam, Z.; Sivaganese, Y.; Beddu, S. (2020) Carbon dioxide sequestration in concrete and its effects on concrete compressive strength. Materials Today: Proceedings, 31: A18–A21.

Leea, J.-C. et al. (2016). The application of CO_2 in the curing process of cement brick products. Journal of Ceramic Processing Research., 17 (1): 17–25.

Matos, A.M.; Sousa-Coutinho, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials, 36: 205-215.

Moreira, B.; Jesus, C.; Malheiro, R.; Camões, A. (2023). Using Glass Waste for Producing Low CO_2 Cementitious Material as a Contribution to Circular Economy. Romanian Journal of Materials, 53(4): 297-305. https://solacolu.chim.upb.ro/pg297-305.pdf

Moreira, O.; Camões, A.; Malheiro, R.; Jesus, C. (2024) High Glass Waste Incorporation towards Sustainable High-Performance Concrete. CivilEng, 5: 41-64. https://doi.org/10.3390/civileng5010003

Nassar, R. U. D.; Soroushian, P.; Sufyan-Ud-Din, M. (2021). Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. Case Studies in Construction Materials, 15. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00745

Olofinnade, O. M.; Ndambuki, J. M.; Ede, A. N.; Booth, C. (2017). Application of Waste Glass Powder as a Partial Cement Substitute towards more Sustainable Concrete Production. International Journal of Engineering Research in Africa, 31:2017-2020. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.31.77

Reis, R.; Malheiro, R.; Camões, A.; Ribeiro, M. (2014) Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (ISSN 2183-1866), Guimarães, Portugal, p.49-59 - v.3.

Rilem, T.C. (1988) CPC-18 RILEM RECOMMENDATION: CPC-18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth. Materials and Structures, 21: 453–455.

Sharma, D.; Goyal, S. (2018). Accelerated carbonation curing of cement mortars containing cement kiln dust: An effective way of CO_2 sequestration and carbon footprint reduction. Journal of Cleaner Production, 192: 844-854.

Zhang, D.; Shao, Y. (2016) Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. Construction and Building Materials, 123: 516–526.

Zhang, D.; Ghouleh, Z.; Shao, Y. (2017). Review on carbonation curing of cement-based materials. Journal of CO_2 Utilization, 21: 119–131.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFICIÊNCIA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS À BASE DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO E ÁCIDO TÂNICO EM FIBRAS DE AÇAÍ PARA SUA UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL DE REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Juliana Fadini Natalli[a]; Iully da Silva Amaral Pereira[b]; Geórgia Amaral Mothé[c]; Felipe Augusto Santos Ferreira[d]; Afonso Rangel Garcez de Azevedo[e]

[,a] [a]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego, 28013-602, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, juliananatalli24@gmail.com

[b]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego, 28013-602, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, iullysamaral@gmail.com

[c]Institutos Superiores do Censa, Rua Voluntários da Pátria, 28035-310, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, georgiamothe@isecensa.edu.br

[d]Institutos Superiores do Censa, Rua Voluntários da Pátria, 28035-310, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, felipe.ferreira@isecensa.edu.br

[e]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego, 28013-602, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, afonso@uenf.br

RESUMO

Motivados a contribuir com práticas mais sustentáveis para a construção civil e desenvolver novos materiais com boas propriedades e custo reduzido, estudos vêm sendo realizados para o reaproveitamento de fibras vegetais em materiais de construção. Essas fibras, compostas majoritariamente por celulose, lignina e hemicelulose, conferem incremento de resistência à tração, abrasividade e módulo de elasticidade nos compósitos cimentícios. No entanto, uma desvantagem inerente desse material é a sua hidrofilicidade, a durabilidade em matrizes de elevada alcalinidade, como as cimentícias, a degradação térmica e o conteúdo orgânico. Diversos tratamentos superficiais vêm sendo estudados a fim de reduzirem e/ou eliminarem essas desvantagens, como o com hidróxido de sódio (NaOH) e com o ácido tânico ($C_6H_{52}O_{46}$). O presente estudo propõe o tratamento de fibras de açaí (*Euterpe oleracea)*, com a utilização de NaOH e $C_6H_{52}O_{46}$ com concentrações de 5,0% em volume. Após o tratamento, as fibras foram submetidas a análises de Difração de Raios-X, Análise termogravimétrica e Tensiometria. Os resultados apontam bom desempenho de ambos os tipos de tratamento para a utilização das fibras como reforço em matrizes cimentícias, no sentido de aumento do índice de cristalinidade e hidrofobicidade do material.

Palavras-chave: fibra de açaí, tratamento superficial, compósito cimentício, reforço.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que um edifício, desde o início de sua construção, está sujeito diariamente a diversos tipos de solicitações, como as estruturais e as térmicas (Antunes & Masuero, 2016). Dessa forma, as argamassas de revestimento estão submetidas a constantes tensões de tração provenientes dos movimentos diferenciais dos componentes construtivos.

As matrizes cimentícias não se deformam plasticamente e o alívio de tensões para superar o limite de resistência à tração causa fratura do compósito, podendo gerar como consequência patologias e descolamento da alvenaria (Antunes & Masuero, 2016). Contínuos estudos vêm sendo realizados a fim de melhorar as características de matrizes cimentícias quanto a baixa resistência à tração (Farinha, De Brito, & Veiga, 2021; Supit, Nishiwaki, Shaikh, Boonserm, & Rahman, 2024; de Lima, et al., 2024). Uma solução para essa questão foi a adição de fibras aos compósitos cimentícios, que devem ser distribuídas uniformemente em toda a mistura para que no estado endurecido sejam capazes de formar uma rede tridimensional (Meena & Ramana, 2022). Esses materiais de reforço tem a capacidade de "costurar" toda matriz proporcionando aumento significativo da resistência à tração (Aisyah, et al., 2021; Lima, et al., 2022) e, como consequência prevenir a formação e o desenvolvimento de fissuras (Antunes & Masuero, 2016; Akhmetov, et al., 2022).

As fibras são classificadas quanto a sua origem, podendo ser sintéticas (aço, vidro, carbono e poliméricas) ou naturais (vegetais, minerais e siliciosas) (Marvila, et al., 2021; Liang, Mao, Yan, Liu, & Zhou, 2022).

As fibras vegetais consistem em microfibrilas ricas em celulose e incorporadas em uma matriz de hemicelulose e lignina (parte amorfa do material) dispostas em três camadas de diferentes espessuras (Mokhothu & John, 2015). Elementos como pectina, cera e gordura podem ser encontrados na camada mais externa desses tipos de fibras (Mokhothu & John, 2015). É importante mencionar que a celulose é o composto cristalino constituinte que apresenta a maior rigidez e, portanto, contribui para a resistência à tração da fibra (Eder & Burgert, 2010).

Embora as fibras vegetais apresentem vantagens como a densidade relativamente baixa, ampla disponibilidade, biodegradabilidade e baixo custo (Azevedo, et al., 2022), uma outra característica problemática se deve à sua hidrofilicidade e a durabilidade em matrizes de elevada alcalinidade, como as cimentícias (Marvila, et al., 2020; Azevedo, et al., 2021). Como alternativa para a utilização desses materiais como reforço, tratamentos químicos vem sendo realizados nas superfícies das fibras, destacando-se aqui os feitos à base de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido tânico ($C_{76}H_{52}O_{46}$).

O tratamento com NaOH é capaz de remover grande parte de hemicelulose, lignina, pectinas, cera e óleo que representam os componentes mais solúveis da fibra capazes de retardar a pega do cimento Portland (Ahmad & Zhou, 2022). Além disso, a remoção desses constituintes provoca um aumento do espaço interfibrilar, ocasionando em uma melhora da aderência fibra-matriz. Esse tratamento também é capaz de tornar a superfície da fibra mais hidrofóbica devido à combinação dos grupos hidroxila da celulose com os do reagente NaOH (Ahmad & Zhou, 2022).

O ácido tânico é um polifenol natural que ocorre em várias plantas e frutos (Pawłowska, Stepczy´nska, & Walczak, 2022). Estudos mostram que esse ácido é capaz de criar uma película de revestimento na superfície das fibras capaz de fazer um envelopamento das microfibrilas, como também tornar a superfície das fibras mais áspera (Mohammadi, et al., 2023). O presente estudo propõe analisar a eficiência dos tratamentos em questão em fibras de açaí (*Euterpe oleracea Mart*) com concentrações de 5% em volume. Para tanto, foram realizadas Difrações de Raios-X, Análise termogravimétrica e Tensiometria. Dessa forma, essa pesquisa contribui para a viabilidade da

utilização de fibras sustentáveis na produção de argamassas de revestimento, como também propõe uma alternativa para a utilização de um resíduo agroindustrial amazônico sem destinação específica.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

As fibras de açaí foram coletadas a partir da semente da fruta, considerada como um subproduto da polpação de açaí. O material foi cedido por uma agroindústria localizada no município de Alto Rio Novo (Espírito Santo, Brasil). O açaí produzido nessa região apresenta similaridade com o processado na região amazônica (Azevedo, et al., 2021). As fibras foram obtidas manualmente (Figura 1) e, após o processamento, o material foi lavado em água corrente e seco em estufa a 60° C por um período de 24 horas. Após a completa secagem, uma parte das fibras foi submetida ao tratamento com NaOH (HS), uma outra parte ao tratamento com $C_6H_{52}O_{46}$ (AT) e a quantidade restante permaneceu sem nenhum tipo de tratamento superficial (ST). A Tabela 1 mostra as propriedades físicas da fibra de açaí sem tratamento superficial.

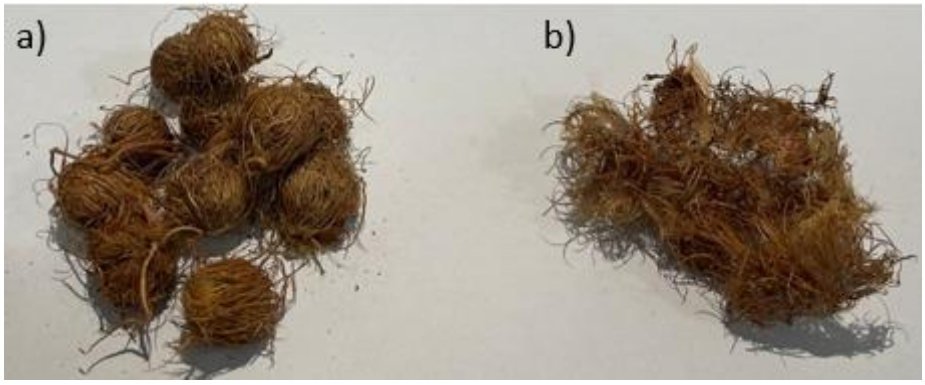


Figura 1 – Resíduo da produção de açaí: a) caroço e b) fibras.

Tabela 1 – Propriedades físicas da fibra natural de açaí.

Propriedades físicas	Resultados	Coeficiente de variação (%)
Densidade (g/cm³)	1,4	0,51
Resistência à tração (MPa)	18	14,02
Módulo de elasticidade (GPa)	16	10,30

2.2 TRATAMENTO DAS FIBRAS

O tratamento químico com o NaOH seguiu os mesmos procedimentos estabelecidos por Azevedo et al., (2021) e consistiu em submergir as fibras obtidas em solução aquosa com concentração de 5% em volume, por um intervalo de tempo de 60 minutos em temperatura de 23° C. Após esse período,

as amostras foram neutralizadas com HCl até que o pH da solução se aproximasse de 7,0. Posteriormente, as fibras foram lavadas cautelosamente e secas à temperatura de 23° C.

O tratamento com ácido tânico seguiu os protocolos de Pawlowska et al., (2022) consistiu em secar as fibras por 12 horas em estufa a uma temperatura de 60° C. Em seguida, as fibras foram submersas em soluções com concentração em volume de 5% por 12 horas. Após esse procedimento, as fibras foram secas em temperatura de 23° C por mais um período de 12 horas. Finalmente, o material foi posto em estufa a 60° C por um intervalo de 30 horas.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

Após o tratamento, as fibras foram cominuídas em moinho de alta eficiência da marca Retsch e modelo MM 500 até uma dimensão máxima característica de 75 µm e caracterizadas a partir de Difração de Raios-X, Análise termogravimétrica (TG/DTA) e tensiometria.

As análises de DRX foram realizadas em difratômetro da marca AXRD com radiação de cobre (Cu-Kα) e varredura de 2θ variando de 5° a 70°. Após as análises foram calculados os índices de cristalinidade das fibras, de acordo com a Equação 1 (Segal, Creely, Martin, & Conrad, 1959):

$$CrI = \frac{(I_{22,8^\circ} - I_{18^\circ})}{I_{22,8^\circ}} \text{ x } 100 \qquad \text{Equação 1}$$

As análises termogravimétricas (TG/DTA) foram obtidas de um equipamento DTG-60H Shimadzu, de 25 a 1100º C, passo de 10 ºC/min^{-1} e atmosfera inerte de N_2 (25 ml min^{-1}).

Para as análises de tensiometria foram, inicialmente, produzidas pastilhas em uma prensa hidráulica Shimadzu à 80 kN com vácuo (Figura 2). Posteriormente, uma sequência de imagens referentes ao ângulo de contato entre água e pastilha foram geradas a partir de um tensiômetro da marca Surface Electro Optics (SEO), modelo Phoenix-MT (M, A, T).

Figura 2 – Pastilhas para a análise de tensiometria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DRX

Os resultados do DRX das fibras de açaí tratadas e não tratadas são mostrados na Figura 3. Verifica-se uma região cristalina na microestrutura da fibra a 22,8° associada à celulose. Um halo amorfo relacionado à hemicelulose e à lignina é observado a 18°.

Os resultados de índice de cristalinidade (CrI), calculado de acordo com protocolos de Segal et al., 1959, apontam que CrI(fibra HS) equivale a 36% e o CrI (fibra ácido tânico) é igual a 33%. As fibras

após ambos os tratamentos superficiais atingem uma cristalinidade superior à fibra ST, que apresenta CrI (fibra ST) equivalente a 27%. Dessa forma, constata-se a eficiência dos tratamentos, responsáveis por eliminar grande parte da hemicelulose e pectina da superfície da fibra (materiais amorfos) facilmente dissolvidos na matriz no estado fresco provocando o retardo da pega do cimento e podendo comprometer as reações de hidratação. Após os tratamentos, de acordo com os resultados de DRX e os índices de cristalinidade obtidos, verifica-se que a superfície da fibra apresenta majoritariamente celulose, componente mais resistente da fibra (Aquino, Silva, Marvila, & Azevedo, 2022).

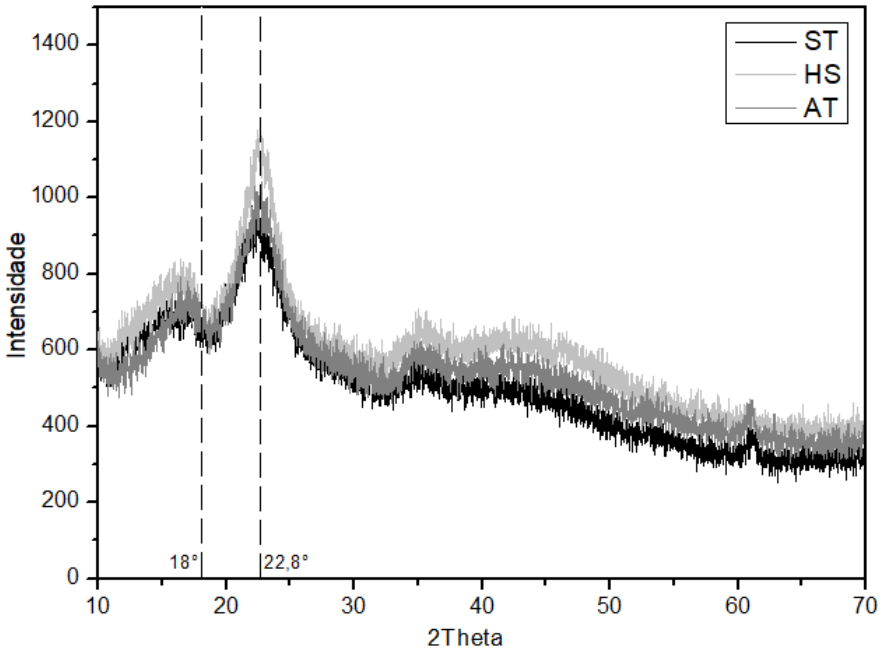


Figura 3 – Difratogramas das fibras de análise.

3.2 TG/DTA

Observa-se a partir das curvas termogravimétricas derivadas – DTG (Figura 4) que há três picos principais relacionados à decomposição das fibras de açaí. O primeiro evento está relacionado com a perda de água do material, o segundo, que ocorre por volta de 200° C a 400° C, está associado à degradação térmica da hemicelulose e celulose e por fim, o último pico por volta de 400° C a 600° C é atribuído à degradação da lignina, componente mais difícil de ser decomposto (Tomczak, et al., 2007). Verifica-se a partir das curvas que, no caso das fibras tratadas com ácido tânico, as degradações dos compostos orgânicos mencionados ocorrem em temperaturas mais altas, comparados aos materiais ST e HS. Isso indica uma maior estabilidade térmica das fibras AT que pode estar associada, principalmente, à membraba de revestimento na superfície das fibras capaz de promover o envelopamento das microfibrilas (Mohammadi, et al., 2023).

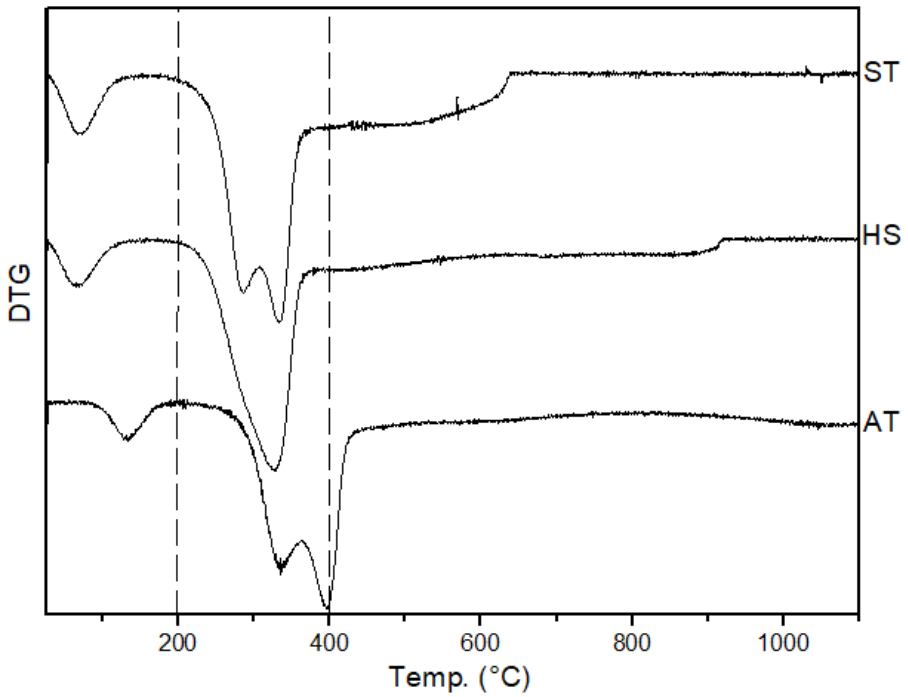


Figura 4 – Curvas DTG das fibras de estudo.

3.3 TENSIOMETRIA

A Figura 5 mostra uma série de medições com o tempo do ângulo de contato entre a água e as pastilhas. A Figura 6 mostra a primeira interação entre a superfície da pastilha e a água em que foi feita a primeira medição do ângulo de contato. Essa grandeza é definida como o ângulo entre o plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado.

Essa grandeza representa a molhabilidade do material testado, sendo portanto quanto maior o ângulo, menor a molhabilidade do material e , consequentemente, maior sua hidrofobicidade. A partir dos resultados, verifica-se que nos primeiros instantes, a molhabilidade das fibras tratadas com NaOH foram um pouco superiores comparada a das fibras sem nenhum tipo de tratamento superficial. Isso se deve, principalmente a remoção de uma parcela dos componentes solúveis como a hemicelulose, lignina, pectina, ceras e óleos (Ahmad & Zhou, 2022). Além disso, esse tratamento torna a superfície da fibra mais hidrofóbica devido à combinação dos grupos hidroxila da celulose com os do reagente NaOH (Ahmad & Zhou, 2022).

Por outro lado, observa-se que o ângulo de contato entre as fibras tratadas com o ácido tânico e a água permaneceu superior aos demais durante todo o período da análise. Sugere-se que essa diferença se dê, sobretudo, devido a formação da película protetora criada na superfície da fibra por esse composto, uma vez que os resultados anteriores de DRX demonstraram que o hidróxido de sódio também foi bastante eficiente no sentido de remoção de parte da hemicelulose e pectina da remoção da superfície das fibras.

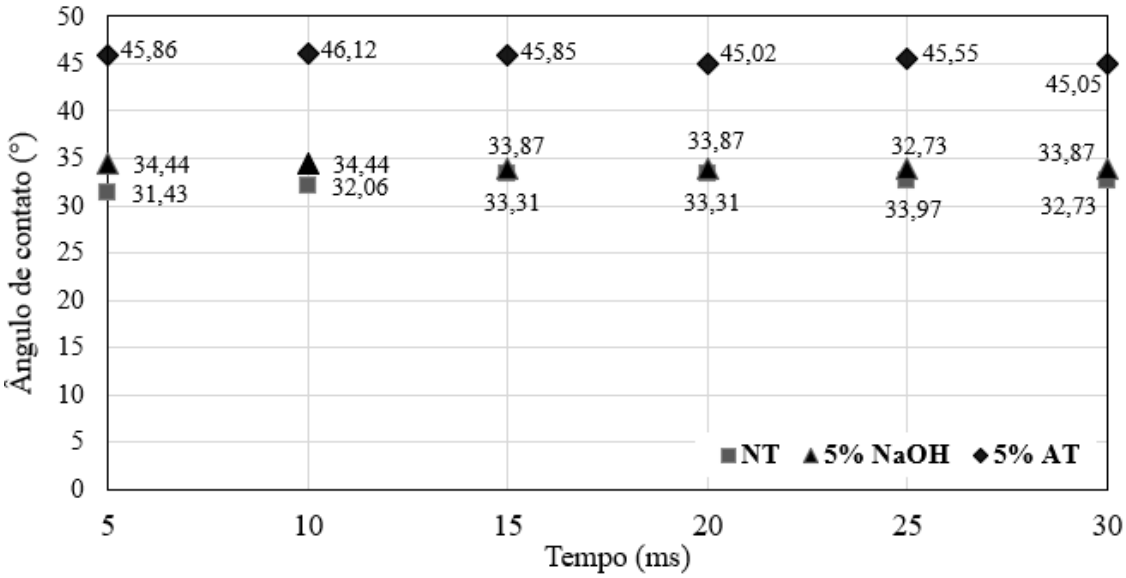


Figura 5 – Medições do ângulo de contato fibra/água em um intervalo de tempo.

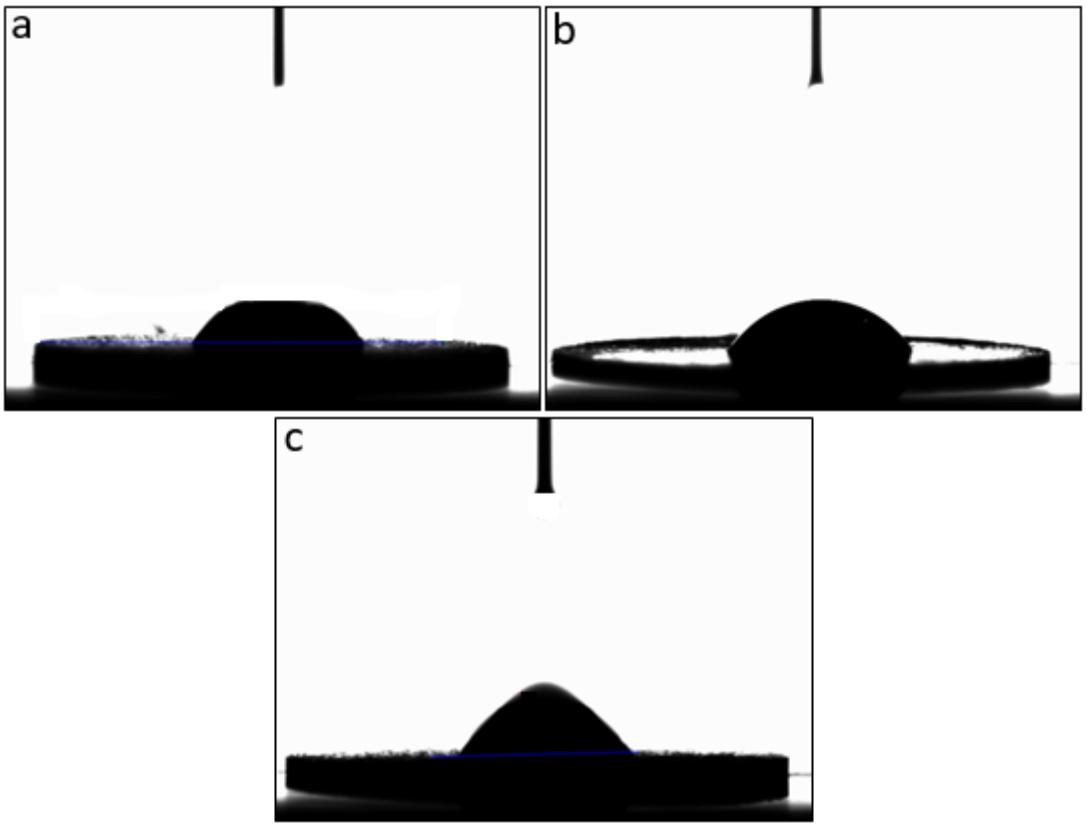


Figura 6 – Primeira interação observada entre a água e as pastilhas: a) ST; b) HS e c) AT.

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões são assim resumidas:

- As fibras após ambos os tratamentos com hidróxido de sódio e ácido tânico atingem uma cristalinidade superior à fibra sem nenhum tipo de tratamento superficial. Isso demonstra o bom desempenho dos compostos químicos no sentido de remoção de óleos, ceras e, possivelmente, parte da pectina, hemicelulose e lignina da superfície das fibras;
- A membrana de revestimento criada na superfície da fibra de açaí por meio do ácido tânico promoveu aumento da estabilidade térmica e hidrofobicidade do material;
- Certamente, a utilização de um desses tratamentos garantirá o aumento da durabilidade da fibra como reforço em matrizes cimentícias e redução de problemas relacionados com o retardo da pega do cimento.

REFERÊNCIAS

AHMAD, J., & ZHOU, Z. (2022). MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL AS WELL AS SYNTHETIC FIBER REINFORCED CONCRETE: A REVIEW. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 333*, 127353.

Aisyah, H., Paridah, M., Sapuan, S., Ilyas, R., Khalina, A., Nurazzi, N., . . . Lee, C. (2021). A comprehensive review on advanced sustainable woven natural fibre polymer composites. *Polymers, 13*(3), 471.

Akhmetov, D., Akhazhanov, S., Jetpisbayeva, A., Pukharenko, Y., Root, Y., Utepov, Y., & Akhmetov, A. (2022). Effect of low-modulus polypropylene fiber on physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials, 16*, e00814.

Antunes, G., & Masuero, A. (2016). Flexural tensile strength in mortar coating reinforced with different types of metal mesh: A statistical comparison. *Construction and Building Materials, 121*, pp. 559-568.

Antunes, G., & Masuero, A. (2016). Flexural tensile strength in mortar coating reinforced with different types of metal mesh: A statistical comparison. *Construction and Building Materials, 121*(15), 559-568.

Aquino, L., Silva, T., Marvila, M., & Azevedo, A. (2022). Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime . *Construction and Building Materials, 353*(24), p. 129111.

Azevedo, A., Lima, T., Reis, R., Oliveira, M., Candido, V., & Monteiro, S. (2022). Guaruman fiber: A promising reinforcement for cement-based mortars. *Case Studies in Construction Materials, 16*, e01029.

Azevedo, A., Marvila, M., Tayeh, B., Cecchin, D., Pereira, A., & Monteiro, S. (2021). Technological performance of açaí natural fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Engineering, 33*, 101675.

de Lima, T., Natalli, J., Marvila, M., Candido, V., da Silva, A., & Azevedo, A. (2024). Potentiality of using guarumã natural fiber (Ischinosiphon koern) in sustainable coating mortars. *Journal of Materials Research and Technology, 30*, pp. 1301-1309.

Eder, M., & Burgert, I. (2010). Natural fibres - function in nature. *Industrial applications of natural fibres - structure, properties and technical applications. Chichester: John Wiley & Sons*.

Farinha, C., De Brito, J., & Veiga, R. (2021). Incorporation of high contents of textile, acrylic and glass waste fibres in cement-based mortars. Influence on mortars' fresh, mechanical and deformability behaviour. *Construction and Building Materials, 303*, p. 124424.

Liang, N., Mao, J., Yan, R., Liu, X., & Zhou, X. (2022). Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack. *Case Studies in Construction Materials, 16*, p. e01065.

Lima, T., Azevedo, A., Marvila, M., Candido, V., Fediuk, R., & Monteiro, S. (2022). Potential of Using Amazon Natural Fibers to Reinforce Cementitious Composites: A Review. *Polymers, 14*, 647.

Marvila, M., Azevedo, A., Cecchin, D., Costa, J., Xavier, G., do Carmo, D., & Monteiro, S. (2020). Durability of coating mortars containing açaí fibers. *Case Studies in Construction Materials, 13*.

Marvila, M., Rocha, H., Azevedo, A., Colorado, H., Zapata, J., & Vieira, C. (2021). Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: concepts and applications . *Innovative Infrastructure Solutions, 6*(3).

Meena, A., & Ramana, P. (2022). Mechanical characteristics appraisal for polypropylene fiber concrete via mathematical models. *Materials Today: Proceedings*, Article in Press.

Mohammadi, M., Rezaie, A., Liebscher, M., Köberle, T., Drechsler, A., Frenzel, R., . . . Mechtcherine, V. (2023). Interfacial properties of high-strength, limestone-calcined clay cement (LC3) matrix and PE fibers, surface-modified using dopamine and tannic acid. *Construction and Building Materials, 408*(8), p. 133537.

Mokhothu, T., & John, M. (2015). Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. *Carbohydrate Polymers, 131*(20), pp. 337-354.

Pawłowska, A., Stepczy´nska, M., & Walczak, M. (2022). Industrial Crops & Products. *Flax fibres modified with a natural plant agent used as a reinforcement for the polylactide-based biocomposites, 184*, p. 115061.

Pedrazzi, C., Dick, G., Coldebella, R., Gentil, M., Giesbrecht, B., & da Rosa, R. (2019). *Química da Madeira* (1a ed.). Universidade Federal de Santa Maria.

Segal, L., Creely, J., Martin, A., & Conrad, C. (1959). An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal, 29*.

Supit, S., Nishiwaki, T., Shaikh, F., Boonserm, K., & Rahman, S. (2024). Influences of hybrid fiber-reinforcement using wollastonite and cellulose nanofibers on strength and microstructure characterization of ultra-high-performance mortar. *Construction and Building Materials, 423*, p. 135802.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DE ETICS - A INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE NANOMATERIAIS EM REVESTIMENTO DE COR ESCURA

Bruno Santos[a]; Marco Frazão Pedroso[b]; Rita Carvalho Veloso[c,d]; Andrea Souza[c]; Daniela Silva[a]; Nuno M. M. Ramos[c] Joana Maia[c]

[a]Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201909855@up.pt, up202106385@edu.fe.up.pt

[b]CERIS (IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal) e AECycle, Lda. (Rua de São Miguel, n39, 2640-741, Mafra, Portugal), marco.pedroso@tecnico.ulisboa.pt

[c]CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, joanamaia@fe.up.pt, up201001431@edu.fe.up.pt, andrea.souza@fe.up.pt, nmmr@fe.up.pt

[d]IFIMUP, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal, up201001431@edu.fe.up.pt

RESUMO

As fachadas dos edifícios desempenham um papel crucial na durabilidade, conforto dos ocupantes e na eficiência energética, mas enfrentam desafios crescentes devido ao agravamento das alterações climáticas. Em Portugal, a preferência pela cor escura nos revestimentos é cada vez mais usual, apesar da mesma contribuir para um aumento da absorção solar e consequente aceleração da degradação.

A incorporação de nanomateriais em revestimentos de ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*) permite aumentar a reflexão da radiação solar sem comprometer significativamente a cor, podendo melhorar a durabilidade. No entanto, existe ainda pouca informação relativa ao impacte ambiental da incorporação destes nanomateriais em revestimentos para ETICS. Como tal, este estudo foca-se na avaliação do impacte ambiental de diferentes sistemas ETICS e destes revestimentos inovadores, que procuram não só melhorias óticas e térmicas, mas também procuram ser uma alternativa com menores impactes ambientais em todo o seu ciclo de vida comparativamente a revestimentos convencionais, considerando a possível redução dos consumos energéticos em fase de operação.

Este estudo insere-se no projeto NIRWall – BIP PROOF, financiado pela Universidade do Porto, que visa estabelecer um elo entre investigação laboratorial e aplicação prática na indústria da construção, através de provas de conceito de práticas mais eficientes, sustentáveis e inovadoras.

Palavras-chave: Impacte ambiental, Sustentabilidade, ETICS, Nanomateriais, Revestimentos

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas, uma preocupação global em crescente destaque, têm motivado respostas de vários setores e entidades, incluído da União Europeia (UE), que traçou um conjunto de estratégias com o objetivo de mitigar os seus impactes. Entre as estratégias traçadas, destaca-se a neutralidade climática até 2050. Para este objetivo ser atingidos a UE está focada na redução da utilização de energias não renováveis e na redução de emissões de gases com efeito de estufa (Pedroso *et al.* 2023). Para que tal seja possível, é necessário um esforço de todos os setores da indústria, principalmente do setor da construção e ambiente construído, pois este, a nível europeu é o principal responsável pelas emissões de gases com efeito de estufa e pelo consumo de energia – aproximadamente 37% e 40%, respetivamente (Global Alliance for Builings and Construction 2020)**,** sendo também um dos maiores produtores de resíduos, contribuindo com cerca de 35% da produção total de resíduos (Villoria Sáez *et al.* 2019).

Estes dados destacam a urgência do setor em criar produtos inovadores e com elevado desempenho, capazes de promover edifícios eficientes energeticamente e, ao mesmo tempo, confortáveis para os ocupantes (impactando o vetor social da sustentabilidade). Estes produtos devem minimizar o impacte ambiental (Pedroso *et al.* 2023), enquanto promovem estratégias para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, incluindo a diminuição do uso de combustíveis fósseis (Lou *et al.* 2022). Além disso, há uma crescente necessidade de reciclar materiais, que até agora eram apenas descartados como resíduos, na produção de novos materiais. Muitas dessas medidas são amplamente identificadas na literatura especializada, principalmente:

- Reabilitação do ambiente construído: visto que grande parte é antigo (Varela Luján *et al.* 2019), o que leva a que esses edifícios apresentem eficiência energética e conforto dos ocupantes insatisfatórios;
- Otimização da utilização de recursos naturais não renováveis e redução dos resíduos resultantes do fim de vida dos edifícios: esta estratégia passa por reutilização de alguns dos materiais resultantes do fim de vida dos edifícios e utilização de recursos naturais renováveis (Vitale *et al.* 2017).

Deste modo, as melhorias em termos de sustentabilidade para a renovação do ambiente construído devem ser consideradas tendo em conta os impactes ambientais relacionados com a produção dos materiais. Atualmente, existe uma série de produtos com menor impacte ambiental que podem facilitar a reabilitação dos edifícios também com um menor impacte ambiental, entre os quais, os considerados biomateriais, como madeira e cortiça, e também os materiais reciclados, entre outros (Baptista *et al.* 2024). Um desses materiais, por exemplo, é o aglomerado de cortiça negra (ICB), um isolante termo- acústico de origem natural, produzido através de cortiça-falca (Sara Cristina da Silva Quintas 2015).

Para que seja possível efetuar a análise dos impactes ambientais de um produto ou sistema, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a metodologia mais utilizada, a qual tem em consideração todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima no estado bruto até ao fim de vida. Aqui, podem ainda ser consideradas etapas como: processos de manufatura, transporte entre outros. Ou seja, há uma análise detalhada de todo o processo para avaliar de forma mais completa e correta os impactes ambientais (Baptista *et al.* 2024). A consideração das diferentes etapas depende da fronteira do sistema que for considerada. Com esta metodologia, é possível identificar as vantagens e desvantagens de cada solução ao nível dos impactes ambientais, recursos utilizados, resíduos, efluentes e emissões geradas durante o seu ciclo de vida.

O objetivo principal deste artigo consiste na análise comparativa do impacte ambiental de sistemas de isolamento térmico pelo exterior (*External Thermal Insulation Composite System* – ETICS) e de revestimentos escuros com nanomateriais refletantes. Numa primeira fase, será então avaliado o impacte ambiental de ETICS exatamente iguais entre si, com a exceção da camada de isolamento térmico utilizado e da sua espessura, variando entre Poliestireno Expandido Moldado (EPS), Lã Mineral (MW) e Aglomerado Negro de Cortiça Expandida (ICB). Posteriormente, será analisado o impacte ambiental da incorporação dos nanomateriais no revestimento escuro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 SISTEMAS EM ESTUDO

2.1.1 Enquadramento

O estudo focou-se na análise do impacte ambiental de um sistema ETICS, constituído pelas seguintes camadas: argamassa de colagem do isolante térmico, isolamento térmico EPS 100 com 4 cm de espessura (20 kg/m^3), duas camadas de argamassa de revestimento/regularização com uma camada de reforço de rede de fibra de vidro e por último o revestimento final. A escolha deste sistema como referência está relacionada com um estudo de envelhecimento natural no âmbito do projeto NIRWall, em que este trabalho se insere. Além disso, esta é uma das soluções de ETICS mais procuradas e aplicadas, devido à boa relação custo-benefício (Silvestre *et al.* 2019).

2.1.2 Fase 1 – Influência da camada de isolamento térmico

A primeira fase do estudo consistiu em analisar os impactes ambientais do sistema de referência (EPS) e compará-lo com outros dois sistemas, apenas com material isolante térmico diferente: a lã mineral (MW) e o aglomerado negro de cortiça expandida (ICB) (SAINT-GOBAIN 2024).

A escolha deste dois isolantes térmicos para comparação, prendeu-se com o facto de a lã mineral ser o isolamento mais utilizado depois do EPS (Veiga *et al.* 2010) e o aglomerado de cortiça ser de origem natural (Sara Cristina da Silva Quintas 2015). Apresentam-se no Quadro 1 a condutibilidade e resistência térmicas, de acordo com as espessuras definidas, para os isolamentos térmicos selecionados. Este facto prende-se com a importância em garantir uma correta comparação entre os sistemas, alterando-se a espessura de isolamento térmico tal que resultasse numa resistência térmica igual para os 3 sistemas em estudo. Como as espessuras obtidas não são comercializadas, realizou-se uma análise considerando uma espessura comercializável aproximada (6 cm). Assim, é possível realizar duas análises entre os três sistemas, uma onde a resistência térmica é igual e outra onde a espessura do isolante térmico é igual.

Quadro 1 – Condutibilidade e resistência térmica dos isolamentos em estudo (Luís Matias 2006)

Material Isolante	Densidade (ρ) [kg/m^3]	Condutibilidade Térmica (λ)[W/m.ºC]	Espessura (e) [m]	Resistência Térmica (R) [m^2.ºC/W]
EPS	15-20	0,040	0,040	1,00
			0,060	1,50
MW	100-180	0,042	0,042	1,00
			0,060	1,43
ICB	90-140	0,045	0,045	1,00
			0,060	1,33

2.1.3 Fase 2 – Influência da incorporação de nanomateriais na camada de acabamento

A Fase 2 consistiu na avaliação dos impactes da incorporação de nanomateriais com reflectância no infravermelho próximo na camada de acabamento do sistema de referência (EPS). Os nanomateriais considerados consistem num nanocompósito polimérico, sintetizado em laboratório, no âmbito de uma tese de doutoramento em curso, composto por óxido de cobre (II) e dióxido de titânio (CuO/TiO_2). Este nanocompósito foi sintetizado através de um método de co-precipitação, adaptando o procedimento descrito em Nguyen *et al.* (2013) onde foi utilizado etanol (90%), nitrato de cobre (II) tri-hidratado [$Cu(NO_3)_2{*}3H_2O$], pellets de hidróxido de sódio (NaOH) e nanopartículas de dióxido de titânio rutilo 30 nm (TiO_2) como precursor. Após produzido, o nanocompósito é incorporado (com a ajuda de um polímero para melhorar a sua dispersão) num colorante preto (PBk11) o qual, por sua vez, é incorporado na base do acabamento. Espera-se que esta incorporação do nanocompósito tenha um impacte significativo nos indicadores de impacte ambiental.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.2.1 Metodologia

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar o impacte ambiental através de um conjunto alargado de indicadores de impacte ambiental. No entanto, neste trabalho foram escolhidos os indicadores GWP e ADP-ff. O GWP é o potencial de aquecimento global (kg CO_2 eq) e o ADP-ff representa a depleção abiótica relativa aos combustíveis fósseis (MJ). A escolha destes indicadores teve como base o facto de ambos se relacionarem com as estratégias da EU: o ADP-ff ser um indicador do consumo de fontes de energia não renováveis e o GWP estar relacionado com a emissão de gases com efeito de estufa (Pedroso *et al.* 2023). No setor da construção durante a avaliação dos impactes ambientais com esta metodologia são abrangidas várias etapas, desde a etapa de produção, passando pela construção, utilização e fim do ciclo de vida (Figura 1) (CEN 2019)**.** Em cada etapa do ciclo de vida são identificadas e quantificadas as entradas de recursos e energia, e as saídas, como resíduos sólidos e emissões para o ar e água, permitindo assim calcular os impactes ambientais globais (Baptista *et al.* 2024).

Fases do ciclo de vida	Produção			Construção		Uso							Fim de vida				Benefícios e cargas além das fronteiras
Etapas	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
	Extração das matérias-primas	Transporte das matérias-primas	Fabricação	Transporte até à obra	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Consumo energético	Consumo de água	Desconstrução/ demolição	Transporte para o destino final	Tratamento dos resíduos	Disposição final	Reciclagem/Recuperação/Reutilização

Figura 1 – Diferentes etapas da metodologia ACV (Caldas *et al.* 2017)

2.2.2 Unidade Declarada

Segundo a norma EN 15804 - 2012 + A2 – 2019, a unidade declarada define a forma como as funções identificadas ou características de desempenho do produto são quantificadas (ISO 2006). O principal objetivo da unidade declarada em estudos de ACV é segundo a norma ISO 14044 fornecer uma referência para que os fluxos de materiais, os resultados da ACV e outras informações sejam normalizados para produzir uma base comum (ISO 2006) que permita efetuar comparações. A unidade declarada adotada para a execução deste estudo foi o m^2 de sistema.

2.2.3 Fronteiras do sistema

Segundo a EN 15804:2012 + A2:2019, o sistema pode apresentar várias fronteiras (CEN 2019):

- Do berço ao portão com as etapas C1 – C4 e D: Esta fronteira inclui as etapas A1 – A3, C1 – C3 e D;
- Do berço ao portão com opção das etapas C1 – C4 e D: Esta fronteira inclui as etapas A1 – A3, C1 – C3, D e ainda pode incluir as etapas A4 – A5 e B1 – B7 como etapas opcionais;
- Do berço ao túmulo com a etapa D: Esta fronteira inclui as etapas A1 – A5, B1 – B7, C1 – C4 e D;
- Do berço ao portão: Esta fronteira inclui as etapas A1 – A3;
- Do berço ao portão com opções: Esta fronteira inclui as etapas A1 – A3 e ainda pode incluir as etapas A4 – A5 como etapas opcionais.

A fronteira do sistema utilizada neste estudo foi a do berço ao portão com opções, ou seja, as etapas analisadas são as etapas da fase de produção, A1 – A3, e as etapas da fase de construção, A4 – A5.

2.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Esta análise teve algumas limitações e condicionantes, tais como:

- Só foi analisado o sistema ETICS, excluindo assim da análise a parte estrutural da parede;
- Os dados do ICV (Inventário de Ciclo de Vida) foram recolhidos junto de um fabricante português com fábricas em Portugal – Europa. Assim os impactes ambientais podem variar quando comparados a outras empresas, devido à localização (distâncias de transporte maiores ou menores) e rendimentos de produção diferentes (maior ou menor produção com os mesmos consumos e diferentes mix energéticos);
- Quer as matérias-primas, quer os produtos utilizados nos sistemas são transportados em embalagens reutilizáveis;
- A eletricidade é uma das fontes primárias de energia utilizada na produção de todos os materiais considerados, assumiu-se o mesmo mix processo/energia: “Eletricidade, mercado PT de baixa e média tensão”;
- Foi sempre considerada a utilização máxima de matéria-prima, por exemplo quando na ficha de segurança de um produto aparece que foi utilizado 50 a 75 % de uma matéria-prima era sempre contabilizado o valor mais alto, neste caso 75 %.

Embora a análise do ACV incluísse, para todos os produtos, todos os dados disponíveis associados aos seus processos produtivos, alguns deles não foram considerados devido ao critério de corte (*cut-off*) de 1% de massa total, pois estes teriam uma influência insignificante sobre os resultados (ISO 2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 INDICADORES DE IMPACTE AMBIENTAL DOS SISTEMAS ETICS EM ESTUDO

Os valores dos indicadores de impacte ambiental, apresentados nos seguintes quadros, recolhidos na fase de inventário do ciclo de vida (ICV), foram retirados do *software* "SimaPro" na versão 9.5.0.2 utilizando a base de dados Ecoinvent 3.0. O cálculo realizado baseou-se no método "EN 15804 + A2 (adapted) V1.00/EF 3.1 *normalization and weighting set* " (CEN 2019). Nos Quadro 2 e Quadro 3 pode-se observar a constituição das argamassas de colagem e de revestimento das placas do isolante térmico e do acabamento orgânico para ETICS, respetivamente. Além da constituição, são também apresentadas as percentagens de cada constituinte e os respetivos índices dos indicadores dos impactes ambientais GWP e ADP-ff, índices esses que por sua vez são utilizados na etapa A1.

Quadro 2 – Constituição das argamassas de colagem e de revestimento das placas do isolante térmico e respetivos índices dos indicadores do impacte ambiental (SAINT-GOBAIN 2024)

Matéria-prima	Percentagem em massa	GWP [kg CO_2 eq]	ADP-ff [MJ]	Grandeza
Areia fina	50 a 75 %	0,03	0,36	Por cada kg
Cimento Portland	25 a 50%	0,88	3,33	
Carbonato de cálcio	5 a 10 %	0,38	4,95	

Quadro 3 – Constituição do acabamento orgânico para ETICS e respetivos índices dos indicadores do impacte ambiental (SAINT-GOBAIN 2024)

Matéria-prima	Percentagem em massa	GWP [kg CO^2 eq]	ADP-ff [MJ]	Grandeza
Carbonato de cálcio	25 a 50 %	0,38	4,95	Por cada kg
Areia fina	10 a 20 %	0,04	0,36	
Dióxido de titânio	2 a 5 %	6,10	76,80	

No Quadro 4 encontram-se os restantes materiais utilizados na etapa A1 e respetivos índices dos indicadores dos impactes ambientais GWP e ADP-ff.

Quadro 4 – Materiais utilizados e respetivos índices dos indicadores do impacte ambiental

Material	GWP [kg CO_2 eq]	ADP-ff [MJ]	Grandeza
Poliestireno expandido (EPS)	10,90	91,80	Por cada kg
Lã mineral (MW)	1,11	14,20	
Aglomerado negro de cortiça (ICB)	-1,02	19,00	
Rede de fibra de vidro	2,23	32,80	
Colorante D802(Nigrosina, solúvel em álcool)	2,48	78,60	
Etanol	-2,95	40,70	
Dióxido de Titânio	4,71	52,60	
Nitrato de Cobre Tri-hidratado	2,31	27,53	
Hidróxido de Sódio	1,14	15,90	
Acetato de Polivinila	2,58	63,00	

3.2 INDICADORES DE IMPACTE AMBIENTAL DOS RECURSOS E MEIOS DE TRANSPORTE UTILIZADOS

No Quadro 5 encontram-se os recursos utilizados nas etapas A3 e A5 e respetivos índices dos indicadores dos impactes ambientais GWP e ADP-ff e por fim no Quadro 6 encontra-se o meio de transporte utilizado nas etapas A2 e A4 e os respetivos índices dos indicadores dos impactes ambientais GWP e ADP-ff.

Quadro 5 – Recursos utilizados e respetivos índices dos indicadores do impacte ambiental

Recurso	GWP [kg CO_2 eq]	ADP-ff [MJ]	Grandeza
Eletricidade baixa-tensão	0,34	4,14	Por cada kWh
Eletricidade média-tensão	0,36	5,15	
Água	$0{,}32 \times 10^{-2}$	$0{,}55 \times 10^{-1}$	Por cada litro

Quadro 6 – Meio de transporte utilizado e respetivos índices dos indicadores do impacte ambiental

Meio de transporte	GWP [kg CO_2 eq]	ADP-ff [MJ]	Grandeza
Camião	0,19	2,67	Por ton.km

No Quadro 7, são apresentadas as distâncias a serem percorridas pelos recursos e materiais na etapa A2, ou seja, a distância desde o local de extração até à unidade fabril. Nesta etapa, os produtos químicos utilizados no processo de fabricação do nanocompósito não foram considerados. Isto porque, enquanto um produto com uma utilização de 10 kg por m^2 apresenta um indicador GWP na ordem de 10^{-1}, os produtos químicos não tiveram uma utilização superior a 10 g por m^2, resultando assim num GWP na ordem de 10^{-4}, valor insignificante para o indicador final. A distância considerada a percorrer pelos diferentes produtos (argamassa de colagem do isolante térmico, argamassa de revestimento do isolante térmico, acabamento orgânico do ETICS, EPS, MW, ICB e rede de fibra de vidro) na etapa A4, ou seja, a distância desde o local de produção até ao local de construção, foi de 71 km (local de origem: Aveiro; destino: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Nesta etapa utilizou-se a mesma consideração da etapa A2, sendo que os produtos químicos utilizados no processo de fabricação do nanocompósito não foram considerados. Isto porque, enquanto um produto com uma utilização de 10 kg por m^2 apresenta um indicador GWP na ordem de 10^{-1}, os produtos químicos não tiveram um utilização superior a 10 g por m^2, resultando assim num GWP na ordem de 10^{-4}, valor insignificante para o indicador final.

Quadro 7 – Distância a percorrer pelos recursos na fase A2

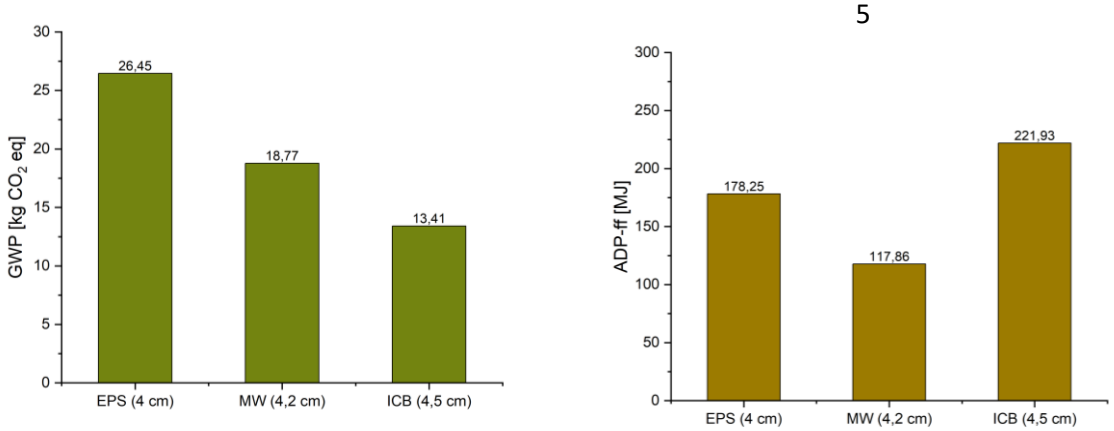
Recurso	Local de origem	Destino	Distância [km]
Areia fina	Rio Maior	Aveiro	167
Cimento de Portland	Coimbra		58
Carbonato de cálcio	Rio Maior		167
Dióxido de titânio	Porto		92
EPS	Aveiro		0
MW	Aveiro		0
ICB	Aveiro		0
Rede de fibra de vidro	Montijo		270

3.3 INFLUÊNCIA DO TIPO E ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO NOS INDICADORES DE IMPACTE AMBIENTAL (FASE 1)

3.3.1 Indicadores de impacte ambiental global por tipologia de ETICS

Utilizando os dados apresentados anteriormente e conhecendo a quantidade de recursos necessários para a construção de 1 m^2 de ETICS, com a aplicação da metodologia ACV, obtiveram-se os valores presentes nos gráficos da Figura 2, sistemas com a mesma resistência térmica, e Figura 3, sistemas com a mesma espessura de isolamento térmico.

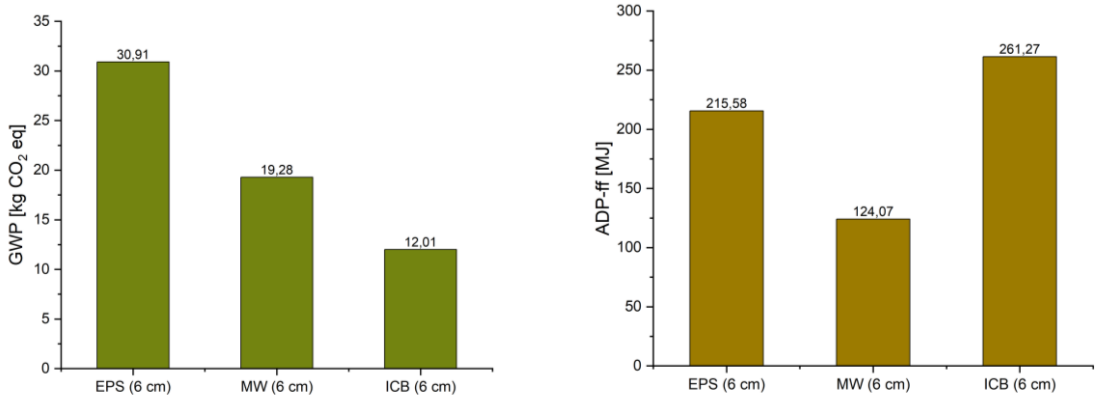
Ao analisar a Figura 2-a), conclui-se que o sistema que utiliza uma espessura de 4 cm de EPS é o sistema que apresenta um GWP mais elevado, de 26,45 kg CO_2 eq. Em contrapartida, o sistema com 4,5 cm de ICB apresenta um menor GWP, de 13,41 kg CO_2 eq, sendo aproximadamente 50% do indicador do sistema com 4 cm de EPS. Ao analisar a Figura 2-b), conclui-se que o sistema com 4,5 cm de ICB apresenta um maior ADP-ff, de 221,93 MJ, sendo aproximadamente 25% mais elevado que o do sistema com 4 cm de EPS. Por outro lado, com o sistema com uma espessura de 4,2 cm de MW obtém-se um menor ADP-ff, de 117,86 MJ, sendo aproximadamente 66% do indicador do sistema com 4 cm de EPS.



a) b)

Figura 2 – Indicador de (a) GWP e (b) ADP-ff final dos sistemas com uma resistência térmica igual alvo de estudo por m^2

Ao analisar a Figura 3-a), conclui-se que o sistema com uma espessura de 6 cm de EPS é o sistema que apresenta um GWP mais elevado, de 30,91 kg CO_2 eq, cerca de 15% superior comparativamente ao sistema de referência (4 cm de EPS). Em contrapartida, o sistema com 6 cm de ICB é o que apresenta um menor GWP, de 12,01 kg CO_2 eq, sendo aproximadamente 50% do indicador do sistema com 4 cm de EPS. Ao analisar a Figura 3-b), conclui-se que o sistema com 6 cm de ICB apresenta um maior ADP-ff, de 261,27 MJ, sendo aproximadamente 50% mais elevado que o do sistema com 4 cm de EPS, por outro lado, o sistema com uma espessura de 6 cm de MW obtém-se um menor ADP-ff, de 124,07 MJ, sendo aproximadamente 70% do indicador do sistema com 4 cm de EPS.



a) b)

Figura 3 – Indicador de (a) GWP e (b) ADP-ff final dos sistemas com uma espessura de isolante térmico igual alvo de estudo por m^2

3.3.2 Indicadores de impacte ambiental por etapa (A1 a A5)

Ao analisar ambos os gráficos da Figura 4, conclui-se que tanto no indicador GWP quanto no indicador ADP-ff, a etapa com maior peso percentual no indicador final é a etapa A1, correspondente à extração da matéria-prima, apresentando sempre um peso percentual superior a 70%. A etapa que tem um menor peso percentual é a etapa A5, a construção, que neste estudo apresenta sempre um peso percentual inferior a 1%.

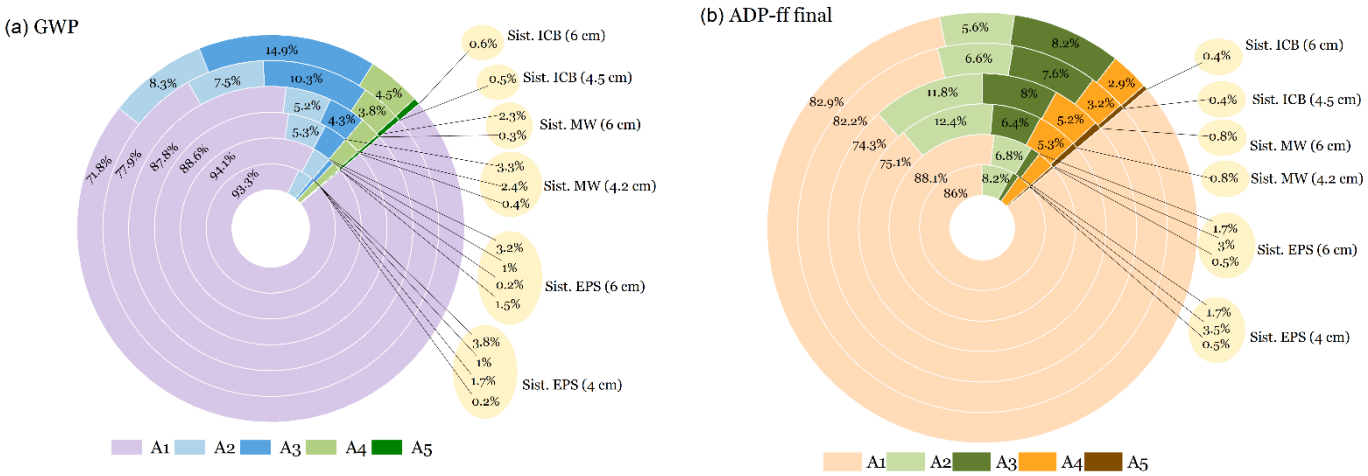


Figura 4 – Contribuição das diferentes etapas, em percentagem, para (a) GWP e (b) ADP-ff final

3.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE NANOMATERIAIS REFLETANTES NO ACABAMENTO (FASE 2)

A incorporação do nanocompósito no revestimento final teve um impacte ambiental com pouco significado no global. Pode observar-se na Figura 5, que a incorporação do nanocompósito no revestimento final do sistema de referência (4 cm de EPS), provocou um acréscimo de 0,18 kg CO_2 eq por m^2 no indicador GWP, equivalente a um aumento inferior a 1% do indicador final quando comparado com o sistema sem incorporação de nanocompósito. Já no indicador ADP-ff (**Error! Reference source not found.**) houve um acréscimo de 19,01 MJ por m^2, equivalente a um aumento de

aproximadamente 10% do indicador final comparando com o sistema sem nanocompósito. Ou seja, a incorporação do nanocompósito não representa um impacte ambiental negativo quanto ao potencial de aquecimento global e apresenta uma dependência do petróleo ligeiramente superior em relação ao sistema de referência.

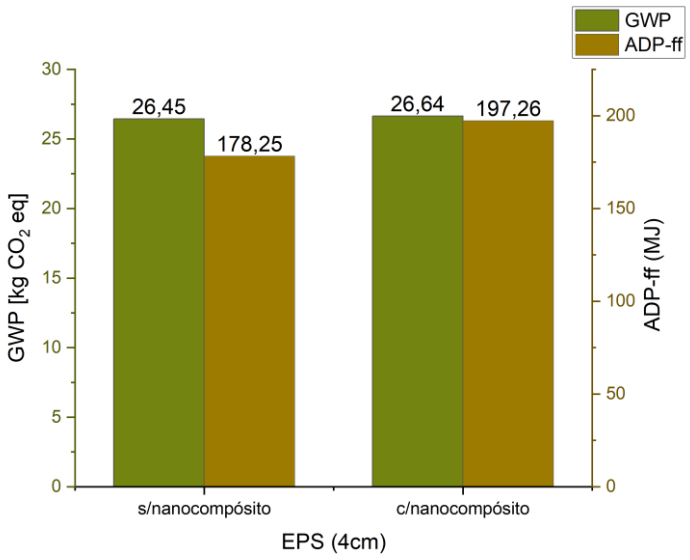


Figura 5 – Variação dos indicadores de impacte ambiental (GWP e ADP-ff) com a incorporação do nanocompósito

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FUTURAS

O presente estudo permitiu quantificar o impacte ambiental nas fases de produção e construção de sistemas ETICS com ampla aplicação na indústria da construção e ainda sobre a incorporação de nanomateriais inovadores, com potencial para melhorar a refletância de revestimentos escuros. Visto que o impacte ambiental destes nanomateriais, aplicados em revestimentos para ETICS, apresentava-se ainda pouco explorado, e que os mesmos tinham constituintes e processos com uma pegada carbónica considerável, esperava-se um impacte ambiental negativo significativo nas fases em estudo.

Com este estudo, foi possível concluir que o aglomerado negro de cortiça (ICB) demonstrou ser o isolante térmico com menor impacte ao nível do aquecimento global, por oposição ao poliestireno expandido moldado (EPS) que apresentou um maior impacte. A lã mineral (MW) foi o isolante térmico com uma menor utilização de recursos não renováveis, e, em contrapartida, o aglomerado negro de cortiça negra (ICB), o isolante térmico que apresentou uma maior utilização de recursos não renováveis.

A etapa A1 (extração de matéria-prima) revelou-se como a etapa responsável pelo maior peso percentual tanto ao nível do aquecimento global, como ao nível da utilização de recursos não renováveis, na avaliação das fases de produto e construção (A1 a A5).

Por último, a incorporação do nanocompósito no revestimento final teve um impacte ambiental significativamente reduzido, o que contrariou as expectativas iniciais, devido ao uso de alguns materiais com pegada ambiental mais elevada. No entanto, este facto deveu-se ao uso de pequenas

quantidades destes materiais na produção do nanocompósito e, de o mesmo, ser incorporado também em quantidades reduzidas na base de acabamento.

Espera-se que a integração deste nanocompósito possa contribuir de uma forma favorável para o impacte ambiental das etapas B1 a B7, que diz respeito à fase de utilização do ciclo de vida, devido a uma potencial diminuição do consumo energético por aumento da refletância do revestimento da envolvente, podendo diluir a ligeira influência negativa obtida nas fases A1 a A5. Como tal, pretende-se realizar, como desenvolvimentos futuros, simulações energéticas em fase de operação de forma a avaliar estas expectativas e identificar ainda o seu potencial impacte no seu fim de vida.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Projeto NIRWall, financiado por BIP Proof da Universidade do Porto; por Financiamento Base - UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020) e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). O autor Marco Frazão Pedroso agradece o apoio ao projeto R2Technologies com a referência 1018P.06284.1.01 financiado pelo Programa de Recuperação e Resiliência (PRR). As autoras Rita Carvalho Veloso e Andrea Souza agradecem o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutoramento 2020.08418.BD DOI 10.54499/2020.08418.BD (https://doi.org/10.54499/2020.08418.BD) e SFRH/BD/148785/2019 DOI 10.54499/SFRH/BD/148785/2019 (https://doi.org/10.54499/SFRH/BD/148785/2019).

REFERÊNCIAS

J. F. Baptista, S. Kokare, A. V. Francisco, R. Godina and D. Aelenei (2024). "A comparative life cycle assessment of ETICS and ventilated façade systems with timber cladding." Energy and Buildings **304**: 113842.

L. Caldas and M. Salgado (2017). GESTÃO DA QUALIDADE APLICADA AO PROCESSO DE PROJETO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) PARA EDIFICAÇÕES.

CEN (2019). EN 15804:2012 + A2:2019 (2019). Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products, European Committe for Standardization, Brussels, 2019

Global Alliance for Builings and Construction (2020). 2020 Global Status Report For Buildings and Construction.

ISO (2006). ISO 14044 (2006). Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines. International Standard, 2006.

Y. Lou, Y. Ye, Y. Yang and W. Zuo (2022). "Long-term carbon emission reduction potential of building retrofits with dynamically changing electricity emission factors." Building and Environment **210**: 108683.

P. d. S. Luís Matias (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios.

T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, T. D. T. Ung and Q. L. Nguyen (2013). "Synthesis and characterization of nano-CuO and CuO/TiO2 photocatalysts." Advances in Natural Sciences-Nanoscience and Nanotechnology **4**(2).

M. Pedroso, J. D. Silvestre, I. Flores-Colen and M. G. Gomes (2023). "Environmental impact of wall multilayer coating systems containing aerogel-based fibre-enhanced thermal renders." Journal of Building Engineering **76**: 107322.

SAINT-GOBAIN. (2024). Retrieved 2024, from https://construir.saint-gobain.pt/.

Sara Cristina da Silva Quintas (2015). Avaliação do desempenho ambiental do aglomerado negro de cortiça. Mestrado, Universidade do Minho.

J. Silvestre, A. Castelo, J. Silva, J. Brito and M. Pinheiro (2019). "Retrofitting a building's envelope: Sustainability performance of ETICS with ICB or EPS." Applied Sciences **9**: 1285.

S. Varela Luján, C. Viñas Arrebola, A. Rodríguez Sánchez, P. Aguilera Benito and M. González Cortina (2019). "Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements." Sustainable Cities and Society **51**: 101713.

M. Veiga and S. Malanho (2010). Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS): Comportamento global e influência dos componentes.

P. Villoria Sáez and M. Osmani (2019). "A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union." Journal of Cleaner Production **241**: 118400.

P. Vitale, N. Arena, F. Di Gregorio and U. Arena (2017). "Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building." Waste Management **60**: 311-321.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DA INCLUSÃO DE NANOMATERIAIS REFLETANTES EM PRIMÁRIOS ESCUROS PARA ETICS

Rita Carvalho Veloso[a,b]; Joana Portilho Cunha[b]; Joana Maia[b]; Andrea Souza[b]; João Ventura[a]; Nuno M.M. Ramos[b;] J. Teles Nunes[c]; Bruno Soeira[c]

[a]IFIMUP (Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal), up201001431@up.pt; joventur@fc.up.pt

[b]CONSTRUCT-LFC (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal), up201806182@up.pt, joanamaia@fe.up.pt, up201001431@up.pt, andrea.souza@fe.up.pt, nmmr@fe.up.pt

[c]SIKA PORTUGAL – Produtos Construção e Indústria, SA, Rua de Santarém, 113, 4400-292 Vila Nova de Gaia, nunes.teles@pt.sika.com, soeira.bruno@pt.sika.com;

RESUMO

Um edifício exposto à luz solar absorve grande parte da radiação, através da sua superfície, acelerando a degradação das fachadas e reduzindo a sua vida útil. Uma solução promissora para mitigar este sobreaquecimento é incorporar nanomateriais refletantes da radiação solar em revestimentos, especialmente para fachadas escuras cujo uso tem aumentado. Cada vez mais é implementado o sistema ETICS que, exponenciado pela cor escura, sofre variações térmicas superficiais, resultado em fissuras que potenciam a penetração de água na parede. Assim, a estratégia proposta combina estas duas soluções construtivas: combinar revestimentos escuros com refletância melhorada em ETICS. O estudo foca-se no desenvolvimento de formulações com nanomateriais refletantes, sem alterar a sua estética em demasia e na influência destes materiais nas suas propriedades óticas e térmicas. Os resultados preliminares mostram que os nanomateriais melhoram a refletância, mas necessitam de ajustes na colorimetria dos revestimentos. Com o aumento de refletância espera-se que a durabilidade do sistema seja otimizada e os custos de manutenção e reparação sejam reduzidos.

PALAVRAS-CHAVE

Refletância, Nanomateriais, ETICS, Revestimentos

1 INTRODUÇÃO

O conceito de durabilidade aplicado aos materiais de construção para garantir uma construção sustentável, reduzindo os recursos e o desperdício, torna-se crucial no desenvolvimento económico e tem um papel fundamental no caminho para a descarbonização (Capelo et al., 2023; Veloso, Maia, et al., 2024).

Irremediavelmente expostos à radiação solar, os edifícios absorvem grande parte dessa radiação (Chan et al., 2022). Dependendo das suas propriedades, como a refletância, a envolvente dos edifícios (fachadas, telhados…) pode atingir temperaturas muito elevadas que não só conduzem a um maior consumo energético para preservar o conforto térmico, como aceleram a degradação das camadas mais superficiais, reduzindo a vida útil da envolvente (Synnefa et al., 2006).

Uma das opções na conceção de edifícios energeticamente eficientes consiste na aplicação de isolamento térmico, como é o caso dos Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS). Amplamente usado em grande parte da Europa, a sua aplicação tem crescido

significativamente de forma a ir de encontro às exigências normativas, mas também para reduzir patologias resultantes de execução e conceção incorretos (Duarte, 2011). Facilmente adaptáveis a diferentes fachadas, devido às diversas opções de sistemas existentes, satisfazem simultaneamente os requisitos dos consumidores, fazendo uso da inércia térmica nos edifícios e contribuindo para a estabilidade da temperatura interna, evitando variações térmicas desconfortáveis para o utilizador (APFAC, 2015).

No entanto, os ETICS apresentam também degradação generalização como descoloração e microfissuração. Em vários estudos (Curado et al., 2023; Ramos et al., 2021; Xiong et al., 2018), é indicado que as fissuras podem surgir devido às substanciais flutuações térmicas observadas à superfície associadas à exposição solar, induzindo tensões térmicas e deformando o sistema de isolamento (Ramos et al., 2020). Esta variação dimensional permite a penetração de água no sistema, atingindo a parede da fachada, comprometendo assim o seu desempenho.

Esta situação é exacerbada em revestimentos escuros (Amaro et al., 2013), onde as variações térmicas superficiais são mais acentuadas, devido à elevada absorção solar. Após ensaios de envelhecimento, Ślusarek *et al.* (2020) observou o aparecimento de fissuras e aumento da porosidade, que resultou num impacto significativo das anomalias térmicas no desempenho global do ETICS (Ślusarek et al., 2020).

Uma solução promissora consiste em incorporar nanomateriais com propriedades refletantes da radiação solar neste tipo de revestimentos de acabamento (Veloso et al., 2021). A inclusão de nanomateriais funcionais nos revestimentos destes sistemas construtivos permitirá um controlo mais eficaz das propriedades radiativas, ajustando as suas propriedades óticas. No entanto, o maior desafio na incorporação de nanomateriais prende-se com a dispersão e compatibilidade dos mesmos a nível de cor, uma vez que estes têm tendência para aglomerar, o que torna a dispersão da luz ineficaz.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho centra-se em mitigar os efeitos negativos dos revestimentos escuros para fachadas, como os do ETICS, aumentando a sua refletância na região do infravermelho próximo (NIR), sem alterar significativamente a sua cor, com recurso à afinação de cor. Em colaboração com a indústria nacional especializada na produção de materiais de construção, nomeadamente, para ETICS, foram produzidas amostras de primário cinza-escuro (RAL 7016), com e sem incorporação de dióxido de titânio (TiO_2), nanomaterial com propriedade refletante (Shen et al., 2016), através de dispersão mecânica sem recurso a outras estratégias, mantendo o aspeto visual o mais similar possível.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. PREPARAÇÃO DOS PRIMÁRIOS ESCUROS COM NANOMATERIAIS

As nanopartículas de TiO_2 50 nm (da US Nano) foram usadas conforme obtidas, sem qualquer purificação. A matriz standard (amostra padrão) é um primário comercial comummente pintado nas camadas de reboco delgado dos sistemas ETICS. Apresentam-se no Quadro 1 as características do primário utilizado no presente trabalho.

Quadro 1 – Características do primário usado no estudo.

Característica	Detalhes do produto
Cor	Cinza escuro
Descrição	Primário acrílico pigmentado
Massa volúmica	1.5-1.7 ± 0.05 kg/L

Quatro amostras foram pintadas em substratos de acrílico (35×35 mm^2) com o primário cinza-escuro modificado com as nanopartículas de TiO_2 para perceber qual o efeito da sua incorporação na refletância visível e do infravermelho próximo. As nanopartículas comerciais foram diretamente dispersas, no primário já tintado ao cinza escuro (através de sistema tintométrico) a 3%, 5% e 8% de concentração (p/p), usando um dispersor mecânico (DISPERMAT AE06), uma vez que em estudos anteriores do grupo se verifica que a dispersão manual leva a uma pior distribuição dos nanomateriais influenciando a reflectância (Veloso, Dias, et al., 2024). Todas as amostras foram aplicadas em substratos de acrílico com o auxílio de uma espátula. O aspeto visual das amostras encontra-se apresentado na Figura 1.

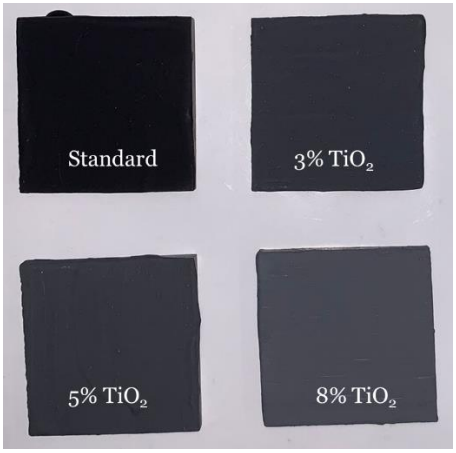


Figura 1 – Aspeto visual das amostras de primário com inclusão de nanopartículas, sem afinação de cor.

2.1.1. AFINAÇÃO DA COR

Uma vez que as amostras com as nanopartículas de TiO_2 apresentavam variação de cor para o padrão, bastante significativa por observação visual (mais claras), fez-se a afinação da mesma, com pesagem manual de diferentes quantidades de pasta pigmento preto PBk 11 (óxido de ferro) para ajustar a tonalidade ao padrão. Adicionou-se 7% de pigmento preto PBk 11 à versão com 3% de nanopartículas TiO_2 e 15% à versão com 5%, para se obter uma tonalidade de cor similar ao cinza escuro da amostra padrão (RAL 7016). Na Figura 2 estão apresentadas as amostras afinadas e não afinadas em comparação com o primário padrão (standard), sem qualquer modificação ou afinação. A cor da versão com 8% de nanopartículas não foi ajustada uma vez que a elevada quantidade de pigmento preto PBk11 necessária não é viável/ aconselhável.

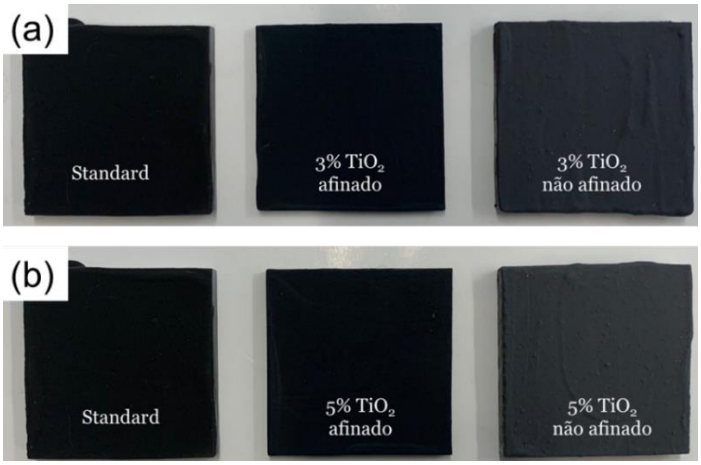


Figura 2 – Aspeto visual das amostras de primário após afinação da cor.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DA REFLETÂNCIA E COR

As propriedades óticas, como refletância e cor, foram efetuados recorrendo à norma ASTM E903 (ASTM E903, 2020) que utiliza um espectrofotómetro modular para medição espectral contínua da refletância, absorbância e transmitância de materiais. O espetrofotómetro modular está equipado com uma esfera integradora de 30 mm revestida com porta de ângulo de 8º, permitindo determinar a refletância hemisférica (especular e difusa) na faixa de 200 – 1650 nm. Durante as medições foi utilizado um padrão branco Spectralon® para a recolha da linha de base, em medições com intervalo de 5 nm, considerando que a precisão absoluta deveria ser inferior a aproximadamente 2%. No presente trabalho foram efetuadas três medições em cada amostra com dimensões 35×35 mm^2, para se calcular a refletância espectral com base na tabela X2.1 100 ordenadas para irradiância normal direta AM 1.5 da norma ASTM G173 (ASTM G173, 2020). De acordo com o procedimento, a refletância (SR) foi calculada tendo por base a Eq. (1):

$$SR = \sum_{i=1}^{100} R\lambda/100 \quad (1)$$

enquanto a refletância na região infravermelha próxima (SR_{NIR}) calculou-se através da Eq. (2):

$$SR_{NIR} = \sum_{i=46}^{100} R\lambda/100 \quad (2)$$

onde R é a refletividade espectral medida pelo espectrofotómetro, λ do comprimento de onda entre 200 e 2500 nm de acordo com a norma ASTM G197 (ASTM G197-14, 2021) para uma superfície vertical. A análise colorimétrica foi efetuada tendo em conta as coordenadas de cor de todas as amostras, sendo determinada através da medição da região UV-Vis com o mesmo espectrofotómetro. As coordenadas de cor CIELab foram utilizadas conforme recomendado pela *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) (ISO 11664-4, 2007), usando um ângulo 10º, iluminante D65 e após calibração com o padrão branco. De acordo com a metodologia CIE, a luminosidade (L*) varia do preto (0) ao branco (100), a coordenada a* varia do verde (-a*) ao vermelho (+a*) e a coordenada b* varia do azul (-b*) para o amarelo (+b*). Assim, a diferença de cor é a variação de cor entre dois materiais, podendo ser calculada usando a Eq. 3:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades óticas das amostras foram estudadas através da medição da refletância e determinando os seus parâmetros colorimétricos.

3.1. REFLETÂNCIA

O comportamento espectral da refletância de todos os primários, nas regiões do visível (300-700 nm) e do NIR (850-1650 nm) estão representados na Figura 3. Como ilustrado na Figura 3(a), os valores de refletância das amostras estão abaixo dos 30% uma vez que são de cor escura e abaixo do limite para serem considerados refletantes (0.65) (Gobakis, 2016). Apesar disso, observam-se resultados interessantes na região infravermelha próxima, considerando que se está a usar uma cor com tonalidade escura. Todas as amostras apresentam um desempenho semelhante, como esperado e encontrado noutros estudos (Veloso, Maia, et al., 2024), ao absorver parcialmente a luz visível. É notório que a incorporação das nanopartículas no primário leva a um aumento de refletância, em ambas as regiões. No caso das amostras sem qualquer afinação, este incremento leva a uma mudança de cor, tornando as amostras mais claras. Verifica-se que a refletância atinge um pico máximo para concentração a 5%, revelando que a incorporação a 8% não apresenta vantagens, não se verificando qualquer melhoria significativa nas diferentes regiões. Apesar da dispersão mecânica ser eficaz, esta saturação pode dever-se ao aumento da aglomeração das nanopartículas em maiores concentrações na matriz, induzindo um decaimento na dispersão total da luz (Veloso, Dias, et al., 2024).

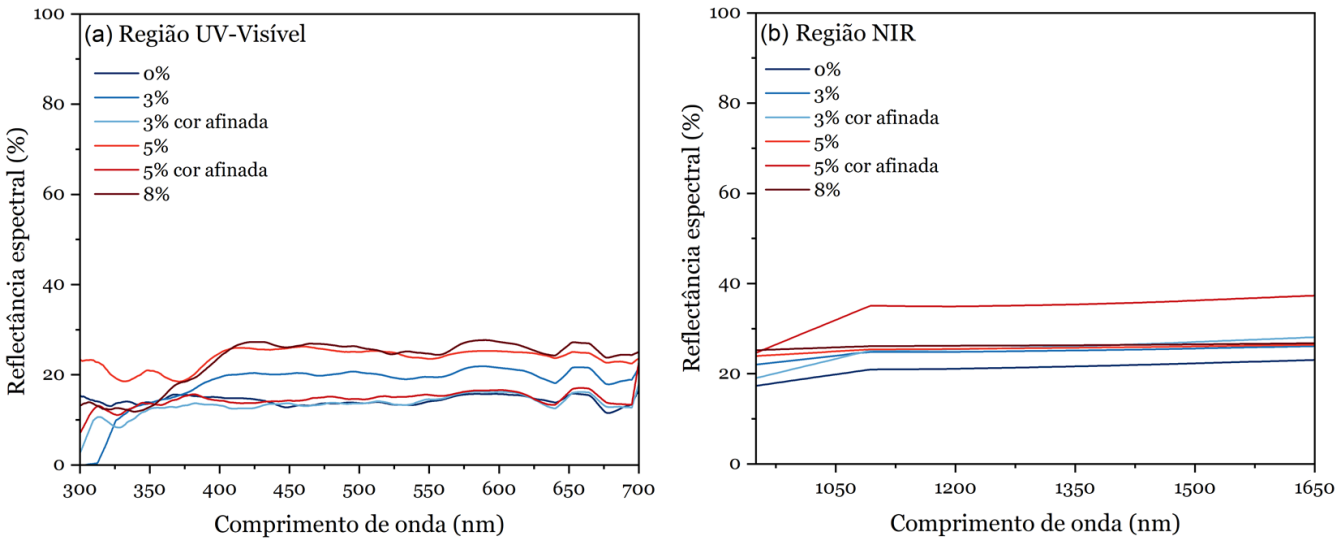


Figura 3- Refletância espectral do primário com inclusão de nanopartículas, afinado e não afinado.

Relativamente às amostras após afinação da cor, verifica-se que os valores de refletância no visível são mais baixos comparativamente ao das amostras modificadas, sem afinação. Isto traduz-se na preservação da cor escura, característica da amostra padrão. Na região NIR, a refletância mantém-se elevada, sendo que as nanopartículas conservaram o desempenho positivo.

Para melhor comparação, no **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** são apresentadas a refletância total, visível e no infravermelho próximo, calculadas segundo a ASTM E903 (ASTM E903, 2020) versus a concentração de TiO_2. Enquanto o primário comercial escuro absorve parte da radiação NIR, com refletância de 17.10 ± 3.30, todas as amostras modificadas apresentam melhorias

significativas nesta região, com valores entre 19.26 e 25.54 (49% de aumento), revelando que a dispersão mecânica dos nanomateriais é eficaz. O melhor desempenho na região NIR apresentada foi para a incorporação 5% de TiO_2, com cor afinada.

Quadro 2 – Cálculo da refletância média usando a ASTM E903 do primário com inclusão de nanopartículas, afinado e não afinado.

% de incorporação	**Refletância (%)**		
	Total	NIR	Visível
0% (padrão)	15.80 ± 2.60	17.10 ± 3.30	14.20 ± 1.70
3%	20.12 ± 1.21	20.46 ± 1.04	20.05 ± 1.30
3% com afinação	16.90 ± 0.43	19.26 ± 1.25	14.13 ± 0.71
5%	24.59 ± 2.50	24.75 ± 2.84	24.76 ± 1.90
5% com afinação	20.77 ± 1.57	25.54± 2.20	14.98± 0.94
8%	24.59± 0.96	24.75 ± 1.12	25.87± 0.75

3.2. AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA COR

Um dos objetivos do presente estudo foi aumentar a refletância do primário, consequentemente melhorando o seu desempenho térmico, sem modificar excessivamente a sua cor original usando a afinação da cor. Remetendo para a Figura 1, verifica-se que as amostras apresentam tonalidades diferentes quando as nanopartículas são incorporadas no primário. O aumento de refletância observado na região do visível traduz-se numa mudança de cor, ficando com uma tonalidade ligeiramente mais clara, uma vez que se adiciona um nanomaterial branco a um primário escuro. Esta aclaramento é verificado através do parâmetro L* calculado, que passa de 45 para valores perto dos 56, aproximando-se do cinza-claro, como apresentado no Quadro 3 – Valores médios das propriedades de variação de cor em comparação com amostra standard.

. À medida que se aumenta a concentração de TiO_2, a diferença de cor (ΔE) comparativo à amostra padrão, acompanha esse aumento. Assim, nos casos em que não houve afinação de cor nenhuma amostra apresentou ΔE favorável.

Com a afinação da cor, a amostras modificadas aproximam-se da cor original da amostra padrão (sem qualquer modificação), podendo-se verificar pela diminuição do parâmetro de luminosidade (L*) que apresenta valores similares à amostra padrão. Analisando a ΔE, as amostras encontram-se perto de 3, estando a 3% com cor afinada dentro dos limites estabelecidos na literatura (ver Figura *4*)(Cozza et al., 2015; Mokrzycki & Tatol, 2011). Por ser um método com um custo considerável, uma vez que a pasta de pigmento de afinação tem um custo acrescido, evita-se a afinação de cor na indústria. No entanto, com o uso de aditivos adicionais, por vezes é necessário recorrer a esta metodologia para manter as propriedades de cor.

Quadro 3 – Valores médios das propriedades de variação de cor em comparação com amostra standard.

% de incorporação	Coordenadas colorimétricas		
	L*	a*	b*
0% (standard)	45.36 ± 1.21	3.42 ± 1.08	2.08 ± 0.18
3%	52.08 ± 1.31	1.48 ± 0.77	0.13 ± 0.67
3% com afinação	44.14 ± 1.90	1.99 ± 0.31	3.529± 1.32
5%	56.91 ± 0.54	1.19 ± 0.04	-2.21 ± 0.92
5% com afinação	46.24 ± 2.18	0.20 ± 1.32	2.67 ± 1.28
8%	57.88 ± 1.21	1.86 ± 0.68	-1.20 ± 0.83

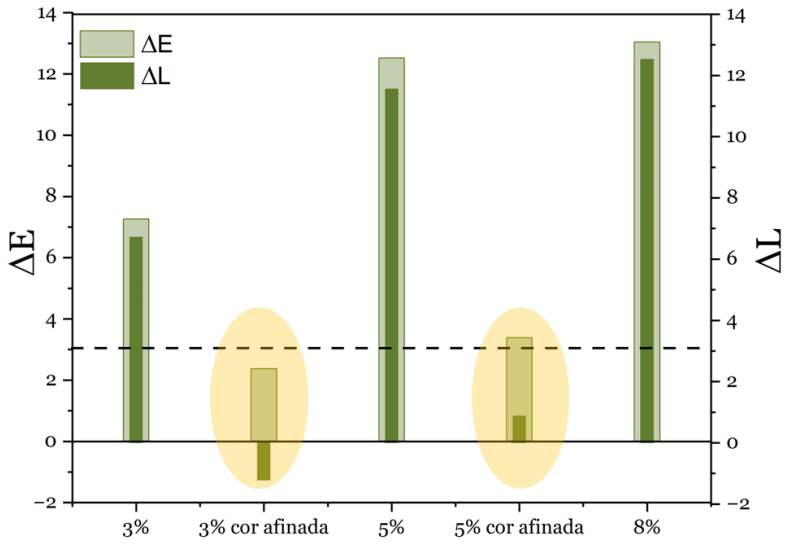


Figura 4- Diferença total de cor (ΔE) e variação de luminosidade (ΔL).

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FUTURAS

Há uma tendência crescente na aplicação de cores mais escuras nos sistemas envelope dos edifícios, tentando, em conjunto, reduzir os efeitos da radiação solar, comprovando a relevância da incorporação de nanomateriais refletantes em revestimentos escuros.

Foi obtida uma formulação de primário com incorporação de nanopartículas de TiO_2 50 nm, através de dispersão mecânica, com refletância melhorada no infravermelho próximo, sendo que a percentagem que revelou melhor desempenho, com aumento nesta região foi a incorporação a 5% de TiO_2, com cor afinada.

Constatou-se que a inclusão das nanopartículas de TiO_2 afeta a perceção da luminosidade e cor, o que é esperado uma vez que se incorpora um nanomaterial branco na composição. Deste modo, a afinação da cor do primário torna-se essencial para manter as propriedades colorimétricas e, simultaneamente, preservar o efeito positivo da refletância na região do infravermelho próximo.

Uma combinação otimizada de primário-revestimento pode contribuir para a durabilidade a longo prazo. Este estudo permite demonstrar que a inclusão de nanomateriais podem ser uma solução promissora para atenuar os efeitos dos revestimentos escuros em fachadas. Ao explorar o seu impacto, o objetivo é garantir a durabilidade do sistema, mitigando as preocupações relativas ao stress térmico provocado pela exposição á radiação solar.

Como considerações futuras, após a escolha da combinação mais favorável, o primário modificado será aplicado em protótipos ETICS de pequena escala e submetidos a ensaios de envelhecimento acelerado com o intuito de avaliar, a longo prazo, a durabilidade e consequente impacto destes nanomateriais nos revestimentos finais.

Para além disso, os autores consideram que um estudo relativo ao impacte na saúde e ambiental do uso de nanopartículas TiO_2 deve ser efetuado, uma vez que a toxicidade destes nanomateriais é controversa, sendo considerados “biologicamente” inertes (Fonseca et al., 2023).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da SIKA PORTUGAL. As autoras Rita C. Veloso e Andrea R. Souza agradecem o apoio da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento da Bolsa de Doutoramento https://doi.org/10.54499/SFRH/BD/148785/2019 e https://doi.org/10.54499/2020.08418.BD, respetivamente.

REFERÊNCIAS

Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J., & Flores-Colen, I. (2013, 2013/10/01/). Inspection and diagnosis system of ETICS on walls. *Construction and Building Materials, 47*, 1257-1267. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.024

APFAC. (2015). *ETICS - Manual de Aplicação.* https://www.apfac.pt/uploads/documentos/APFAC-MANUAL-DE-APLICACAO-ETICS-2015-LQ.pdf

ASTM E903. (2020). *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Sphere*.

ASTM G173. (2020). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*.

ASTM G197-14. (2021). *Standard Table for Reference Solar Spectral Distributions: Direct and Diffuse on 20° Tilted and Vertical Surfaces*.

Capelo, S., Soares, T., Azevedo, I., Fonseca, W., & Matos, M. A. (2023). Design of an Energy Policy for the Decarbonisation of Residential and Service Buildings in Northern Portugal. *Energies, 16*(5).

Chan, Y. H., Zhang, Y., Tennakoon, T., Fu, S. C., Chan, K. C., Tso, C. Y., Yu, K. M., Wan, M. P., Huang, B. L., Yao, S., Qiu, H. H., & Chao, C. Y. H. (2022, 2022/11/15/). Potential passive cooling methods based on radiation controls in buildings. *Energy Conversion and Management, 272*, 116342. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116342

Cozza, E. S., Alloisio, M., Comite, A., Di Tanna, G., & Vicini, S. (2015). NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. *Solar Energy, 116*, 108-116. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.004

Curado, A., Figueiras, R., Gonçalves, H., Sambento, F., & Nunes, L. J. R. (2023). Novel High-Performance ETICS Coatings with Cool Pigments Incorporation. *Sustainability, 15*(12), 9644. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9644

Duarte, C. (2011). A Europa das argamassas e dos ETICS. Tendências, perspectivas e oportunidades. Proceedings of the IX SBTA—Brazilian Symposium on Mortars Technology, Belo Horizonte, Brasil.

Fonseca, E., Vázquez, M., Rodriguez-Lorenzo, L., Mallo, N., Pinheiro, I., Sousa, M. L., Cabaleiro, S., Quarato, M., Spuch-Calvar, M., Correa-Duarte, M. A., López-Mayán, J. J., Mackey, M., Moreda, A., Vasconcelos, V., Espiña, B., Campos, A., & Araújo, M. J. (2023, 2023/09/15/). Getting fat and stressed: Effects of dietary intake of titanium dioxide nanoparticles in the liver of turbot Scophthalmus maximus. *Journal of Hazardous Materials, 458*, 131915. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131915

Gobakis, K., Meier, H., Kolokotsa, D., Synnefa, A., Evans, R., Santamouris, M.,. (2016). Cool Roofs in the European context. *REHVA Journal, 04*, 19-24.

ISO 11664-4. (2007). *Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space.*

Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour Difference ΔE - a Survey. *MG&V, 20*(4), 383-411.

Ramos, N. M. M., Maia, J., Souza, A. R., Almeida, R. M. S. F., & Silva, L. (2021, Jun). Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS. *Infrastructures, 6*(6). https://doi.org/ARTN 79

10.3390/infrastructures6060079

Ramos, N. M. M., Souza, A. R., Maia, J., & Almeida, R. M. S. F. (2020). Solar reflectance of ETICS finishing coatings – a comparison of experimental techniques. *E3S Web of Conferences, 172*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017221003

Shen, L. W., Zhang, Y. M., Zhang, P. G., Shi, J. J., & Sun, Z. M. (2016, Dec). Effect of TiO2 pigment gradation on the properties of thermal insulation coatings. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 23*(12), 1466-1474. https://doi.org/10.1007/s12613-016-1371-4

Ślusarek, J., Orlik-Kożdoń, B., Bochen, J., & Muzyczuk, T. (2020, 2020/11/01/). Impact of the imperfection of thermal insulation on structural changes of thin-layer façade claddings in ETICS. *Journal of Building Engineering, 32*, 101487. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101487

Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006, 2006/08/01/). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy, 80*(8), 968-981. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005

Veloso, R. C., Dias, C., Souza, A., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2024, 2024/04/01/). Unravelling the role of TiO2 nanoparticles on the optical performance of dark colourants for coatings. *Materials Chemistry and Physics, 316*, 129014. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129014

Veloso, R. C., Maia, J., Praça, R., Souza, A., Ventura, J., Ramos, N. M. M., & Corvacho, H. (2024, 2024/01/20/). Impact of SiO2, TiO2 and ZnO nanoparticles incorporation on the thermo-optical properties of dark-coloured façade coatings. *Journal of Building Engineering*, 108517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108517

Veloso, R. C., Souza, A., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2021, Dec). Nanomaterials with high solar reflectance as an emerging path towards energy-efficient envelope systems: a review. *Journal of Materials Science, 56*(36), 19791-19839. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06560-3

Xiong, H., Xu, J., & Yuan, K. (2018, 2018/07/01/). Experimental study on the temperature field of ETICS cladding system with finishing colorful steel plate. *Journal of Building Engineering, 18*, 438-447. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.015

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ECONOMIA CIRCULAR DE LAJES COMPÓSITAS CLT-BETÃO PRÉ-FABRICADO

Carlos Albino[a]; Romeu Vicente[a]; Victor Ferreira[a]

[a] RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, capa@ua.pt, romvic@ua.pt, victorf@ua.pt

RESUMO

Os produtos processados de madeira e a sua aplicação na reabilitação e construção nova de edifícios tem crescido mundialmente. De entre os mais desenvolvidos, encontra-se a Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT). As estruturas de madeira têm energia incorporada e emissões de carbono associadas significativamente mais baixas que os sistemas estruturais equivalentes de aço e betão. Os objetivos desta pesquisa são: definir o estado da arte relativo a lajes compósitas CLT-betão e identificar uma abertura para o desenvolvimento de uma solução inovadora, simples, leve, económica e sustentável. Assim, o sistema de laje compósita deve permitir a desmontagem e a reutilização de todos os elementos, enquanto possível, e a redução dos desperdícios e dos resíduos ao mínimo, de acordo com o conceito de economia circular. A definição do sistema passa por uma nova abordagem relativa à camada de betão e conceção de ligadores entre o betão e a madeira. Propõe-se um sistema composto por placas de betão pré-fabricadas de pequena dimensão reduzindo a necessidade de meios pesados de transporte e instalação em obra. A diminuição da quantidade de betão, a integração da madeira, um material detentor de carbono biogénico, e as ligações de acoplamento e desacoplamento, tornam a solução ambientalmente mais sustentável.

Palavras-chave: Desconstrução, Estrutura de madeira, Retenção de carbono, Reutilização, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A procura por produtos processados de madeira (EWPs, do inglês *Engineered Wood Products*) para aplicação na reabilitação e construção de edifícios novos tem crescido por todo o mundo (Hildebrandt et al., 2017; Mohammad et al., 2012). Os EWPs que alcançaram maior desenvolvimento e aplicação internacional são a madeira lamelada colada (glulam ou GLT, do inglês *Glued Laminated Timber*), usada principalmente como elemento linear, e a madeira lamelada colada cruzada (CLT, do inglês *Cross-Laminated Timber*), usada como elemento plano. Para otimizar os elementos construtivos, estes elementos podem ser combinados com betão formando materiais compósitos CLT-betão, ou simplesmente TCC (do inglês *Tinber-Concrete Composite*), onde se destacam as excelentes características da madeira à tração e do betão à compressão.

Em Portugal, a utilização de EWPs como elementos estruturais é recente e atualmente vive-se uma mudança de paradigma, imposta pelas linhas estratégicas estabelecidas pela Europa ao nível do European Green Deal, nomeadamente através do movimento New European Bauhaus que promove a utilização da madeira para que a Europa possa atingir a neutralidade carbónica em 2050. Contudo, a dependência total da madeira é um risco. São evidentes os efeitos adversos das alterações climáticas na floresta europeia (por exemplo, os fogos florestais e o surgimento de pragas), que se repercutem essencialmente na redução da área florestal disponível (European Parliament, 2022).

Neste contexto surge este projeto de discussão de desenvolvimento de lajes TCC onde, por um lado se incorpora a madeira, um detentor natural de carbono biogénico, como elemento estrutural, e por outro, reduz-se a quantidade de betão. Em termos de sustentabilidade económica e ambiental, as ligações CLT-betão permitem um funcionamento compósito do sistema em serviço e, aquando do posterior desacoplamento, possibilitam a reutilização de todos os componentes, posicionando a solução no âmbito da economia circular.

2 SISTEMAS NÃO COMPÓSITOS

No sentido de contextualizar o sistema compósito CLT-betão é fundamental definir os sistemas estruturais correntes, não compósitos, relevantes para a discussão, nomeadamente, o betão armado e a madeira (focando nas estruturas de CLT). Igualmente importante é a definição das principais vantagens e desvantagens dos sistemas estruturais só de betão e só de madeira (CLT) em relação aos sistemas mistos madeira-betão.

O betão foi criado após a invenção do cimento Portland, pelo inglês Joseph Aspdin, em 1824 (Gromicko et al., 2020). A utilização de betão armado na construção civil cresceu principalmente devido à sua resistência ao fogo e à reduzida manutenção, após terem sido comprovadas as suas altas durabilidade e resistência à compressão e baixa deterioração com o tempo (Civil Concept, 2021; civiltoday.com, 2021). As desvantagens resultam principalmente das propriedades intrínsecas do material: baixa resistência à tração possibilitando o desenvolvimento de fissuras; baixa tenacidade; baixa resistência específica e trata-se de um material quase frágil. Independentemente das desvantagens, o betão continua a ser o material de escolha para muitas aplicações devido ao seu baixo custo (Civil Concept, 2021; CivilEngineeringTutor, 2016; civiltoday.com, 2021; Jamal, 2017).

O CLT é um produto de madeira processada inovador que foi desenvolvido na Europa na década de 1970 (Structural Timber Association, 2015). Desde então, o uso de CLT na Europa aumentou significativamente (Gagnon et al., 2013; Gustafsson et al., 2019; Mohammad et al., 2012; Structural Timber Association, 2015) permitindo a construção de edifícios de madeira maciça como alternativa às estruturas de alvenaria, betão e aço. A Figura 1 mostra o volume [m^3/ano] de CLT fabricado na

Europa (Brandner et al., 2016; imarcgroup.com, 2023, 2024; Sandoli et al., 2021; timber-online.net, 2021). Um painel de CLT é um material de construção composto por pelo menos três camadas de tábuas coladas, com cada camada colocada com o veio da madeira perpendicular relativamente à camada justaposta (Gustafsson et al., 2019). Os painéis de CLT podem ser produzidos com 3, 5, 7 ou 9 camadas (Gustafsson et al., 2019).

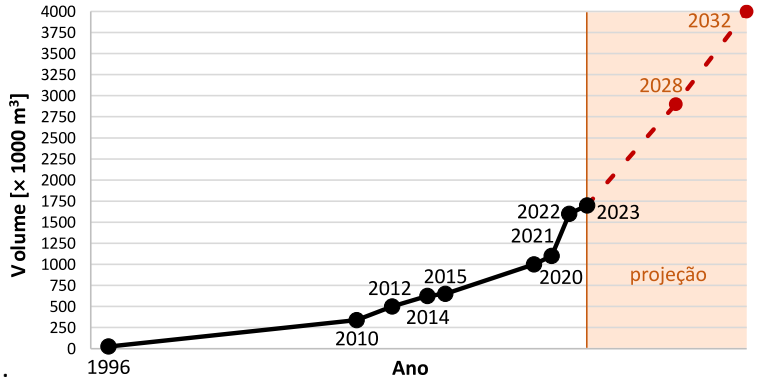


Figura 1 – Volume [m^3/ano] de CLT produzido na Europa.

São muitas as vantagens do CLT que podem ser facilmente encontradas na bibliografia sobre o assunto, por exemplo, em (Dick et al., 2014; Gustafsson et al., 2019; Schmidt & Griffin, 2013; Structural Timber Association, 2015; Wolfe, 2020). O CLT, devido ao processo de laminação cruzada, proporciona melhor estabilidade dimensional em relação à madeira serrada, o que permite a pré-fabricação de painéis individuais para lajes e paredes. O CLT tem boas propriedades acústicas; boa capacidade de isolamento térmico e; tem alta resistência específica. Os edifícios de CLT têm uma pegada de carbono muito baixa porque a madeira retém o carbono absorvido durante o crescimento, podendo resultar em construções com carbono negativo. Schmidt & Griffin (2013) colocam algumas reservas relativamente ao fogo. Contudo, é possível melhorar o comportamento adicionando mais camadas de madeira ou aplicando um tratamento ignífugo ao painel. Assim, é possível aumentar o tempo de exposição para atingir os índices de resistência ao fogo necessários (Schmidt & Griffin, 2013).

As desvantagens mais dissuasoras das estruturas de CLT estão relacionadas com os custos: são mais caras do que as estruturas de aço ou de betão; um custo mais alto de transporte de material, pois há relativamente poucas fábricas; custos de sistemas MEP (engenharia mecânica, elétrica e hidráulica, do inglês *mechanical, electrical, and plumbing engineering*). Estruturalmente, as desvantagens estão ligadas à incapacidade de atingir grandes vãos livres devido à deformação excessiva da madeira e à baixa rigidez estrutural (Amorim et al., 2018; Wolfe, 2020).

3 SISTEMAS COMPÓSITOS MADEIRA-BETÃO

Num sistema de laje compósita madeira-betão, TCC, é usada uma técnica de construção onde uma laje de betão é mecanicamente ligada a vigas de madeira de suporte (vigas de madeira maciça) ou CLT (painel de madeira maciça) usando entalhes na madeira ou ligadores mecânicos (Mirdad et al., 2022; Yeoh et al., 2008). Um sistema de ligação com alto desempenho compósito permite uma redução significativa na espessura da laje e maior comprimento de vão, quando comparado com um sistema não compósito. Ceccotti (2002) classificou por rigidez as ligações mais comuns para conectar a madeira ao betão: pregos, parafusos e cavilhas são as mais flexíveis, enquanto entalhes feitos na madeira e conectores contínuos colados na madeira são os mais rígidos (Ceccotti, 2002). A Figura 2 (a) fornece uma comparação da relação força de corte-deslizamento para diferentes sistemas de conexão (Yeoh et al., 2011).

O sistema construtivo de lajes compósitas CLT-betão é melhorado, uma vez que o CLT funciona como suporte para a betonagem da laje. Comparado à laje de CLT, o piso compósito CLT-betão – ver Figura 2 (b) – apresenta melhor desempenho estrutural, aumentando a resistência à flexão e a rigidez, com consequente diminuição da deflexão e da suscetibilidade a vibrações (Amorim et al., 2018; Ceccotti, 2002). O isolamento térmico e acústico e a segurança contra incêndio também são melhorados em comparação com a solução de CLT. Na laje compósita, a rigidez estrutural é influenciada pela ligação entre o betão e a madeira, e quanto melhor a adesão na interface, maior será a rigidez do sistema (Amorim et al., 2018; Ceccotti, 2002). Algumas desvantagens foram referidas por (Dias et al., 2016; Song et al., 2020). A mais importante está relacionada com a humidade do betão no processo produtivo que afeta a qualidade de ambos os materiais: CLT e betão. Outra desvantagem é o destino dado ao betão no final da vida útil da edificação. Como as ligações CLT-betão são rígidas, no processo de desmontagem o betão terá uma rutura frágil e será convertido em resíduo.

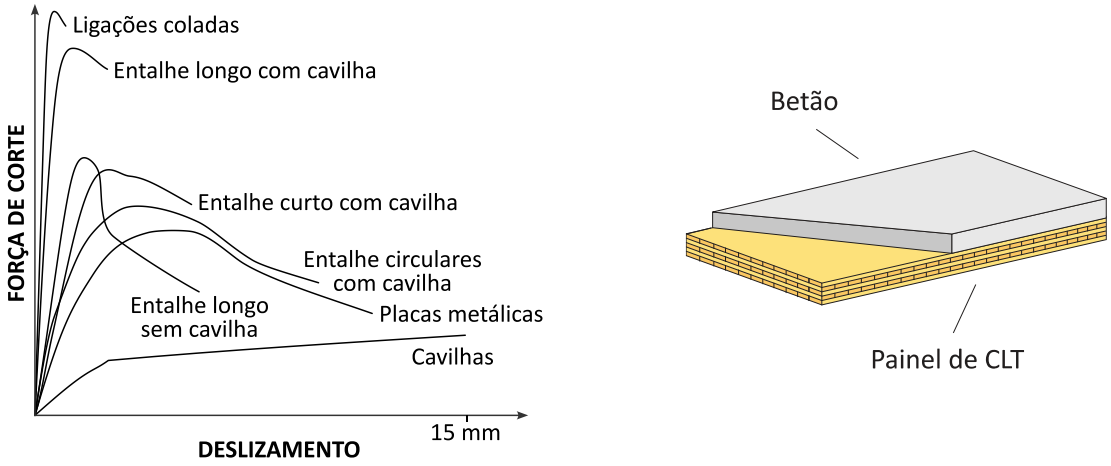


Figura 2 – Representação esquemática do (a) comportamento deslizamento/força de corte de várias ligações comuns, adaptado de (Yeoh et al., 2011), e do (b) sistema compósito CLT-betão.

Novas soluções TCC estão sob investigação e algumas preveem o modelo de economia circular, ou seja, têm em conta a desconstrução. Estévez-Cimadevila *et al*. (2022) propôs um sistema completo que inclui todos os elementos do sistema de laje estrutural: piso, vigas e colunas. É um sistema de peças modulares pré-fabricadas de madeira, montadas no local e betonadas após instalação das armaduras para reforço de betão (Estévez-Cimadevila et al., 2022). Woschitz *et al*. (2021) estudaram um sistema de laje compósita CLT-betão baseado em ligações de entalhe na madeira com adesivo para fixar o betão à madeira (Woschitz et al., 2021). Derikvand e Fink (2021, 2022) desenvolveram o conceito de um ligador que permite a desconstrução usando parafusos autoperfurantes para ser usado tanto na pré-fabricação quanto na betonagem in situ de lajes TCC (Derikvand & Fink, 2021, 2022). Nas duas últimas pesquisas, há uma preocupação com o reaproveitamento dos materiais no final da vida útil da estrutura. Considerando o conceito de lajes mistas CLT-betão desmontáveis, Hooman Eslami *et al*. (2023) apresentaram uma solução com ligações entalhadas e aparafusadas para uma laje modular pré-fabricada, com betonagem direta sobre a madeira, de fácil desmontagem (Eslami et al., 2023).

Para fazer face a alguns constrangimentos dos sistemas existentes no mercado e dos sistemas sob investigação, propõe-se a discussão de um sistema inovador de laje compósita CLT-betão com vantagens significativas em comparação com os sistemas descritos anteriormente. É importante notar que as ligações entre a madeira e o betão são as partes mais importantes das estruturas TCC. Elas conferem ao sistema a rigidez e o comportamento compósito. Portanto, atribuir a estas partes

estruturais a função de ligação temporária é imprescindível quando se considera o reaproveitamento de todos os componentes, pois os ligadores são as peças que permitem o processo de desacoplamento. Os ligadores amovíveis renovam o ciclo de vida dos elementos estruturais, tornando as estruturas madeira-betão ainda mais sustentáveis.

4 DESEMPENHO E IMPLEMENTAÇÃO NO MERCADO DE LAJES COMPÓSITAS MADEIRA-BETÃO

A procura por estruturas TCC vem de todos os setores da construção. As empresas de estruturas de betão pré-fabricadas visam tornar os componentes de construção mais leves, reduzir os custos de transporte e instalação em obra e reduzir a pegada de carbono. As empresas de estruturas metálicas pretendem integrar a madeira, nomeadamente lajes CLT-betão, em substituição das lajes habituais de chapa de aço colaborante e betão, acelerando a construção e minimizando o impacto ambiental através da substituição de parte do betão pela madeira, bem como das vigas metálicas em "I" por perfis de aço enformados a frio (Navaratnam et al., 2021). Todavia, as empresas de estruturas de madeira pretendem integrar elementos compósitos madeira-betão, permitindo aumentar vãos e melhorar o conforto térmico, acústico e vibracional, mas também a reação ao fogo e aos sismos.

A caracterização do desempenho (resistência e rigidez) das ligações é realizada através de ensaios de corte de acordo com a norma EN 26891. A resistência (capacidade de carga) é quantificada como sendo a carga máxima aplicada quando o colapso ocorre no provete sujeito ao corte, e a rigidez é quantificada pelo módulo de deslizamento em três níveis de carga diferentes, (40, 60 e 80) % da média da carga máxima, correspondente aos níveis de carga de serviço, última e de quase colapso, respetivamente.

Numa laje TCC, o painel de betão pode ser betonado no local ou pré-fabricado num ambiente fabril. A betonagem no local apresenta duas vantagens práticas (Derikvand & Fink, 2022): criação de um diafragma estrutural, sem necessidade de coberturas adicionais ou ligações entre painéis, e redução do peso dos painéis pré-fabricados de madeira, tornando o transporte mais eficiente e a montagem mais rápida. A maior desvantagem é que a madeira é altamente higroscópica e as suas propriedades de rigidez e resistência diminuem com o aumento do teor de água (Lukacevic et al., 2021).

O Anexo B do Eurocódigo 5 era a base para o dimensionamento de projetos de estruturas TCC, mas recentemente, Dias *et al*. (2018) editaram um relatório sobre o estado da arte dessas estruturas pela ação COST FP1402/WG 4, onde o dimensionamento de estruturas compósitas madeira-betão foi resumido (Dias et al., 2018). Em 2021, foi publicada a especificação técnica TS 19103 do Eurocódigo 5. Esta especificação técnica seguiu o trabalho de Dias *et al*. (2018) e fornece regras comuns para o dimensionamento estrutural de estruturas TCC. O dimensionamento de ligações usando estas normas habitualmente é conservativo devido à variabilidade do comportamento da madeira. Por exemplo, nas ligações entalhadas definidas na Cláusula 10.3.4 da especificação técnica TS 19103, ao considerar entalhes de 20 mm de profundidade e tendo em conta as restantes condições mínimas definidas nessa Cláusula, a capacidade de carga real (obtida em ensaios laboratoriais) é cerca de 2.5 vezes superior à calculada pela especificação técnica (Albino et al., 2023).

5 SUSTENTABILIDADE

Os problemas ambientais associados às alterações climáticas suscitaram uma preocupação generalizada com o meio ambiente e a definição de diretrizes para minimizar a quantidade de gases com efeito estufa na atmosfera, nomeadamente a redução de dióxido de carbono (CO_2). Surgiram então os modelos circulares de reparação, recolha e reutilização dos materiais da desconstrução. Desde o início dos anos 2000, o tema Projeto para a Desconstrução (DfD, do inglês *Design for*

Deconstruction) tem sido abordado para tornar mais eficiente o fim de vida dos edifícios. Embora o DfD tenha demonstrado benefícios ambientais, sociais e económicos, quase nenhum edifício projetado e construído até hoje é projetado para a desconstrução (Kanters, 2018).

A madeira é um recurso renovável se as florestas exploradas forem replantadas de forma sustentável. As estruturas de madeira têm energia incorporada e emissões de carbono associadas significativamente mais baixas do que os sistemas estruturais equivalentes de aço e betão. A redução das emissões de CO_2 é fundamental quando são abordadas as questões energéticas e climáticas (Schmidt & Griffin, 2013) e a madeira é um detentor de carbono, removendo CO_2 da atmosfera e armazenando-o em componentes de construção. O Quadro 1 mostra o impacte ambiental de uma casa unifamiliar de 214 m^2, na América do Norte, em que apenas a estrutura de suporte (CLT, aço ou betão) diferiu no estudo (Bolduc, 2021) .

Quadro 1 – Impacte ambiental do betão e do aço comparado com o CLT (Bolduc, 2021).

Comparação com o CLT	Energia incorporada	Impacte climático	Impacte negativo na qualidade do ar	Impacte negativo na água	Recursos consumidos por peso	Resíduos produzidos
Aço	+53%	+23%	+74%	+247%	+14%	-21%
Betão	+120%	+50%	+115%	+114%	+93%	+37%

De acordo com as Nações Unidas (FAO, 2020), as florestas europeias estão a mudar, não só devido à atividade humana, mas também devido a pragas e alterações climáticas. As alterações climáticas são simultaneamente causa e consequência da desflorestação e da degradação florestal. Os eventos extremos desencadeados pelas alterações climáticas afetam as florestas. Por sua vez, a perda florestal é prejudicial para o clima, uma vez que as florestas desempenham um papel significativo no fornecimento de ar limpo, na regulação do ciclo da água, na captura de CO_2, na prevenção da perda de biodiversidade e da erosão do solo (European Parliament, 2022).

É, portanto, obrigatório preservar a floresta através de abordagens políticas para as atividades relacionadas com a desflorestação e a degradação florestal, e reforçar o papel da conservação e da gestão sustentável (UNFCCC, 2016). Para atingir os objetivos definidos no Acordo de Paris, a Europa estabeleceu áreas-chave de ação através do Pacto Ecológico Europeu, onde se destacam a mobilização da indústria para uma economia limpa e circular, e a construção e reabilitação de forma eficiente em termos energéticos e de recursos (Fetting, 2020). Portugal tem vindo a desenvolver o Roteiro de Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) para atingir o objetivo de neutralidade carbónica (APA, 2019). Por outro lado, o movimento *New European Bauhaus*, um catalisador para a transformação do Acordo Verde Europeu, promove a utilização de madeira para que a Europa alcance a neutralidade carbónica até 2050 (Wood4Bauhaus, 2023). Combinar a madeira com outros materiais, como betão e aço, é uma excelente estratégia para reduzir o desmatamento e a utilização de matérias-primas não renováveis.

5.1 CARBONO BIOGÉNICO

No domínio da engenharia civil, três conceitos são repetidamente usados quando se aborda a sustentabilidade ambiental. A "remoção de CO_2 da atmosfera" consiste na captura e armazenamento deste gás durante longos períodos. Essas ações podem ser feitas de forma natural ou artificial (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Mesmo nos cenários mais otimistas, setores como a aviação e o transporte marítimo continuarão a ser fontes de gases com efeito estufa. Um conceito mais tangível a curto prazo é o de "neutralidade carbónica" que se baseia na argumentação

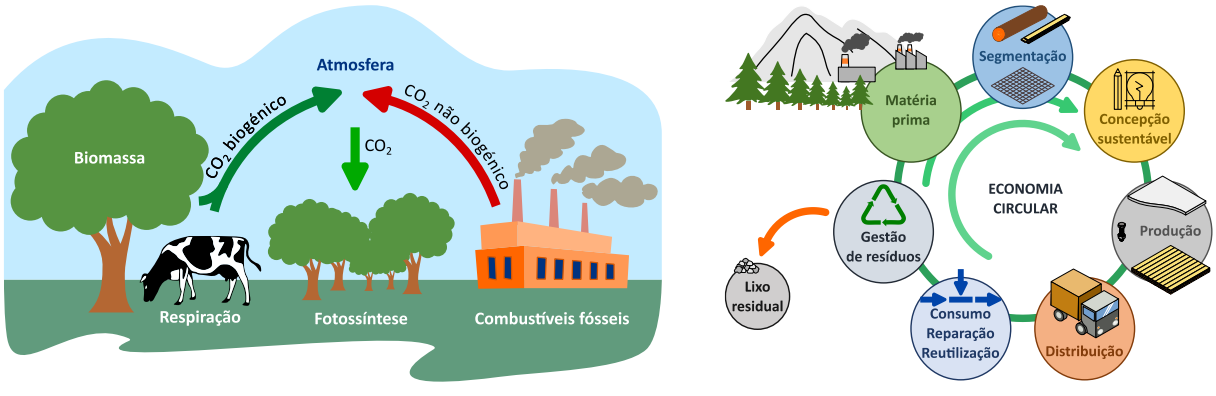
de que se pode continuar a emitir gases para a atmosfera desde que se compense essa emissão com a captura ou remoção de CO_2 da atmosfera e armazenamento. Finalmente, a "retenção de carbono na construção" é um meio para alcançar a neutralidade carbónica e é o foco principal dos investigadores.

O carbono faz parte da constituição de todos os compostos orgânicos e pode ser separado em duas categorias básicas: o carbono que vem dos seres vivos, carbono biogénico, e o carbono que vem de componentes não vivos como combustíveis fósseis ou processos geológicos, carbono não biogénico (Spherica Blog, 2024). A Figura 3 (a) mostra esquematicamente a origem e o ciclo do CO_2. A diferença fundamental entre o CO_2 com origem na biomassa ou na queima de combustíveis fósseis é que esta última, liberta carbono que esteve preso no solo durante milhões de anos, enquanto o carbono emitido pela biomassa faz parte do ciclo biogénico do carbono. Por outras palavras, o CO_2 biogénico não é considerado uma emissão de gases com efeito de estufa se for proveniente de fontes sustentáveis enquanto o CO_2 não biogénico aumenta a quantidade total de carbono no sistema biosfera-atmosfera.

Ao nível da construção, as práticas de contabilização do carbono biogénico são descritas na norma internacional ISO 21930 (2017), que rege as declarações ambientais dos produtos (EPDs, do inglês *Environmental Product Declarations*) para esse fim. No contexto dos produtos de construção em madeira, o carbono biogénico é o carbono sequestrado pela árvore à medida que cresce e que continua a ser armazenado no produto de madeira ao longo da sua vida útil. A ISO 21930 afirma que o carbono biogénico que entra no sistema é caracterizado com um fator de -1, representando a remoção de carbono da atmosfera que ocorre à medida que uma árvore cresce. Contudo, para além do desafio de reduzir o aumento global da temperatura, a indústria da construção deve redesenhar as interações com os materiais para enfrentar a crise climática e, ao mesmo tempo, satisfazer a vasta procura global por novos espaços construídos (Erik Barth, 2023).

5.2 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é um conceito que assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia – ver Figura 3 (b) – e substitui o conceito de economia linear preocupado apenas com o fim de vida útil dos materiais. Caracteriza-se por fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação, num processo integrado com a aquisição de novos modelos empresariais e de mercado e novos padrões de comportamento dos consumidores. Contudo, existirá sempre uma certa linearidade tanto pela necessidade de entrada de recursos virgens no sistema como pela eliminação de produtos residuais (Comissão Europeia, 2014).



(a) **(b)**

Figura 3 – (a) Carbono biogénico e carbono não biogénico (ciclo do CO_2) e (b) economia circular.

Após a COP26 em 2021 (COP26 The Glasgow Climate Pact, 2021), a Neutralidade Carbónica tornou-se o foco principal, especialmente na indústria da construção, com o objetivo de reduzir o impacte das alterações climáticas. Os compromissos assumidos no Acordo de Paris de 2015 (UNFCCC, 2016), estabelecem planos para alcançar este objetivo. A construção é responsável por mais de 37 % das emissões de CO_2 (United Nations Environment Programme, 2024), por isso, este setor tem a responsabilidade de fomentar a mudança para construir uma sociedade sustentável e estabelecer metas alcançáveis. A economia circular oferece à engenharia civil uma solução viável para a redução das emissões de carbono, uma vez que incentiva a eliminação de resíduos, colocando-os no ciclo de reutilização e reciclagem, e a utilização contínua e segura dos recursos naturais, reduzindo a afetação de produtos virgens.

No cenário da economia circular, a conceção do projeto de engenharia deve ser abordada de modo a integrar os objetivos de zero emissões líquidas de carbono e zero resíduos. Existem várias recomendações a ter em conta no momento do projeto (Institution of Civil Engineers, 2021): considerar "não construir nada" como primeira opção – se a necessidade a atender for possível, por exemplo, reaproveitando ou adaptando ativos existentes; avaliar e planear a vida útil de cada ativo do início ao fim; utilizar materiais reciclados e renováveis minimizando a necessidade de recursos novos ou finitos na reparação, manutenção e utilização, bem como na construção e; projetar para a desmontagem em fim de vida útil, fornecendo o máximo de dados possível para apoiar futuros projetistas nos seus esforços para reutilizar cada componente.

6 DISCUSSÃO

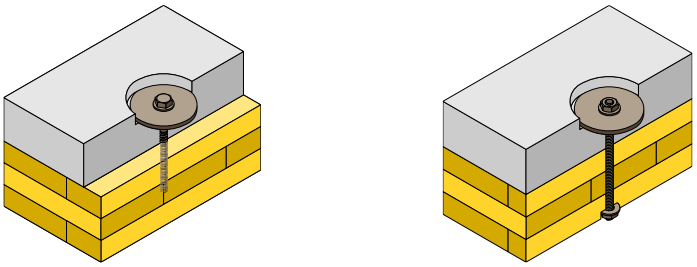
No panorama atual, de sustentabilidade e diretivas governamentais, é essencial pensar discutir e propor soluções enquadráveis num sistema de economia circular. Neste sentido, o presente projeto de discussão propõe um conceito altamente inovador, introduzindo uma nova abordagem para responder a quatro questões fundamentais: 1) tornar o estaleiro mais limpo, mais sustentável e os sistemas de montagem menos pesados; 2) tratar do desacoplamento do sistema de lajes compósitas madeira-betão; 3) permitir a reutilização integral dos elementos e, 4) reduzir os resíduos resultantes da demolição dos edifícios.

Por todas as vantagens já referidas, discute-se a criação de uma laje compósita CLT-betão com um alto desempenho funcional e um imenso potencial para uso não só em reabilitação, mas também em construção nova. Ambiciona-se por uma laje que seja mais leve e com alta resistência mecânica. Para ir ao encontro destas características, a definição do novo sistema passa por uma nova abordagem relativa à camada de betão e conceção de novos ligadores entre o betão e a madeira.

Para a conceção do sistema de laje, propõe-se o desenvolvimento de placas de betão pré-fabricadas, de pequena dimensão e espessura até 60 mm, reduzindo assim os meios pesados de transporte e instalação em obra. Estas placas de betão devem ser posicionadas em cima do CLT, previamente instalado no local, e devidamente conectadas formando um sistema compósito CLT-betão. A pré-fabricação das placas de betão, exclui por completo a necessidade de água no estaleiro, no processo de montagem da laje compósita, mas também minimiza a quantidade de resíduos de betão.

A facilidade de montagem e desmontagem para posterior reutilização é o requisito base, mas garantindo-se uma baixa retração, bom desempenho mecânico e à flexão e limites de deflexão e vibração da laje. Isto consegue-se através da conceção, desenvolvimento e otimização de ligadores mecânicos inovadores, que permitem desacoplar os diferentes elementos sem danos estruturais, e através da pré-fabricação e do controlo de qualidade em fábrica de todos os elementos. Como exemplos de ligações possíveis apresenta-se na Figura 4 (a) uma ligação aparafusada e na Figura 4 (b)

uma ligação com barra roscada. As ligações aparafusadas e roscadas são as que aparentam possuir, pela sua funcionalidade, maior facilidade e desempenho na montagem e desmontagem do sistema.



(a) **(b)**

Figura 4 – Representação esquemática de possíveis ligadores que permitem o desacoplamento (a) parafuso e (b) barra de aço roscada.

Com a introdução da madeira no sistema de laje, por um lado, reduz-se a quantidade de betão e, por outro, incorpora-se um produto detentor de carbono biogénico, promovendo a descarbonização do sistema e contribuindo para a neutralidade carbónica. É importante levar em consideração que o debate e o incentivo pela utilização de espécies locais não devem ser negligenciados. No panorama nacional devem ser criadas políticas de incentivo à gestão integrada dos recursos naturais para minimizar a importação de madeira para aplicação estrutural.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada e discutida uma solução de laje compósita CLT-betão, com o intuito de responder às solicitações da sustentabilidade ambiental, enquadrando a solução no sistema de economia circular e introduzindo um material detentor de carbono biogénico, a madeira, na construção. Almeja-se uma laje compósita de fácil montagem e desmontagem e com excelente desempenho mecânico, funcional e de conforto. A incorporação do painel de madeira processada, CLT, no sistema da laje, serve de suporte para colocação das lajetas de betão e permite a diminuição da quantidade de betão, tornando a solução mais leve e ambientalmente mais sustentável. Contudo, a presença do betão é essencial, permitindo melhor desempenho estrutural, vãos maiores e segurança contra incêndios, entre outras vantagens. As lajetas de betão armado pré-fabricadas são de pequena dimensão para facilitar o transporte e a instalação em obra. Os ligadores mecânicos permitem o estabelecimento de uma conexão compósita entre o betão e a madeira, mas, em contrapartida, permitem também o desacoplamento integral do sistema sem danos estruturais nos componentes no final da vida útil da obra. Esta característica permite integrar esta solução no sistema de economia circular. A pré-fabricação permite excluir a necessidade de água na obra e a redução de resíduos.

No seguimento deste projeto de discussão, prevêem-se campanhas de simulações numéricas e de testes laboratoriais de acompanhamento à conceção, seleção e desenvolvimento dos componentes do sistema, nomeadamente, as placas de betão, os ligadores mecânicos e o sistema compósito.

REFERÊNCIAS

Albino, C., Martins, C., Ferreira, C., Augusto, R., & Dias, A. (2023). Mechanical Behaviour of Notch Connection for Maritime Pine CLT-Concrete Composite. *World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023)*, 3121–3126. https://doi.org/10.52202/069179-0406

Amorim, S. T. A., Ribeiro, G. de O., & Baño, V. (2018, March). *Estudo do Dimensionamento das Lajes do Material Composto: Madeira Laminada Cruzada e Concreto*.

APA. (2019). *Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC2050)*.

Bolduc, L. P. (2021, February 16). *Choosing between wood, concrete and steel structures - Ecohome*. https://www.ecohome.net/guides/1010/how-wood-structures-compare-to-steel-and-concrete/

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74*(3), 331–351. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5

Ceccotti, A. (2002). Composite Concrete-Timber Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *4*(3), 264–275. https://doi.org/10.1002/pse.126

Civil Concept. (2021). *Advantages and Disadvantages of Concrete - Types of Concrete*. https://www.civilconcept.com/advantages-and-disadvantages-of-concrete/

CivilEngineeringTutor. (2016, October 22). *Limitations of Concrete or Disadvantages of Concrete | 8 Reasons*. https://engineeringcivil.org/articles/concrete/limitations-concrete-disadvantages-concrete-8-reasons/

civiltoday.com. (2021). *Advantages and Disadvantages of Concrete*. https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/concrete/15-advantages-and-disadvantages-of-concrete

Comissão Europeia. (2014). *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Para uma economia circular: programa para acabar com os resíduos na Europa (COM/2014/0398 final/2)*.

COP26 The Glasgow Climate Pact. (2021). *UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC*. COP26. https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230401054904/https://ukcop26.org/

Derikvand, M., & Fink, G. (2021). Deconstructable connector for TCC floors using self-tapping screws. *Journal of Building Engineering*, *42*, 102495. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102495

Derikvand, M., & Fink, G. (2022). Bending properties of deconstructable cross-laminated timber-concrete composite floor elements. *Wood Material Science & Engineering*, *17*(4), 253–260. https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2077658

Dias, A., Schänzlin, J., & Dietsch, P. (2018). *Design of timber-concrete composite structures*. https://doi.org/10.2370/9783844061451

Dias, A., Skinner, J., Crews, K., & Tannert, T. (2016). Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74*. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0975-0

Dick, B., Horvath, M., Peralta, P., Mitchell, P., Peszlen, I., Pang, W., Schiff, S., & White, R. (2014). *Fire Performance of Adhesives Used for Southern Pine CLT*. https://www.swst.org/wp/meetings/AM14/pdfs/presentations/dick_wood construction session pdf.pdf

Erik Barth. (2023, April 26). *The Biogenic Materials Revolution Has Begun and Mass Timber Is Leading the Way*. https://www.gensler.com/blog/biogenic-materials-revolution-mass-timber-is-leading-the-way

Eslami, H., Jayasinghe, L. B., & Waldmann, D. (2023). Experimental and Numerical Investigation of a Novel Demountable Timber-Concrete Composite Floor. *Buildings*, *13*(7). https://doi.org/10.3390/buildings13071763

Estévez-Cimadevila, J., Martín-Gutiérrez, E., Suárez-Riestra, F., Otero-Chans, D., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2022). Timber-concrete composite structural flooring system. *Journal of Building Engineering*, *49*, 104078. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104078

European Parliament. (2022, October 25). *Deforestation: causes and how the EU is tackling it*. European Parliament News. https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20221019STO44561/deforestation-causes-and-how-the-eu-is-tackling-it

FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. FAO. https://doi.org/10.4060/ca9825en

Fetting, C. (2020). The European Green Deal. In *ESDN Report*.

Gagnon, S., Bilek, E. M. (Ted), Podesto, L., & Crespell, P. (2013). *CLT handbook: cross-laminated timber* (E. Karacabeyli & B. Douglas, Eds.). FPInnovations.

Gromicko, N., CMI, & Shepard, K. (2020). *The History of Concrete*. https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm

Gustafsson, A., Crocetti, R., Just, A., Landel, P., Olsson, J., Pousette, A., Silfverhielm, M., & Östman, B. (2019). *The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning* (E. Borgström & J. Fröbel, Eds.; First edition). Skogsindustrierna.

Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in europe. *Sustainable Cities and Society*, *34*, 405–418. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013

imarcgroup.com. (2023). *European Cross-Laminated Timber Market Report 2023-2028*. https://www.imarcgroup.com/european-cross-laminated-timber-market

imarcgroup.com. (2024). *European Cross-Laminated Timber Market Report 2024-2032*. https://www.imarcgroup.com/european-cross-laminated-timber-market

Institution of Civil Engineers. (2021, November 15). *The Carbon Project: infrastructure and the circular economy*. https://www.ice.org.uk/news-insight/news-and-blogs/ice-blogs/the-civil-engineer-blog/the-carbon-project-infrastructure-and-the-circular-economy

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Annex VII: Glossary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2215–2256). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.022

Jamal, H. (2017, February 13). *Disadvantages of Concrete in Construction*. https://www.aboutcivil.org/concrete-use-disadvantages.html

Kanters, J. (2018). Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. *Buildings*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/buildings8110150

Lukacevic, M., Autengruber, M., Raimer, T., Eberhardsteiner, J., & Füssl, J. (2021). Effect of cast-in-place concrete application on moisture distribution in timber-concrete composite floors with notched connections, investigated via finite element simulations. *Journal of Building Engineering*, *42*, 103005. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103005

Mirdad, M. A. H., Khan, R., & Chui, Y. H. (2022). Analytical Procedure for Timber-Concrete Composite (TCC) System with Mechanical Connectors. *Buildings*, *12*(7). https://doi.org/10.3390/buildings12070885

Mohammad, M., Gagnon, S., Douglas, B. K., & Podesto, L. (2012). Introduction to Cross Laminated Timber. *Wood Design Focus*, *22*, 3–12.

Navaratnam, S., Widdowfield Small, D., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Thamboo, J., Higgins, C., & Mendis, P. (2021). Development of cross laminated timber-cold-formed steel composite beam for floor system to sustainable modular building construction. *Structures*, *32*, 681–690. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.051

Sandoli, A., D'Ambra, C., Ceraldi, C., Calderoni, B., & Prota, A. (2021). Sustainable cross-laminated timber structures in a seismic area: Overview and future trends. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 5, pp. 1–24). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/app11052078

Schmidt, J., & Griffin, C. (2013). *Barriers to the design and use of cross-laminated timber structures in high-rise multi-family housing in the United States* (pp. 2225–2231). https://doi.org/10.1201/b15267-304

Song, Y.-J., Baek, S.-Y., Lee, I.-H., & Hong, S.-I. (2020). Variations of moisture content in manufacturing CLT-concrete composite slab using wet construction method. *BioResources*, *16*, 372–386. https://doi.org/10.15376/biores.16.1.372-386

Spherica Blog. (2024, March 1). *Qual é a diferença entre carbono biogênico e não biogênico - DEISO*. https://dei.so/pt/what-is-the-difference-between-biogenic-and-non-biogenic-carbon/

Structural Timber Association. (2015, December 3). *Technical Bulletin 11 - Cross-laminated Timber Construction - An Introduction*. Structural Timber Engineering Bulletin. https://www.structuraltimber.co.uk/libraries/technical-documents/

timber-online.net. (2021). *The biggest CLT producers in Central Europe*. https://www.timber-online.net/blog/biggest-clt-producers.html

UNFCCC. (2016). *The Paris Agreement* (Issue FCCC/CP/2015/10/Add.1). United Nations - Framework Convention on Climate Change.

United Nations Environment Programme. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095

Wolfe, S. (2020, July 29). *The Proliferation and Risk Considerations of Mass Timber*. https://www.psfinc.com/articles/proliferation-and-risk-considerations-of-mass-timber/

Wood4Bauhaus. (2023). *Wood Sector Alliance for the New European Bauhaus - wood4bauhaus*. Wood4Bauhaus. https://wood4bauhaus.eu/

Woschitz, R., Deix, K., Huber, C., & Kampitsch, T. (2021). Entwicklung neuartiger Holz-Betonverbunddecken in Fertigteilbauweise. *Bautechnik*, *98*(S1), 12–22. https://doi.org/10.1002/bate.201800097

Yeoh, D., Fragiacomo, M., Aldi, P., Mazzilli, M., & Kuhlmann, U. (2008). *Performance of notched coach screw connection for timber-concrete composite floor system*. *1*, 294–301.

Yeoh, D., Fragiacomo, M., Franceschi, M., & Boon, K. (2011). State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. *Journal of Structural Engineering*, *137*, 1085–1095. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

FINE CARBONATED CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES AS ECO-EFFICIENT MATERIALS IN CEMENT MATRICES

Moisés Frías[a]; Ana María Moreno-Reyes[a]; María Victoria Paredes[a], Raquel Vigil de la Villa[b], Rosario García[b], Sagrario Martínez-Ramírez[c], Asier Oleaga[d], Edurne Erkizia[d],Jaime Moreno[d], Iñigo Vegas[d]

[a]Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC), C/ Serrano Galvache, 4, 28033, Madrid, Spain, e-mail: mfrias@ietcc.csic.es, ana.moreno@ietcc.csic.es, mariavictoria.paredes@ietcc.csic.es
[b]Adepartamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Unidad Asociada al CSIC, C/ Francisco Tomás y Valiente, 7, 28049, Madrid, Spain, e-mail: vigildelavillaraquel@gmail.com, rosario.garcia@uam.es
[c]Instituto de Estructura de la Materia (IEM, CSIC), C/ Serrano, 128, 28006, Madrid, Spain, e-amil: sagrario.martinez@csic.es
[d]Tecnalia, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo bidea, Ed. 700, Parque Tecnológico de Bizkaia, 48160, Derio, Spain, e-mails: asier.oleaga@tecnalia.com, jaime.moreno@tecnalia.com, inigo.vegas@tecnalia.com

ABSTRACT

Currently, alkaline wastes are receiving special attention as CO_2 sinks prior to their use as supplementary cementitious materials as their mineralisation produces mineralogical changes that affect their subsequent behaviour. This work reports the research carried out on the accelerated carbonation, using a HECO® reactor adapted to pilot scale, of the fine fraction of concrete (<4 mm) deposited in a construction and demolition waste (CDW-C) management plant. For this purpose, the chemical, physical and mineralogical characterisation after carbonation is analysed and compared with the same waste without carbonation. The results obtained indicate that the carbonated construction and demolition waste (CCDW) shows a higher surface area and a higher pozzolanic reactivity, with respect to non-carbonated. The cement pastes with 7 and 20% substitutions do not show significant changes in physical properties (normal consistency water, initial setting time and soundness). However, the mechanical strength of carbonated wastes is improved compared to their equivalents non-carbonated. In all cases, the blended cements comply with the physical and mechanical requirements according to EN 197-1.

Keywords: Fine CDW waste, carbonation, mineralogical changes, pozzolanic reaction, physical-mechanical behavior.

1 INTRODUCTION

In the last years, Environmental, Circular Economy and Climate Neutral policies for 2050 are prioritizing the circularity of industrial waste as secondary raw materials for the manufacture of eco-cements with a lower carbon footprint and improving the sustainability of industrial sector (Global Cement and Concrete Association, 2024; Srivastava et al., 2023). In the bibliography, a wide range of industrial waste of different natures can be found wich are viable for the manufacture of future commercial cements, which present greater or lesser pozzolanic reactivity depending on their chemical and mineralogical characteristics, (Becerra-Duitama and Rojas-Avellaneda, 2022; Frías et al., 2017; Lorena Figueiredo Martins et al., 2021; Medina et al., 2020). Currently, construction and demolition waste (CDW) is receiving special attention from the scientific community and the industrial sector, due to the large volume generated annually (500 mtons/year in Europe) which, due to its characteristics, is not biodegradable and its accumulation in controlled landfilss and illegal dumps represents a great negative effect from an environmental, technical, economic and social point of view (Häfliger et al., 2017).

In the coarse fraction of these CDW has an industrial application as a recycled aggregate in construction, through national and international regulations and codes (Agrela et al., 2021) and widely addressed by the scientific community, with the aim of analyzing its influence on recycled mortars and concretes to improve the mechanical and durable performance (Jesus et al., 2019; Liu et al., 2023; Moreno-Juez et al., 2020; Vieira et al., 2011). Currently, research focusing on the circularity on the fine fractions (<5mm) produced during the CDW crusing process, which had no industrial application, due to the accumulation of potenntially spansive compounds (chlorides, sulfates, etc.). However, with the appearence of European Standard 197-6 (AENOR, 2023), an alternative for their recycling as SCMs is opening up. Research has shown that these fine fractions have low pozzolanic reactivity and, therefore, in order not to reduce the performance of blended cements, they should be used in percentages lower than 10% (Frías et al., 2021; Moreno-Juez et al., 2021; Rocha et al., 2023; Zito et al., 2023). One of the new trends to increase the circularity of alkaline industrial wastes in cements with lower carbon footprint and clinker/cement ratio is through an accelerated carbonation pretreatment (CO_2 sinks), whose mineralogical changes are transformed into more stable wastes with improved properties (Ebrahimi et al., 2017; Oleaga et al., 2024; Zhang et al., 2023).

The present research work is based on analyzing the effect of accelerated carbonation in a HECO® reactor with 10% moisture, 100% CO_2 concentration and 85-90% accelerated CO_2 moisture in the fine fraction of concrete from a CDW on the physico-mechanical properties of blended cement pastes made with 7 and 20% substitution.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

In this work, the starting materials used for the preparation of eco-cements were: a commercial Portland cement designated as CEM I 52.5 R (OPC) and the fine fraction of a concrete waste (CDW), wich complies with the requirements described in 197-6 (AENOR, 2023) and from a CDW waste management and treatment plant (Surge Ambiental, Madrid (Spain)), with a particle size of less than 4mm.

2.2 METHODS

2.2.1. Carbonation of CDW-C.

The initial CDW-C was previously carbonated by means of HECO® reactor adapted to pilot scale. The conditions applied were: i) solid moisture (10%RH), ii) CO_2 moisture (85-90%RH), iii) particle size 80-200µm, iv) CO_2 concentration (100%), v) CO_2 gas feed temperature (20ºC) and vi) pressure (1bar). The reactor was fed with a flow of 100% CO_2 of commercial origin, preheated by electrical heating elements to 20ºC and at a continuous rate of 18-20 Nm^3/h for a maximum of 90min. Both CDW-C and CCDW residues were dried in a laboratory oven at 105ºC for 24h and subsequently ground to below 45µm to achieve optimum fineness as a pozzolanic addition.

2.2.2 Instrumental techniques.

The initial materials were characterized using different characterization and identification techniques: Chemical analysis of the minority oxides was carried out by means of a Bruker wavelength dispersive X-ray fluprescence spectrometer (WDXRF), S8 Tijer. The surface area was carried out using a Micromeritics ADSAP 2010 instrument and the particle size distribution was analyzed by laser diffraction using a Malvern Mastersizer 3000 analyzer, equipped with a red and blue light source (He-Ne and LED) in dry scattering mode. The measurement range was from 0.01 to 3500µm. The identification and quantification of the crystalline mineralogical phases (XRD-Rietveld) was carried out with a PANalytical X'Pert PRO diffractometer (Crystallography Open Database (COD) collection of crystal structures) and their quantification using Match v.3 and Fullprof software. The mechanical flexural and compressive strengths were determined in a Ibertest 15000Kn Autoest press. The test applied followed EN 196-2:2014 (AENOR, 2014) and the value given is the average of 3 specimens tested for each paste and age. The normal consistency water and the initial and end setting time were determined by the application of EN 196-3:2017 (AENOR, 2017).

2.2.3 Pozzolanic activity of the wastes.

The analysis and evolution of the mineralogical phases with the curing time (7, 28 and 90d) have used the residues obtained after using an accelerated chemical method in the pure pozzolan/$Ca(OH)_2$ system (San-José et al., 2006). This method consists of adding 1g of pozzolan in 75mL of saturated lime solution, maintained at 40ºC. At the end of the reaction time, the solid obtained is filtered and washed with ethanol alcohol and dried in an oven at 60ºC for 24h to stop the hydration reaction.

2.2.4 Preparation of the blended cement pastes.

Five blended cements were prepared with partial substitutions of 0, 7 and 20% of the OPC for each of the mineralogical additions. For this purpose, the raw materials were homogeneously mixed in a mechanical blender-mixer for 90min. Prismatic specimens of 1 x 1 x 6cm were prepared according to EN 197-1:2018 (AENOR, 2018). These specimens were cured at 2, 28 and 90d under water. Figure 1 shows the final appearance of the cement paste specimens after demolding.

Figure 1 – Appearance of prismatic OPC paste specimens, 7 and 20% CDW-C.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 CARACTERIZATION OF RAW MATERIALS

3.1.1 Chemical characterization

The chemical compositions obtained by XRF of the starting materials are shown in Table 1. The CDW of concrete nature present a silico-calcic nature, with high LOI contents as a consequence of the natural carbonation process during the service life and its subsequent accumulation in the Management Plant and, in addition for the case of CCDW due to the accelerated carbonation process.

Extrapolating the ASTM C618 standard (ASTM C618-23e1, 2023) for artificial pozzolans (fly ash and calcined natural pozzolan) to this type of waste, both CCDW and CDW-C would not meet the chemical requirements ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$) nor the LOI contents (≤10%). However, the new European standard 197-6:2023 (AENOR, 2023) allows the circularity of this type of waste as a mineralogical additions in cements up to 35%, provided that they comply with all the requirements set out in these regulations.

Table 1 – Chemical composition of starting material.

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Others	LOI
OPC	20.06	4.96	3.28	62.19	2.12	3.14	0.37	0.66	0.25	0.28	0.59	2.11
CDW-C	43.81	6.32	1.80	27.13	1.17	0.97	0.47	2.23	0.23	0.09	0.15	15.63
CCDW	39.97	6.65	1.84	27.25	1.28	0.94	0.46	2.18	0.24	0.08	0.16	18.98

3.1.2 Laser granulometry analysis.

The laser grain size distribution density curves for OPC, CDW-C and CCDW are presented in Figure 2. OPC and CDW-C show a single maximum at 25.68 and 13.56µm, respectively, while CCDW shows two main maxima of particle densities located at 7.16 and 25.68µm.

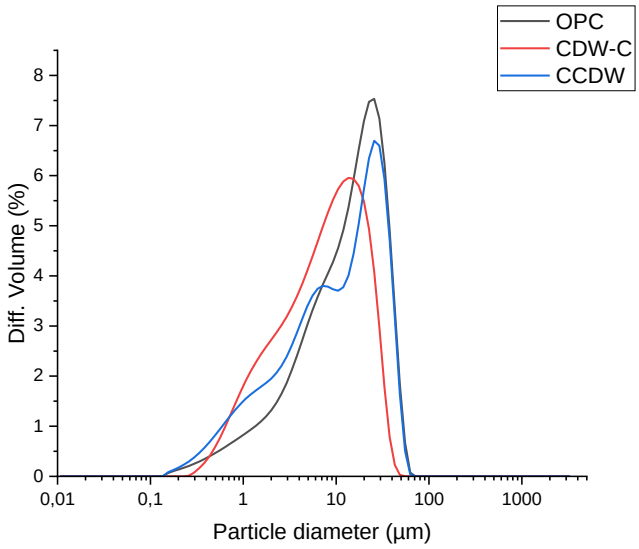


Figure 2 – Density distribution curves of the starting materials.

Table 2 shows the physial parameters of Dv (diameter at which 10, 50 and 90% of the particle volume passes) obtained by laser granulometry and the BET surface area. The effect of carbonation is clearly seen in the BET values, in which the carbonated residue (CCDW) shows a 17.2% increase in specific surface area with respect to the same residue without carbonation.

Table 2 – Dv and BET values for the OPC, CDW-C and CCDW.

Material	**Dv_{10} (µm)**	**Dv_{50} (µm)**	**Dv_{90} (µm)**	**BET (m^2/g)**
OPC	2.11	14.10	34.40	1.22 ± 0.05
CDW-C	1.31	7.72	22.80	5.98 ± 0.04
CCDW	1.19	10.70	33.80	7.02 ± 0.04

3.1.3 DRX-Rietveld analysis.

The mineralogical compositions obtained by XRD-Rietveld for the starting materials are presented in Table 3. In the CDW-C and CCDW wastes, quartz, mica, plagioclase, feldspar and calcite are identified as mineralogical phases. In addition, both wastes have an amorphous phase content of more than 30%.

Quadro 3 – Quantification of mineralogical phases by XRD-Rietveld (R_B and X^2: adjustment factors).

% Minerales	**OPC**	**CDW-C**	**CCDW**
Calcite	-	17	16
Dolimite	-	-	Traces
Mica	-	8	9
Quartz	-	22	14
Plagioclase	-	9	8
K-feldspar	-	6	6

% Minerales	OPC	CDW-C	CCDW
Alite	33	-	-
Larnite	25	-	-
Ferritic phase	10	-	-
Hemihydrate	10	-	-
Tricalcium aluminate	12	-	-
Amorphous	10	38	47
R_B	38.3	17.3	16.4
X^2	7.1	6.9	4.2

3.1.4 Accelerated chemical method.

Figure 3 shows a the fixed lime values of both wastes up to 180 days of pozzolanic reaction. It is observed that CCDW shows a higher capacity to react with the lime in the medium mainly at early ages (≤28d), since at 28d the CCDW has fixed 57.74% of the available lime while the CDW-C only fixes 52.29% of this available lime, which shows that the mineralisation of the CDW-C waste by carbonation produces phases (silica and alumina gels) with a higher degre of reactivity compared to the same waste without carbonation, which will lead to an improvement in performance (Zhan et al., 2013; Zhang et al., 2023).

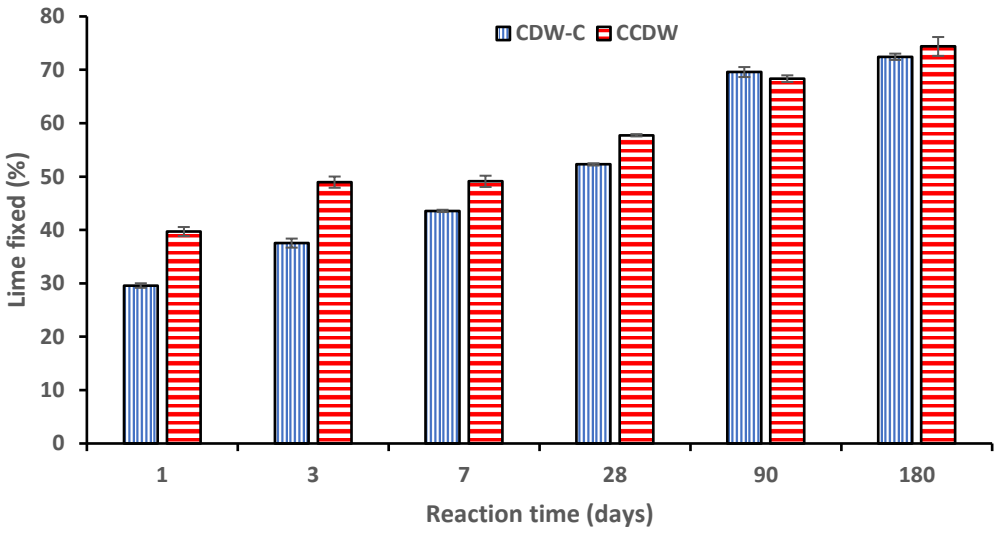


Figura 3 – Development of fixed lime with the reaction time.

3.2 BEHAVIOR OF BLENDED CEMENT PASTES

3.2.1 Physical properties.

Figure 4 shows the results obtained for the physical tests of normal consistency water (NCW), initial setting time (IST) and soundness (S) for the different eco blended cement pastes in fresh state. In addition, the specifications set out in the current European regulations are included.

Table 4 –Physical properties values.

Material	NCW (± 1g)	IST (± 10min)	S (mm)
OPC	150	150	0.1
7% CDW-C	147	155	0.1
20% CDW-C	147	140	0.1
7% CCDW	149	165	0.0
20% CCDW	151	140	0.0
EN 197-1	-	≥ 45-75	≤ 10

According to the results of Table 4, the previous carbonation of the residue does not modify the water content of normal consistency water since values obtained are equal to the reference paste; however, the non-carbonated waste shows a slight decrease. No dependence on the percentage of susbtitution is observed. Regarding the influence of mineralogical additions on the initial setting time, there are practicaly no noticeable differences between carbonated and non-carbonated wastes. With 20% substitution, the IST values are equal (140 min) and slightly lower than the reference paste, possibly due to the filler effect of the pozzolanic and chemical materials because of the high content of carbonates present in the wastes (Asensio et al., 2020) and (Taylor, 1997)

3.2.2 Mechanical properties.

Figure 4 shows the flexural and compressive strength values of the different blended cement pastes produced with 7 and 20% substitution at 2, 28 and 90 days of reaction.

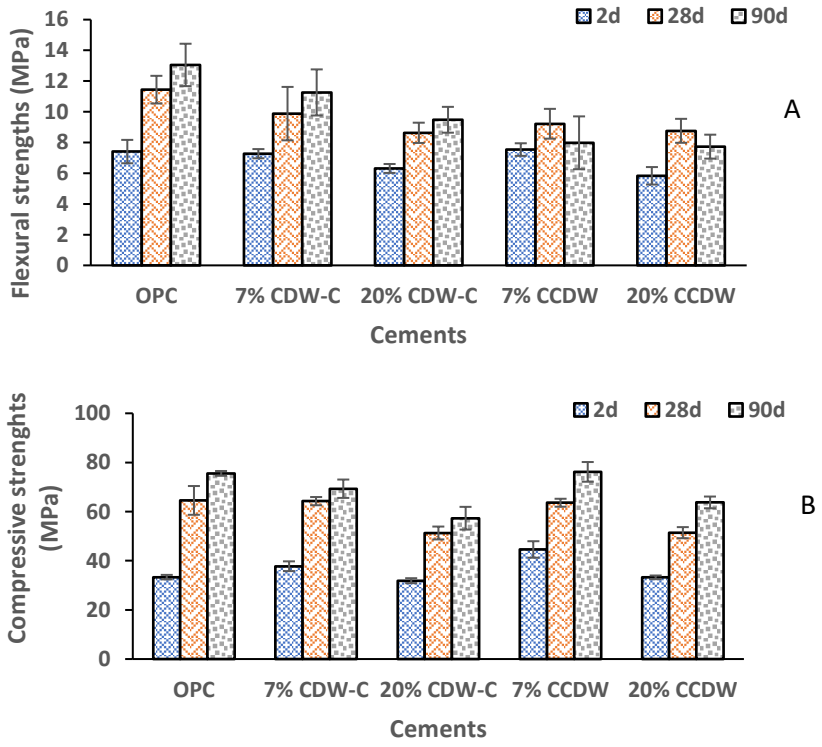


Figure 4 – Flexural (A) and compressive (B) strength values for blended cement pastes.

In general, Figure 4 A) shows that the blended pastes have lower flexural strength values than the reference OPC paste the higher the percentage of substitution by CDW-C. Similar results were obtained by Infante Gomes et al. in CDW blended mortar (Infante Gomes et al., 2021). However, an analysis of the results obtained for both wastes shows that carbonation produces a decrease in the flexural strength results.

However, in graph B) related to the compressive strengths, it is observed that the blended cement pastes present lower compressive values than the OPC paste, carbonation improves the compressive strengths of the pastes, and even at 7 days of curing the 7% CCDW pastes are higher. This corroborated by research on the increased reactivity of carbonate products (silica and amorphous alumina gels) and the presence of high carbonate content to form calcium carboaluminates, which densifies the cement matrix and improves mechanical performance (Monasterio et al., 2022; Zajac et al., 2020).

4 CONCLUSIONS

In this work, the effect of accelerated carbonation in the fine fraction of CDW on the physico-mechanical properties of blended cement pastes prepared with 7 and 20% substitution has been studied.

CCDW has higher CaO fixation rates than CDW-C at ages below 28 days because carbonation of CDW-C produces more reactive mineralogical phases that improve performance.

The physical characterisation of the samples shows that there are no significant differences in water consistency compared to the reference paste. However, the carbonated waste (CCDW) shows a slight decrease. No dependence on the percentage of susbtitution is observed.

The carbonated and non-carbonated additions have no influence on the IST, with the IST being equal (140 min) for both additions when added to the OPC at 20% and lower than for the reference paste.

The mechanical characterization of the pastes shows that with an increase in the percentage of substitution (up to 20% wt%.) there is a slight decrease in the flexural strengths with respect to the OPC paste. In addition, carbonation produces a decrease in the flexural strengths between the two wastes.

The compressive strengths are lower than the reference ones. However, the carbonation process improves the mechanical behaviour due to the higher reactivity and higher content of carbonate products.

According to the results obtained, the possibility of using CDW in applications other than recycled aggregate is open, either through European regulation 197-6 as fine aggregate or as CO_2 sinks prior to its incorporation into the cement matrix.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation (MICINN), the Spanish National Research Agency (AEI) and the European Regional Development Fund (ERDF), Ref.: PID2021-122390OB-C21 (CIDECAR) and also to the funding of the pre-doctoral contract referenced as PRE2022-105386.

REFERENCES

AENOR, (2023). European Standard 197-6. Cement - Part 6: Cement with recycled building materials.

AENOR, (2018). EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

AENOR, (2017). EN 196-3. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

AENOR, (2014). EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.

Agrela, F., Alaejos, P., Thomas, C., Rueda, J., Silva, R.V., Moreno-Juez, J., Sanjuán, M.A., de Brito, J., Sánchez de Rojas, M.I., (2021). Chapter 26 - Normative review and necessary advances to promote the use of recycled aggregates and by-products in cement-based materials, Elsevier, Waste and Byproducts in Cement-Based Materials. Woodhead Publishing, 735–776. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00001-2

American Standard ASTM C618-23e1. Standard specification for coal fly ash and raw or clacined natural pozzolan for use in concrete, (2023).

Asensio, E., Medina, C., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., (2020). Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements. Journal of Cleanear Production, 265:121610. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121610

Becerra-Duitama, J.A., Rojas-Avellaneda, D., (2022). Pozzolans: A review. Engineering and Applied Science Research, 49:495–504. http://doi.org 10.14456/easr.2022

Ebrahimi, A., Saffari, M., Milani, D., Montoya, A., Valix, M., Abbas, A., (2017). Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO_2 carbonation. Journal of Cleanear Production, 156:660–669. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.037

Frías, M., Martínez-Ramírez, S., de la Villa, R.V., Fernández-Carrasco, L., García, R., (2021). Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolition waste: Microstructural analysis of viability. Cement and Concrete Research, 148:106531. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106531

Frías, M., Rodríguez, O., Sanchez de Rojas, M.I., Villar-Cociña, E., Rodrigues, M.S., Savastano Junior, H., (2017). Advances on the development of ternary cements elaborated with biomass ashes coming from different activation process. Construction and Building Materials, 136:73–80. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.018

Global Cement and Concrete Association, (2024). https://gccassociation.org/ concretefuture.

Häfliger, I.-F., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M.R.M., Habert, G., (2017). Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. Journal of Cleanear Production, 156:805–816. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052

Infante Gomes, R., Bastos, D., Brazão Farinha, C., Pederneiras, C.M., Veiga, R., de Brito, J., Faria, P., Santos Silva, A., (2021). Mortars with CDW Recycled Aggregates Submitted to High Levels of CO_2. Infrastructures, 6:159. https://doi.org/10.3390/infrastructures6110159

Jesus, S., Maia, C., Brazão Farinha, C., de Brito, J., Veiga, R., (2019). Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. Construction and Building Materials, 229:116844. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844

Liu, X., Jing, H., Yan, P., (2023). Statistical analysis and unified model for predicting the compressive strength of coarse recycled aggregate OPC concrete. Journal of Cleanear Production, 400:136660. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136660

Lorena Figueiredo Martins, M., Roberto Ribeiro Soares Junior, P., Henrique da Silva, T., de Souza Maciel, P., Peixoto Pinheiro, I., Cesar da Silva Bezerra, A., (2021). Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials. Construction and Building Materials, 310:125172. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125172

Medina, J.M., Rojas, M.I., Bosque, I.F.S. del, Frías, M., Medina, C., (2020). Sulfate Resistance in Cements Bearing Bottom Ash from Biomass-Fired Electric Power Plants. Applied Sciences, 10(24):8982. https://doi.org/10.3390/app10248982

Monasterio, M., Caneda-Martínez, L., Vegas, I., Frías, M., (2022). Progress in the influence of recycled construction and demolition mineral-based blends on the physical–mechanical behaviour of ternary cementitious matrices. Construction and Building Materials, 344:128169. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128169

Moreno-Juez, J., Vegas, I.J., Frías Rojas, M., Vigil de la Villa, R., Guede-Vázquez, E., (2021). Laboratory-scale study and semi-industrial validation of viability of inorganic CDW fine fractions as SCMs in blended cements. Construction and Building Materials, 271:121823. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121823

Moreno-Juez, J., Vegas, I.J., Gebremariam, A.T., García-Cortés, V., Di Maio, F., (2020). Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-

based products. Journal of Cleanear Production, 263:121515. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121515

Oleaga, A., Vegas, I., Pablos, A., Vigil, R., Martínez-Ramírez, S., García, R., Moreno-Reyes, A.M., Frías, M., (2024). High efficiency contact technology customized for accelerated carbonation of both steel ladle furnace slags and recycled concrete fines for novel low carbon supplementary cementitious materials production. Cement and Concrete Research. Under review.

Rocha, J.H.A., Tinoco, M.P., Toledo Filho, R.D., (2023). The effect of recycled concrete powder (RCP) from precast concrete plant on fresh and mechanical properties of cementitious pastes. Materials of Construction, 73:e325. https://doi.org/10.3989/mc.2023.351923

San-José, I.V. and M.F. and J.U. and J.T., Frías, M., Urreta, J., San José, J.T., (2006). Obtención de una adición puzolánica a partir de la calcinación controlada de lodos de destintado de papel: estudio de prestaciones en matrices de cemento. Materials of Construction, 56:49–60. http://dx.doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i283.8

Srivastava, R.R., Rajak, D.K., Ilyas, S., Kim, H., Pathak, P., (2023). Challenges, Regulations, and Case Studies on Sustainable Management of Industrial Waste. Minerals, 13:51. https://doi.org/10.3390/min13010051

Taylor, H.F.W., (1997). Cement chemistry, 2nd edition. ed. London: Thomas Telford Publishing.

Vieira, J.P.B., Correia, J.R., de Brito, J., (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. Cement and Concrete Research, 41:533–541. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002

Zajac, M., Skocek, J., Durdzinski, P., Bullerjahn, F., Skibsted, J., Ben Haha, M., (2020). Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. Cement and Concrete Research, 134:106090. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106090

Zhan, B., Poon, C., Shi, C., (2013). CO_2 curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates. Cement and Concrete Composites, 42:1–8. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.013

Zhang, L., Zha, X., Ning, J., Li, W., (2023). Research Status on the Application Technology of Early Age Carbon Dioxide Curing. Buildings, 13:957. https://doi.org/10.3390/buildings13040957

Zito, S.V., Irassar, E.F., Rahhal, V.F., (2023). Recycled Construction and Demolition Waste as Supplementary Cementing Materials in Eco-Friendly Concrete. Recycling, 8:54. https://doi.org/10.3390/recycling8040054

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ASSESSMENT OF MORTAR WITH FINE RECYCLED AGGREGATES AND NANOPARTICLES OF TITANIUM DIOXIDE UNDER ACCELERATED CARBONATION

Viviana Letelier[a,*]; Jonathan Suazo-Hernández[b,c]; Alejandro Suazo[a]; Marión Bustamante[d], Bruno Wenzel[a]

[a]Department of Civil Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, 4780000, Chile, viviana.letelier@ufrontera.cl

[b]Center of Plant, Soil Interaction and Natural Resources Biotechnology, Scientific and Biotechnological Bioresource Nucleus (BIOREN-UFRO), Universidad de La Frontera, Temuco, 4780000, Chile

[c]Department of Chemical Sciences and Natural Resources, Universidad de La Frontera, Temuco, 4780000, Chile

[d]PhD Student, Doctoral Program in Engineering at the MacroFacultad de Ingeniería UFRO-UBB-UTAL, Temuco, 4780000, Chile

RESUMO

The controlled utilization of recycled concrete aggregates (RCA) has emerged as a sustainable practice to mitigate the depletion of natural resources. However, their use remains limited to reduced percentages, particularly for fine recycled concrete aggregates (FRA), due to their inferior properties such as increased water absorption and porosity resulting from the old adhered mortar. This study explores a novel approach involving the use of titanium dioxide engineered nanoparticles (TiO_2-ENPs) to coat 100% FRA in percentages of 0.5%, 1% and 2% by weight of aggregates. The mortars coated with TiO_2-ENPs exhibited reduced porosity. The compressive and flexural strength results showed an increase, reaching values close to those of the mortar made with natural aggregates (NA). This study showed the promising potential of utilizing TiO_2-ENPs to effectively reuse 100% FRA in mortars, providing a viable path towards sustainable construction practices and resource conservation.

Palavras-chave: Fine recycled aggregates, Mortar, Engineered nanoparticles, Microstructure

1 INTRODUCTION

Population growth, continuous industrial development, and increasing construction activities generate large amounts of construction and demolition waste (CDW) every day (Tam et al., 2018). The utilization of CDW has multiple benefits, such as reducing the consumption of natural resources, the amount of waste sent to landfills, and greenhouse gas emissions, which is a huge benefit for the sustainability of the planet (Santha Kumar, 2019; Wijayasundara et al., 2018). In particular, it is estimated that CDW generation in the European Union (EU) is between 850 to 880 Mt/year (Evangelista et al., 2015). In Europe, the average recycling rate is 50%, with countries such as Denmark, Estonia, and the Netherlands recycling more than 90% of their CDW (Saiz Martínez et al., 2016). However, to address the problem of reducing, reusing, and recycling of CDW, the EU has set a target of recycling 70% of the CDW produced by 2050 (Evangelista et al., 2015). Currently, the construction industry in Chile generates twice as much CDW per square meter as in developed countries (Ossio et al., 2020). In this sense, the Chilean standard NCh3562:2019 (2019) establishes the guidelines for a CDW management that minimizes the impacts associated with the generation of these wastes, although in the absence of a legal decree, this standard is ultimately voluntary (Véliz et al., 2022).

Within CDW, concrete rubble has a high participation, close to 50% (Tam & Tam, 2007). Recycled concrete aggregates (RCA) can be obtained from these wastes. Among them are fine recycled concrete aggregates (FRA), which have a size smaller than 5 mm, and their use is limited compared to coarse recycled concrete aggregates (CRA) due to their higher content of old adhered mortar, which leads to high porosity and contributes to those cementitious composites having a higher percentage of water absorption, thus reducing their workability (Etxeberria et al., 2007; Martínez-García et al., 2022; Saiz Martínez et al., 2016), making it one of the main factors limiting the use of FRA in cement-based materials (CBM). Faced with this situation, FRA treatments with tannic acid (L. Wang et al., 2020), crumb rubber (Letelier et al., 2021), water treatment sludge aggregate (de Oliveira Andrade et al., 2018), gypsum contamination (Colman et al., 2021), glass cullet (Ye et al., 2022), carbonation (Kaddah et al., 2022), nanostructure of calcium-silicate-hydrates (C-S-H) (Akono et al., 2021), and Al_2O_3 nanoparticles (Nazari et al., 2010), among others, have been used to improve the mechanical and physical properties of mortars. In particular, the use of engineered nanoparticles (ENPs) has allowed the improvement of the microstructure of CBM, favoring properties such as porosity, water absorption, durability, and mechanical strength (Li et al., 2017; Yang et al., 2021). This is due to the fact that ENPs exhibit a property called nucleation, which corresponds to the ability of particles to group together and form microstructures (Sun et al., 2020). This phenomenon is very beneficial in the production of mortars, since ENPs can promote the sealing of pores in these matrices, thus inducing a much more compact and denser microstructure due to the acceleration of the formation of the C-S-H gel, which is responsible for the refinement of its microstructure (Tobón et al., 2015).

One of the ENPs that has shown the greatest advantages in this type of application are titanium dioxide (TiO_2) ENPs. As investigated by Meng et al. (2012), the incorporation of 5% and 10% TiO_2-ENPs replacement cement increased the compressive strength of cement mortar at 1 day by 46% and 47%, respectively. However, after 28 days, the compressive strength decreased by 6% and 9% with respect to the same replacement percentages. This showed that the effect of ENPs accelerating the hydration process on strength was dependent on the aging time and the percentage of cement substitution (Xu et al., 2020). These results were due to the fact that more space available for CH groups to react favors the formation of hydration products (Moro et al., 2021).

Therefore, the aim of this study was to coat the FRA with TiO_2-ENPs in order to improve its properties. Thus, the authors analyzed the behavior of the combined treatment in a 100% replacement of FRA, so different series of FRA with and without treatment were characterized and compared with NA; then the physical, mechanical and microstructural properties of the mortars were evaluated.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 CEMENT

High-strength cement was used to manufacture the series of mortars, which according to its technical data sheet has a specific weight of 3 g/cm³, a Blaine specific surface area of 5000 cm²/g, and an initial and final setting time of 90 and 125 min, respectively. According to the ASTM C595 standard (2021) this cement is classified as Type IP (Portland-Pozzolanic cement).

2.2 AGGREGATES

The natural aggregates were obtained from a regional company in Chile, while the FRA were obtained by crushing a floor slab with 28 days of curing and a specific strength of 25 MPa. The physical and mechanical properties of the NA and FRA are presented in Table 1.

Table 1 – Physical properties of the aggregates.

Aggregate type	Specific gravity (OD) (g/cm³)	Specific gravity (SSD) (g/cm³)	Apparent specific gravity (g/cm³)	Water absorption (%)
FNA	2.37 ± 0.05	2.42 ± 0.04	2.50 ± 0.03	2.20 ± 0.01
FRA	2.18 ± 0.01	2.35 ± 0.01	2.65 ± 0.01	8.16 ± 0.08
FRA-Ti0.5	2.15 ± 0.01	2.32 ± 0.01	2.61 ± 0.01	8.16 ± 0.09
FRA-Ti1	2.12 ± 0.00	2.29 ± 0.01	2.55 ± 0.01	7.92 ± 0.13
FRA-Ti2	2.17 ± 0.00	2.34 ± 0.01	2.60 ± 0.02	7.58 ± 0.17

*OD: oven-dry, SSD: saturated-surface-dry.

2.3 ENGINEERED NANOPARTICLES (ENPS)

TiO_2-ENPs were acquired from US Research Nanomaterials INC, Houston, TX USA. These nanoparticles had a size of 30 nm, a purity of 99%, a specific surface area of 35-60 m²/g, a bulk density of 0.25 g/cm³ and a rutile-based crystal structure.

2.4 AGGREGATE TREATMENT

The first treatment performed corresponds to the coating of the recycled aggregate with percentages of 0.5%, 1% and 2% TiO_2-ENPs by weight of the aggregates (i.e., FRA-Ti0.5, FRA-Ti1 and FRA-Ti2, respectively). For the coating process, the TiO_2-ENPs were stirred and dispersed in distilled water at a ratio of 15% of the aggregate mass for 3 min. The TiO_2 slurry was then mixed with the aggregate for another 3 min and allowed to dry to a saturated surface dry (SSD) condition to produce the mortars. Figure 1 illustrates the procedure of the treatment carried out on the FRA only with TiO_2-ENPs, for the elaboration of the modified mortars; while Table 1 details the physical properties of the aggregates with and without treatment.

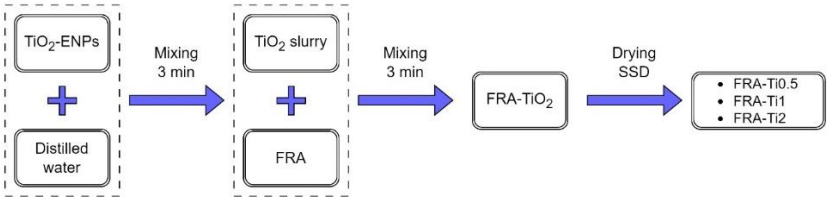


Figure 1 – Treatment process diagram of FRA.

2.5 MIX PROPORTIONS

A total of five series were considered for this study, where initially a control series consisting of NA (i.e., NM) was prepared, while for the other series 100% FRA was used as a replacement for NA. In this regard, a control series consisting of FRA without the treatment was also prepared (RM). In addition, as mentioned in the treatment of recycled aggregate (See section 2.4), three series were prepared with FRA coated with 0.5%, 1% and 2% TiO_2-ENPs (w/w) (i.e., RM-Ti0.5, RM-Ti1 and RM-Ti2, respectively). The w/c ratio of 0.63 was determined based on the Chilean standard NCh2257/1.Of1996 (1996), corresponding to a fix mass of water of 282 g. The aggregates mass used for both NA and FRA was of 1344 g, which was used to calculate the mass of TiO_2-ENPs used for series RM-Ti0.5, RM-Ti1 and RM-Ti2 corresponded to 6.72 g, 13.44 g and 26.88 g, respectively. Related to the cement, this was fixed for all series to 448 g.

2.6 DENSITY, ABSOPRTION AND POROSITY

Density, water absorption and porosity tests were performed according to the ASTM C642 (2021). Cylindrical specimens of 10 cm in diameter and 20 cm in height were used, which were cut into three slices of 5 cm in height after 28 days of curing. In order to carry out the test, the submerged, saturated surface dry and dry masses of the specimens were determined in order to perform the pertinent calculations and obtain the desired parameters.

2.7 CAPILLARY ABSOPRTION

For the capillary absorption test, specimens with a diameter of 10 cm and a height of 5 cm were tested with a curing time of 28 days. The test was carried out according to the ASTM C1585 standard (2020) and consists in determining the increase in mass of the specimens as a function of time when one of their faces is in contact with water. To achieve this, the side and top faces were covered with an impermeable material and then the mass was recorded at certain time intervals during the first 6 h to obtain the initial capillary absorption rate.

2.8 THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL DIFFUSIVITY

Thermal conductivity was determined according to the ISO 22007-2 standard (2008). Specimens with a diameter of 10 cm and a height of 5 cm were used and the measurements were performed using a Hot Disk TPS 1500 device, through which heat is transmitted to the specimen under test and the thermal gradient is recorded, providing the thermal conductivity in W/mK. The samples were kept at a constant temperature of 20 °C during the test.

2.9 FLEXURAL STRENGTH

The flexural strength test was performed according to the Chilean standard NCh158.Of67 (1967). For this test, four specimens were made in molds with dimensions of 16 cm X 4 cm X 4 cm, which were analyzed after 7 and 28 days of curing. Prior to this test, the mass and dimensions of the specimens were recorded, and the central length was determined, which is where the load was applied during the test. A CONTROLS MCC Multitest device was used, which has two 10 mm rollers separated by a distance of 100 mm. For this test, the load was applied at a rate of 0.09 MPa/s for the 7-day specimens, and 0.15 MPa/s for the 28-day specimens, and for both the test ended when the specimen fractured.

2.10 COMPRESSIVE STRENGTH

The compressive strength was determined according to the Chilean standard NCh158.Of67 (1967). For this test, the two pieces obtained from the fractured specimens in the flexural test were used. The test was performed with a CONTROLS MCC Multitest device, using a 40 mm X 40 mm section. The load was applied to one of the two side faces of the mold, and the loading rate was 1.5 MPa/s for 7 and 28 days of curing.

2.11 X-RAY DIFFRACTION (XDR)

For X-ray diffraction (XRD) analysis, samples were prepared for some of the mortars in a powder with a size smaller than 0.075 mm for the series tested and a Bruker D2PHASER device with an X-ray tube (Cu 1.54 Å) was used. The diffractogram of the samples was obtained in a 2θ range between 10° and 80°, with a step size of 0.061°.

2.12 THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA)

The thermogravimetric analysis (TGA) of some of the mortar samples carried out using a simultaneous thermal device Q600 SDT of TA Instruments with a powder size of less than 0.075 mm for the tested series; at a heating rate of 20 °C/min until reaching 1000 °C, in order to maintain a constant temperature for 10 min, where the mass changes of the samples were recorded.

2.13 SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)

Images of the morphology of the mortar samples were obtained using a scanning electron microscope coupled to an energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), model HITACHI SU3500. The SEM-EDS equipment has a working distance of 12 ± mm and a voltage of 10 kV.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 PHYSICAL PROPERTIES OF MORTARS

3.1.1 Density, absorption and porosity

Table 2 shows the results of the apparent density, water absorption and porosity of the mortars after 28 days, respectively. With respect to the apparent density, it is possible to observe that it remained stable and there were no great variations within all the series studied, except for the RM and RM-Ti1 series, which showed a decrease of 11.1% and 6.5% in relation to the control series (NM), respectively. On the other hand, as expected due to the more absorbent and porous properties of the FRA, the

water absorption and porosity suffered an increase of 34.8% and 19.8% when the NA was replaced by the FRA, respectively.

Table 2 – Physical properties of the mortars at 28 days.

Sample	Apparent density (g/cm)	Water absorption (%)	Porosity (%)	Capillarity (mm/s²)	Thermal conductivity (W/mk)
NM	19.901 ± 0.062	11.274 ± 1.117	22.402 ± 1.524	0.062 ± 0.007	0.748 ± 0.012
RM	17.679 ± 0.024	15.188 ± 0.631	26.842 ± 0.787	0.072 ± 0.004	0.704 ± 0.070
RM-Ti0.5	19.378 ± 0.005	8.617 ± 0.459	16.700 ± 0.934	0.042 ± 0.003	0.760 ± 0.040
RM-Ti1	18.581 ± 0.016	12.97 ± 0.303	24.097 ± 0.365	0.064 ± 0.006	0.743 ± 0.020
RM-Ti2	19.559 ± 0.046	8.174 ± 1.746	14.234 ± 0.932	0.036 ± 0.007	0.753 ± 0.037

On the other hand, when the FRA was coated with 0.5% and 2% TiO_2-ENPs, a positive effect on both water absorption and porosity of the series was observed, showing that the ENPs would be homogeneously distributed, contributing to the improvement of the microstructure of the aggregate and the cementitious matrix of the mortar (Li et al., 2017; Zhang et al., 2015). This implies a refinement and densification of the mortar microstructure, since ENPs use the pores as nucleation sites, i.e., as places where they can group together to form microstructures due to their filler effect and high specific surface area (Francioso et al., 2019). This phenomenon can promote the hydration of Al_3S, favoring the formation of primary hydration products such as calcite and the C-S-H gel group (Chen et al., 2012). In addition, the C-S-H gel group is responsible for refining the microstructure and hardening at early ages (Ridi et al., 2011). However, an increase in the percentage of water absorption and porosity was observed in the RM-Ti1 series, probably due to agglomeration associated with low dispersion of ENPs. In other words, this indicates that the ENPs are clustered in certain zones, negatively affecting a homogeneous sealing of the pores along the mortar microstructure (Hwang et al., 2008).

It is worth mentioning, that for the series of mortars with TiO_2-ENPs, water absorption and porosity values were obtained up to 27.5% and 28.9% lower than the control series, respectively, with the exception of the RM-Ti1 series due to a possible agglomeration of the nanoparticles.

3.1.2 Capillary absorption

The initial capillary absorption rate of all series is shown in Table 2. First, it can be observed that all the series treated with TiO_2-ENPs, except RM-Ti1, obtained favorable results, being between 28.6% and 48.0% lower than the control series.

Meanwhile, in the series with FRA coated with different doses of TiO_2-ENPs, there is a decrease in capillarity compared to the control series, indicating that these ENPs improved the initial capillary absorption rate. This phenomenon is mainly due to the fact that ENPs with a large specific surface area promote the reduction of capillary pores through the nucleation effect (Fernandes et al., 2020). On the other hand, similar to the data reported for density and water absorption, it is observed that the RM-Ti1 series showed an increase of 52.4% with respect to the RM-Ti0.5 series and 75% with respect to the RM-Ti2 series. In particular, this increase may be due to the aforementioned agglomeration process of the ENPs, which generates a heterogeneous pore sealing in the microstructure, meaning that the expected improvements are not optimally developed. This has a negative effect on the pore structure and consequently on the capillary absorption (Ma et al., 2015).

3.1.3 Thermal conductivity and thermal diffusivity

Table 2 shows the results of the thermal conductivity. It can be seen that the treatment with TiO_2-ENPs had a higher thermal conductivity value compared to the RM series. This suggests the possible formation of a denser microstructure with a lower amount of porosity. These results are supported by the percentages of porosity obtained (see Table 2) where it was observed that the lower the porosity, the higher the thermal conductivity and vice versa. In addition, it is likely that the ENPs act as a filler, densifying the microstructure (Zaidi et al., 2019) and causing an improvement in this property.

3.2 MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS

3.2.1 Compressive strength

Table 3 shows the results obtained from the compressive strength test at 7 and 28 days. As can be seen, in contrast to the results obtained for the physical properties, although not all series achieved favorable values, some showed promising strengths with slight decreases considering the use of 100% FRA as a replacement for fine NA. In general, it can be observed that the mortar with FRA without treatment had the greatest decrease in compressive strength. When using ENPs alone, the compressive strength decreased as the percentage of ENPs increased, probably due to saturation and agglomeration of ENPs, which prevented uniform dispersion and created mechanically defective spots (Sun et al., 2020). Meanwhile, the combined treatment allowed obtaining strengths closer to the NM series, with an optimum of 1% ENPs.

In particular, at 7 days, the greatest increase in the compressive strength of the specimens occurred when the FRA was modified with 2% TiO_2-ENPs (RM-Ti2), which represents an increase of 18.6% with respect to the RM series. TiO_2-ENPs act by reacting with the C_3S group, which is responsible for the early strength obtained by the mortars (Lee & Kurtis, 2010; Ridi et al., 2011). This promotes the formation of the C-S-H gel group, which is mainly responsible for the mechanical properties (Ridi et al., 2011).

Regarding the results at 28 days, they show that the compressive strength was higher for the series coated with a lower dosage of TiO_2-ENPs. According to that reported by Chen et al. (2012), the increase in the hydration rate of Al_3S that occurs after the incorporation of TiO_2-ENPs favors the formation of primary hydration products, such as the C-S-H and CH gel groups. This results in a denser and more compact microstructure with a lower amount of porosity in a very rapid manner, reducing the space for this process to further develop at older ages (Fernandes et al., 2020; Xu et al., 2020; Zhang et al., 2015); which is complemented by the filler effect of these ENPs. This is consistent with what was observed at 7 days, where the RM-Ti2 series showed the greatest strength, while at 28 days the increase was 6.8% with respect to the RM series.

Table 3 – Mechanical properties of the mortars at 28 days.

Sample	Compressive strength 7 days (MPa)	Compressive strength 28 days (MPa)	Flexural strength 7 days (MPa)	Flexural strength 28 days (MPa)
NM	27.27 ± 0.82	36.12 ± 2.65	4.36 ± 0.23	5.53 ± 0.56
RM	22.52 ± 0.63	27.54 ± 0.74	4.41 ± 0.14	4.92 ± 0.42
RM-Ti0.5	25.55 ± 1.73	32.43 ± 1.49	4.57 ± 0.61	6.49 ± 0.27
RM-Ti1	22.43 ± 0.35	30.4 ± 1.26	4.68 ± 0.11	5.53 ± 0.32
RM-Ti2	26.7 ± 2.13	29.4 ± 2.82	5.17 ± 0.14	5.56 ± 0.27

3.2.2 Flexural strength

Table 3 shows the flexural strength results at 7 and 28 days. It can be seen that the flexural strength at 7 days is higher for all treatment compared to the control series.

Likewise, when looking in more detail at each of the series at 28 days, it is visualized that the series with 0.5% TiO_2-ENPs presented higher strength, while at higher doses of ENPs decreases between 6.3% and 9.3% are observed. This may be mainly due to the agglomeration of ENPs, which prevents them from being uniformly distributed on the aggregate(Liu et al., 2015), creating areas with a higher amount of ENPs than others and consequently implying a lower strength, as there are areas of the specimen more prone to failure. Meanwhile, with doses of 0.5% and 1% ENPs, an improvement in mechanical strength is achieved, rapidly consuming the available CH groups and preventing that at older ages there is room for this strength to further increase(Moro, Francioso, & Velay-Lizancos, 2020), with the optimum TiO_2-ENPs content being 1%. This indicates that the use of TiO_2-ENPs at low doses promotes early flexural strength, which could be confirmed by other investigations where the optimum content of different ENPs such as TiO_2 (Moro, Francioso, Schrager, et al., 2020), Al_2O_3 (Nazari et al., 2010) and ZnO (Arefi & Rezaei-Zarchi, 2012) is between 0.5% and 1%, with a decrease in flexural strength at higher doses of ENPs (Francioso et al., 2019).

3.3 MORTAR CHARACTERIZATION

3.3.1 X-ray diffraction

Figure 2 presents the diffractograms of only some series, among which those with the highest percentage of TiO_2-ENPs (2%) were considered . The qualitative XRD analysis showed for the different series of mortars that the most pronounced peaks are associated with the calcite (C) phases at 29° and portlandite (P) at 17° and 34° (Scrivener et al., 2016). The presence of both phases indicates a favorable development of hydration products, resulting in an increase in C-S-H gel production (Pane & Hansen, 2005a). Since these hydration products are responsible for the microstructural refinement, it is observed that the highest peak occurs for the RM-Ti2 series. On the other hand, the peaks corresponding to feldspar (F) and quartz (Q) are related to the mineralogical composition of the aggregate, being of siliceous origin. In addition, at 28° a peak corresponding to albite (A) is observed, which according to Arivumangai et al. (2021), together with quartz is one of the main crystalline phases of the granite, so it is related to the aggregate used.

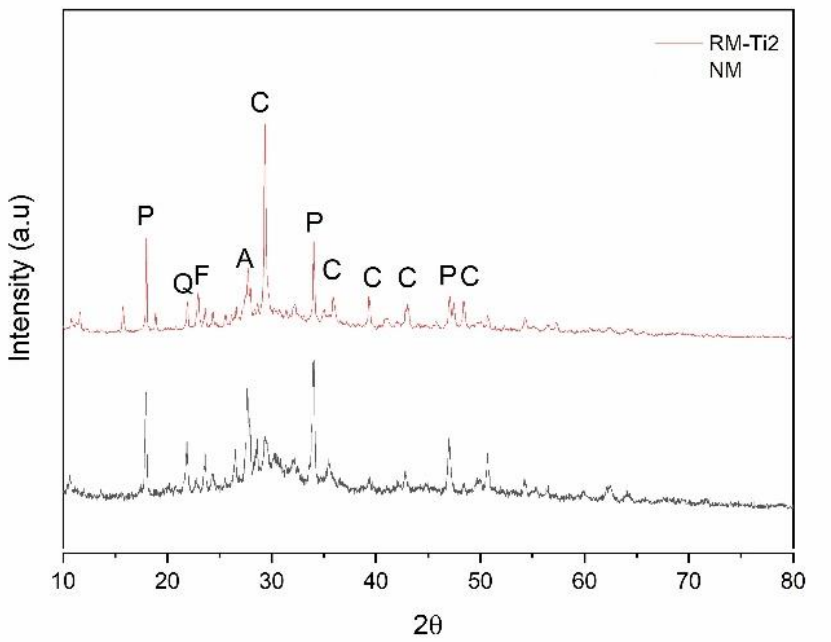


Figure 2 – XRD pattern of mortar samples at 28 days. A: albite, C: calcite, F: feldspar, P: portlandite, Q: quartz.

3.3.2 Thermogravimetric analysis

Figure 3 presents the DTG differential curves of only some series for better clarity in the image, showing only the NM and RM-Ti2 series, as well as the areas associated with the main peaks. From this plot it is possible to observe the presence of several decomposition intervals, associated with C-S-H groups (100-190 °C), portlandite minerals (450-500 °C) and calcite (650-790 °C) (Pane & Hansen, 2005b; Scrivener et al., 2016; Tsivilis et al., 1998). While the decomposition temperature range of the materials is observed in Figure 4, which is used to determine the percentage weight variation for each of these minerals.

Thus, between 100-190 °C, the greatest variation associated with the C-S-H group occurred in the RM-Ti2 and NM series with 5.4% and 3.19%, respectively. Regarding the mass variation associated with portlandite (450-500 °C), the NM series had a variation of 1.86%. With respect to the coating process, the RM-Ti2 series had a variation of 1.0%. Finally, the mass variation between 650-790 °C associated with calcite was lower for the NM series with a variation of 2.38%, followed by the RM-Ti2 series (7.57%)

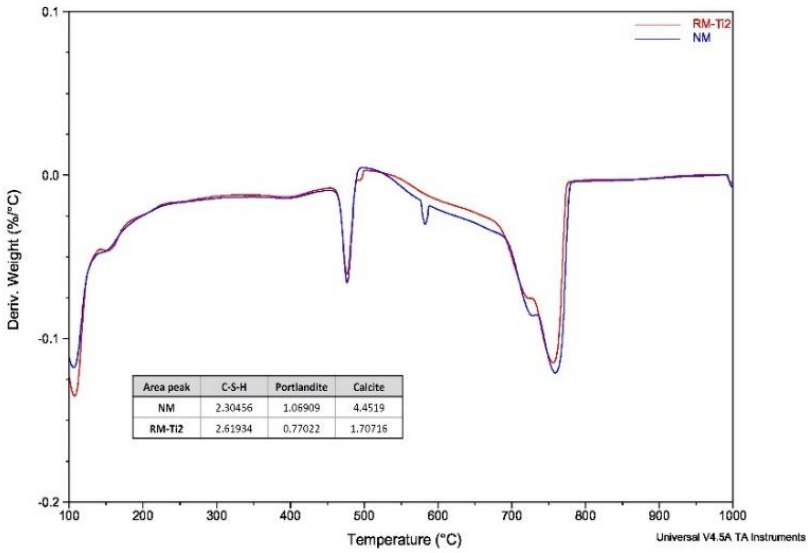


Figure 3 – DTG curve of mortar samples at 28 days.

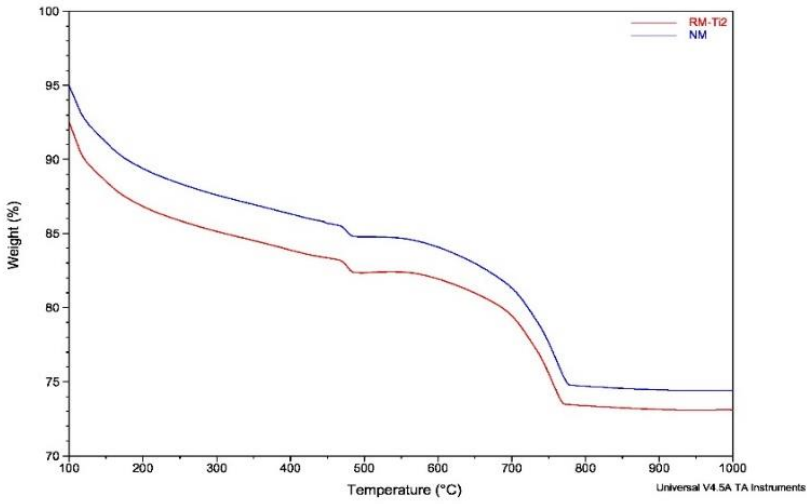


Figure 4 – TGA curve of mortar samples at 28 days.

3.3.3 SEM-EDS

The microstructural analyses of the mortars were performed by SEM-EDS after 28 days of curing and are presented below. The natural aggregate series shows a higher amount of cementitious hydration elements, specifically dispersed portlandite crystals (Figure 5a-b) (B. Wang et al., 2021). In contrast, the series with fine recycled aggregates show a more porous and disordered matrix, which is related to the higher absorption described in Section 3.1.1. On the other hand, with respect to the series with TiO_2 ENPs treatment presented in Figure 5f, at a higher magnification, we can appreciate much denser matrices compared to the control series, which is related to the improvement of this coating in the fine recycled aggregates.

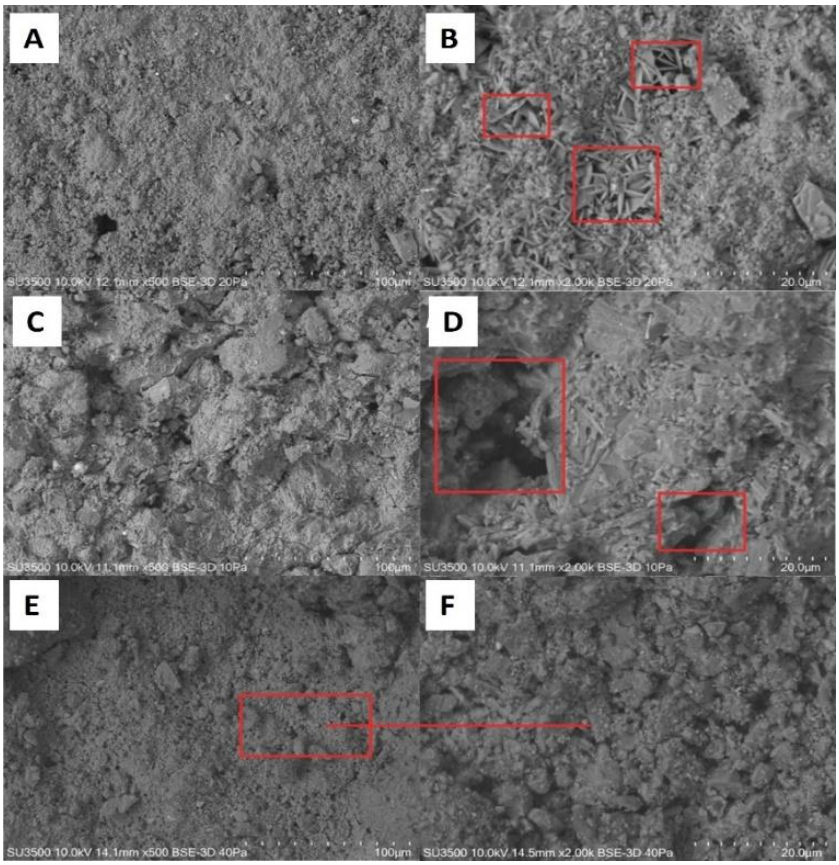


Figure 5 – SEM images of mortar specimens at 28 days. (a) NM low magnification, (b) NM high magnification, (c) RM low magnification, (d) RM high magnification, (e) RM-Ti2 low magnification, (f) RM-Ti2 high magnification.

3.3.4 Economical analysis

It is important to analyze the economic impact of the use of TiO_2-ENPs , in this regard it is worth mentioning that this ENPs has been integrated in the construction industry due to its wide availability, chemical stability and low cost (Haider et al., 2017; Liao et al., 2023). Moreover, as stated by Raghavendra Prasad et al. (2024), the use of small amounts of TiO_2-ENPS opens the possibility in the production of mortar to have improved mechanical properties with a lower mass of cement, the latter being the most expensive and polluting component of concrete. Since this study was conducted using small percentages of ENPs to produce samples with 100% FRA, it would be natural to obtain even better results with a lower mass of FRA. Therefore, this suggess that if a lower mass of FRA were used, then the cement could be reduced to the point of finding an optimal cost-benefit ratio to offset the price of using ENPs. Nevertheless, according to Reches (2018), ENPs are generally in the order of a thousand times more expensive than cement, which means that 0.1% of ENPs should be used to achieve a cost/competitiveness relationship with cement. All of this means that more research needs to be done at an industrial level, in order to optimize costs and make the use of ENPs more widespread.

4 CONCLUSIONS

This study evaluated the behavior of mortars with recycled aggregates treated with TiO_2 ENPs aimed at improving the physical and mechanical properties of mortars made from CDW. Based on the results obtained, the main conclusions of this research are presented below:

- The coating of FRA with TiO_2-ENPs reduced the porosity and water absorption of the mortars, resulting in a more uniform and denser surface due to the filler and nucleation effect of the ENPs.
- The mechanical properties of the treated mortars were favorable, with compressive and flexural strengths equal to or greater than those of the RM series.
- Based on the XRD and TGA chemical results, the presence of primary hydration products (i.e., C-S-H gel, portlandite and calcite) was verified.
- Although this technique may be more expensive initially due to the elevated cost of ENPs, it could be a promising alternative in the future when more fine recycled aggregates may be required.

From the results obtained, and considering a total replacement of NA by FRA, the physical properties of the mortars benefited from ENPs with results lower than those of the control series. This favorable behavior shows that it is feasible to use fine recycled aggregates in cement-based materials, which is beneficial in areas where fine natural aggregates are scarce. Nevertheless, it is still necessary to deepen these results, as it would allow to effectively use the FRA that is generally discarded, thus reducing the consumption of natural resources.

REFERENCES

Akono, A. T., Zhan, M., Chen, J., & Shah, S. P. (2021). Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, *115*, 103827. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103827

Arefi, M. R., & Rezaei-Zarchi, S. (2012). Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Effect on the Compressive Strength and Setting Time of Self-Compacted Concrete Paste as Cementitious Composites. *International Journal of Molecular Sciences*, *13*(4), 4340–4350. https://doi.org/10.3390/ijms13044340

Arivumangai, A., Narayanan, R. M., & Felixkala, T. (2021). Study on sulfate resistance behaviour of granite sand as fine aggregate in concrete through material testing and XRD analysis. *Materials Today: Proceedings*, *43*, 1724–1729. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.10.354

ASTM C595/C595M-21. (2021). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.

ASTM C642-21. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.

ASTM C1585-20. (2020). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes. In *ASTM International* (Vol. 41, Issue 147).

Chen, J., Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Hydration and properties of nano-TiO 2 blended cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *34*(5), 642–649. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.009

Colman, C., Bulteel, D., Thiery, V., Rémond, S., Michel, F., & Courard, L. (2021). Internal sulfate attack in mortars containing contaminated fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *272*, 121851. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121851

de Oliveira Andrade, J. J., Wenzel, M. C., da Rocha, G. H., & da Silva, S. R. (2018). Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, *192*, 159–168. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.246

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, *37*(5), 735–742. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.02.002

Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, *86*, 178–188. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112

Fernandes, C. N., Ferreira, R. L. S., Bernardo, R. D. S., Avelino, F., & Bertini, A. A. (2020). Using TiO2 nanoparticles as a SO2 catalyst in cement mortars. *Construction and Building Materials*, *257*, 119542. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119542

Francioso, V., Moro, C., Martinez-Lage, I., & Velay-Lizancos, M. (2019). Curing temperature: A key factor that changes the effect of TiO2 nanoparticles on mechanical properties, calcium hydroxide formation and pore structure of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, *104*. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103374

Haider, A. J., AL– Anbari, R. H., Kadhim, G. R., & Salame, C. T. (2017). Exploring potential Environmental applications of TiO2 Nanoparticles. *Energy Procedia*, *119*, 332–345. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.117

Hwang, Y., Lee, J. K., Lee, J. K., Jeong, Y. M., Cheong, S. ir, Ahn, Y. C., & Kim, S. H. (2008). Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder Technology*, *186*(2), 145–153. https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2007.11.020

ISO 22007-2:2008(E). (2008). *Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method*.

Kaddah, F., Ranaivomanana, H., Amiri, O., & Rozière, E. (2022). Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales. *Journal of CO2 Utilization*, *57*, 101885. https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2022.101885

Lee, B. Y., & Kurtis, K. E. (2010). Influence of TiO2 nanoparticles on early C3S hydration. *Journal of the American Ceramic Society*, *93*(10), 3399–3405. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03868.x

Letelier, V., Bustamante, M., Muñoz, P., Rivas, S., & Ortega, J. M. (2021). Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, *43*, 103226. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103226

Li, W., Long, C., Tam, V. W. Y., Poon, C. S., & Hui Duan, W. (2017). Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *142*, 42–50. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.051

Liao, G., Yao, W., She, A., Shi, C., Zuo, J., & Wu, D. (2023). Interfacial design of nano-TiO2 modified recycled concrete powder for building self-cleaning. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *661*(December 2022), 130925. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130925

Liu, J., Li, Q., & Xu, S. (2015). Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, *101*, 892–901. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.149

Ma, B., Li, H., Mei, J., Li, X., & Chen, F. (2015). Effects of Nano-TiO_2 on the Toughness and Durability of Cement-Based Material. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2015*, 583106. https://doi.org/10.1155/2015/583106

Martínez-García, R., Sánchez de Rojas, M. I., Jagadesh, P., López-Gayarre, F., Morán-del-Pozo, J. M., & Juan-Valdes, A. (2022). Effect of pores on the mechanical and durability properties on high strength recycled fine aggregate mortar. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e01050. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01050

Meng, T., Yu, Y., Qian, X., Zhan, S., & Qian, K. (2012). Effect of nano-TiO 2 on the mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, *29*, 241–245. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.047

Moro, C., El Fil, H., Francioso, V., & Velay-Lizancos, M. (2021). Influence of water-to-binder ratio on the optimum percentage of nano-TiO2 addition in terms of compressive strength of mortars: A laboratory and virtual experimental study based on ANN model. *Construction and Building Materials*, *267*, 120960. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120960

Moro, C., Francioso, V., Schrager, M., & Velay-Lizancos, M. (2020). TiO2 nanoparticles influence on the environmental performance of natural and recycled mortars: A life cycle assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, *84*, 106430. https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2020.106430

Moro, C., Francioso, V., & Velay-Lizancos, M. (2020). Nano-TiO2 effects on high temperature resistance of recycled mortars. *Journal of Cleaner Production*, *263*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121581

Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Fatemeh Shamekhi, S., & Khademno, A. (2010). Mechanical properties of cement mortar with Al2O3 nanoparticles Enhancing the adhesion of diamond-like carbon films to steel substrates using silicon-containing interlayers View project Mechanical properties of cement mortar with Al 2 O 3 nanoparticles. *Journal of American Science*, *6*(4). http://www.americanscience.orgeditor@americanscience.org

NCh158.Of67. (1967). *Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento*.

NCh2257/1.Of96. (1996). *Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas*.

NCh3562:2019. (2019). *Gestión de residuos - Residuos de construcción y demolición (RCD) - Clasificación y directrices para el plan de gestión*.

Ossio, F., Molina-Ramírez, J., Larrain, H., & Schmitt, C. (2020). *CAPÍTULO IX Políticas municipales estandarizadas para el manejo sustentable de residuos de construcción y demolición* (pp. 289–317).

Pane, I., & Hansen, W. (2005a). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, *35*(6), 1155–1164. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.10.027

Pane, I., & Hansen, W. (2005b). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, *35*(6), 1155–1164. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.027

Raghavendra Prasad, H. D., Jha, A., Mahaseth, A., & Jha, S. (2024). Advancements in sustainable cement mortar development: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, *February*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.124

Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction and Building Materials*, *175*, 483–495. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214

Ridi, F., Fratini, E., & Baglioni, P. (2011). Cement: A two thousand year old nano-colloid. *Journal of Colloid and Interface Science*, *357*(2), 255–264. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.02.026

Saiz Martínez, P., González Cortina, M., Fernández Martínez, F., & Rodríguez Sánchez, A. (2016). Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of Cleaner Production*, *118*, 162–169. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.059

Santha Kumar, G. (2019). Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of recycled aggregate mortar. *Construction and Building Materials*, *213*, 404–412. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.093

Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Taylor & Francis. https://books.google.cl/books?id=X2t6rgEACAAJ

Sun, J., Tian, L., Yu, Z., Zhang, Y., Li, C., Hou, G., & Shen, X. (2020). Studies on the size effects of nano-TiO2 on Portland cement hydration with different water to solid ratios. *Construction and Building Materials*, *259*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120390

Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, *172*, 272–292. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.240

Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2007). Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, *21*(4), 879–886. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.12.016

Tobón, J. I., Payá, J., & Restrepo, O. J. (2015). Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. *Construction and Building Materials*, *80*, 92–97. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.074

Tsivilis, S., Kakali, G., Chaniotakis, E., & Souvaridou, A. (1998). A study on the hydration of Portland limestone cement by means of TG. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *52*(3), 863–870. https://doi.org/10.1023/A:1010139312958

Véliz, K. D., Ramírez-Rodríguez, G., & Ossio, F. (2022). Willingness to pay for construction and demolition waste from buildings in Chile. *Waste Management*, *137*, 222–230. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.11.008

Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 171). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565

Wang, L., Wang, J., Qian, X., Fang, Y., Chen, P., & Tuinukuafe, A. (2020). Tea stain-inspired treatment for fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *262*, 120027. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120027

Wijayasundara, M., Mendis, P., & Crawford, R. H. (2018). Net incremental indirect external benefit of manufacturing recycled aggregate concrete. *Waste Management*, *78*, 279–291. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.02.042

Xu, Z., Gao, J., Zhou, Z., Zhao, Y., & Chen, X. (2020). Hydration and microstructure of tricalcium silicate incorporating nano-TiO2. *Construction and Building Materials*, *262*, 120805. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120805

Yang, H., Monasterio, M., Zheng, D., Cui, H., Tang, W., Bao, X., & Chen, X. (2021). Effects of nano silica on the properties of cement-based materials: A comprehensive review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 282). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122715

Ye, T., Xiao, J., Zhao, W., Duan, Z., & Xu, Y. (2022). Combined use of recycled concrete aggregate and glass cullet in mortar: Strength, alkali expansion and chemical compositions. *Journal of Building Engineering*, *55*, 104721. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104721

Zaidi, A. K. A. Al, Demirel, B., & Atis, C. D. (2019). Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica. *Construction and Building Materials*, *199*, 501–507. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.052

Zhang, R., Cheng, X., Hou, P., & Ye, Z. (2015). Influences of nano-TiO2 on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage. *Construction and Building Materials*, *81*, 35–41. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.003

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

POTENCIAL CONTRIBUIÇÃO DE FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS (BIPV) NA REABILITAÇÃO DE EDIFICAÇÕES PARA HABITAÇÃO SOCIAL

Fernanda Batista[a], Ana Sofia Guimarães[b], Ana Isabel Palmero-Marrero[c]

[a] Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal (up201902827@edu.fe.up.pt) ORCID 0000-0001-6015-5248

[b] CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal (anasofia@fe.up.pt) ORCID 0000-0002-8467-6264

[c] Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering (INEGI), Universidade do Porto -FEUP, Rua Dr Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal (apalmero@fe.up.pt) ORCID 0000-0002-2960-1649

RESUMO

Ter acesso a uma habitação digna tornou-se um desafio para as populações de baixa renda que vivem em cidades orientadas pela dinâmica da economia de mercado. Por consequência, são induzidas a habitar áreas precárias de regiões metropolitanas, comumente carentes de infraestruturas básicas, tendo maiores riscos de sofrer danos causados por eventos extremos oriundos das alterações climáticas. Associado a este fato, a pobreza energética é um agravante que mantém essas populações num ciclo de pobreza. Desta forma será necessário prover além da habitação adequada, instrumentos capazes de interromper o ciclo de pobreza que viabilizem uma melhor condição de vida. Através da proposta de inclusão de fotovoltaicos integrados – *building integrated photovoltaics* (BIPV) - na reabilitação de edificações para habitação social em regiões centrais das cidades procura-se criar um ecossistema de benefícios que favoreça a sustentabilidade do território e a população residente. Com base na análise do cenário atual da crise e do déficit habitacional em dois países distintos, Brasil e Portugal, objetiva-se destacar a necessidade de melhorar a qualidade das unidades habitacionais disponibilizadas por programas de habitação social através da inclusão de BIPV, visando a descarbonização do consumo de energia elétrica nos edifícios, e incluindo a população de baixa renda na transição energética das cidades.

Palavras-chave: Habitação social, reabilitação, BIPV, pobreza energética.

1 INTRODUÇÃO

O acesso à habitação é um direito constitucional garantido pela Declaração Universal dos Direitos Humanos no artigo 25 – todas as pessoas têm direito a um nível de vida digno, incluindo alimentação, vestuário, habitação, cuidados médicos e serviços sociais (Amnistia Internacional, 2023). Contudo, a realidade do cenário global é a prevalência deste direito como um bem de consumo, acessível apenas a aqueles com capacidade financeira para aquisição de uma habitação digna, com padrão construtivo adequado e localização segura.

Numa sociedade global predominantemente orientada pelas dinâmicas da economia de mercado, habitar e ter posse de uma habitação com condições mínimas de conforto tornou-se um desafio para as populações cujos rendimentos são próximos do salário mínimo, aumentando a vulnerabilidade das pessoas nesta faixa de renda diante das crises e déficits do setor habitacional. Por consequência, estes grupos são forçados a habitar regiões precárias de áreas metropolitanas, comumente carentes de infraestruturas básicas, como serviços de abastecimento de água, tratamento de esgoto e acesso a

rede de eletricidade. Associado a este fato, a pobreza energética é um elemento determinante que mantém essa população num ciclo de pobreza, onde o baixo poder de consumo é responsável pela manutenção de um padrão de vida precarizado.

Além disso, pessoas nessa situação de vulnerabilidade são as que mais correm riscos de sofrer as consequências de eventos advindos das alterações climáticas, como enchentes, deslizamentos, ondas de calor, tempestades, furacões, entre outros. Por tal motivo, a possibilidade de ter uma habitação com padrão construtivo adequado a condição climática local e localizada fora de uma área de risco, é um fator preponderante para aumentar a qualidade de vida destes indivíduos, tirando-os de uma situação de perigo e evitando perdas diante dos cenários catastróficos gerados por eventos climáticos extremos. A figura 1 demonstra a vulnerabilidade das populações de baixa renda diante de eventos extremos.

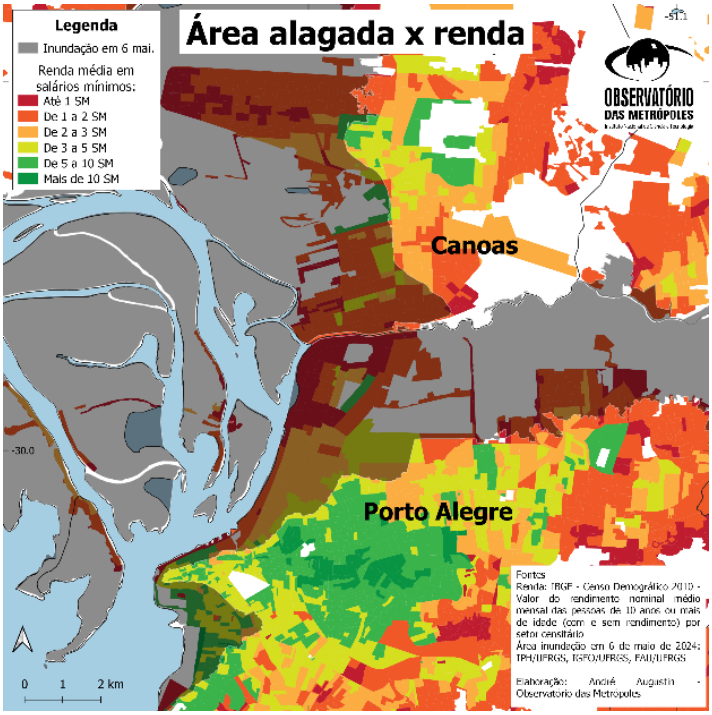


Figura 1 - Mapa demonstrando as áreas alagadas pela enchente na região metropolitana de Porto Alegre e a renda das comunidades afetadas em maio de 2024 (Metrópoles, 2024).

No Brasil e em Portugal o direito a uma habitação digna é assegurado pelas constituições nacionais - Constituição Federal de 1988 (art. 6°) e Constituição Portuguesa de 1976 (art.º 65) respetivamente -, contudo com suas próprias particularidades, ambos os países enfrentam desafios para oferecer habitações adequadas e com valor de venda ou renda acessíveis aos segmentos de baixa renda da sociedade.

Atualmente Portugal atravessa uma severa crise no setor habitacional, caracterizada como um problema estrutural que tem dentre suas diversas origens, a escassez de investimentos públicos em habitação e reabilitação urbana, associado a uma série de políticas e incentivos que priorizaram a atividade turística e beneficiaram investidores com maior poder de compra, em comparação ao cidadão nacional que tem seus rendimentos baseados no salário mínimo. Além disso, o mercado de arrendamento não regulamentado e o uso do patrimônio imobiliário como ativo financeiro criou um cenário de extrema insegurança para os inquilinos. Iniciativas governamentais como o Programa de Recuperação e Resiliência (PRR) e o Mais Habitação não tem sido suficientes para prover uma

resposta a curto prazo de forma a beneficiar a população de baixa renda mais afetada com a crise (Mendes, 2021) (Mendes, 2024) (Aitor Varea Oro, 2024).

No Brasil, o déficit habitacional é um problema histórico, atualmente estimado em 6,2 milhões de unidades habitacionais (Fundação João Pinheiro, 2024), foi agravado pela descontinuação de importantes programas de habitação social e pela crise econômica sanitária decorrente da pandemia da COVID-19. As primeiras iniciativas governamentais de habitação social no Brasil tiveram início na década de 1960, motivadas pela crescente preocupação com a expansão das favelas nas cidades, sendo os primeiros programas de habitação social sinônimos de padronização, baixa qualidade construtiva e localização periférica (Nascimento & Braga, 2009). Até os dias atuais essa é a realidade de grande parte dos conjuntos de habitação social espalhados ao longo do território nacional, o que significa que a população de baixa renda continua a viver em áreas periféricas, sendo diretamente afetadas pelas consequências de viver longe do centro da cidade. Em 2023, o programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), o mais relevante programa habitacional das últimas décadas, foi retomado e com ele surgiram novas expectativas para diminuição do déficit habitacional e soluções para os problemas já característicos das habitações ofertadas com as novas modalidades do programa (Ministério das Cidades, 2023) (Revista Projeto, 2023). A figura 2 exemplifica a padronização praticada nas construções de habitação social.

Figura 2 - Conjunto habitacional do programa MCMV, Residencial JK, Imperatriz – Maranhão – Brasil (Araújo, 2018).

Além de garantir a habitação é fundamental viabilizar o acesso a outros elementos que irão garantir uma condição de vida digna, como o acesso a infraestrutura urbana de lazer, transporte, educação, e a viabilidade econômica para manutenção da habitação com o fornecimento de itens essenciais para habitabilidade como água potável, eletricidade, gás, dentre outros relacionados as especificidades da localização e do perfil dos habitantes.

Neste contexto, destaca-se a necessidade de combater a pobreza energética através de ações que possibilitem um consumo energético eficiente considerando as condições climáticas locais e a imprevisibilidade dos eventos resultantes das mudanças climáticas. Desta forma, a inclusão da energia fotovoltaica integrada no sistema construtivo da habitação social é uma forma de garantir a redução de despesas com a energia elétrica, e de permitir a utilização de equipamentos que aumentarão o conforto térmico da casa.

O objetivo deste estudo é destacar a necessidade de melhorar a qualidade construtiva das unidades habitacionais ofertadas em programas de habitação social através da inclusão de energias renováveis – *building integrated photovoltaics* (BIPV) -, de forma estratégica para descarbonização do consumo

de energia elétrica nos edifícios, simultaneamente incluindo a população de baixa renda na transição energética das cidades. Com a proposta para aumentar a qualidade dos programas de habitação social através da localização, será demonstrado que é possível consolidar a aplicabilidade do BIPV como uma solução de energia renovável para o patrimônio edificado acessível aos segmentos de baixa renda, viabilizado por iniciativas governamentais, caracterizando a sua implementação como uma resposta a questões sociais, econômicas e ambientais originárias ou intensificados pelas alterações climáticas. A investigação do ecossistema de benefícios gerado pela implementação do BIPV é feita com base na análise do cenário atual da crise e do déficit habitacional no Brasil e em Portugal, entrevistas com agentes de organizações públicas de habitação e do estudo sistemático de estratégias e programas de habitação social adotados no passado.

2 REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA HABITAÇÃO SOCIAL EM ÁREAS CENTRAIS

Os países objetos desse estudo, Brasil e Portugal, tem como realidade o problema estrutural do déficit habitacional com um fator similar, o grande número de edificações vazias sem utilização. Em cada país o problema das edificações vazias tem as suas causas específicas, porém tem como característica comum a ausência de políticas efetivas capazes de regulamentar e prevenir a desocupação dos edifícios, principalmente em áreas urbanas consolidadas como os centros das cidades. Estima-se que o número de edifícios residenciais devolutos no Brasil seja de 11,4 milhões, e cerca de 730 mil em Portugal (IBGE, 2022) (FEANTSA, 2020) . Através de políticas urbanas eficazes, essas edificações podem ser utilizadas para redução do déficit habitacional e promover a revitalização de áreas urbanas em processo de desvalorização, originando um ecossistema de benefícios para os habitantes e a região de implementação.

O estabelecimento de residentes fixos numa determinada região gera fluxos de circulação de pessoas e com estes a emergência de atividades económicas para atender as novas demandas da população residente. Desta forma, a atividade residencial quando aliada a um plano estratégico de revitalização, constitui um elemento fundamental para prevenção e recuperação de regiões centrais em processo de abandono, também incentivando a utilização territorial mista e o aproveitamento das infraestruturas pré-existentes.

A implementação de programas de habitação social nos centros das cidades pode ser vista como uma estratégia de mitigação de problemas relacionados aos processos de abandono e desvalorização de regiões centrais por diversas causas relacionados ao desenvolvimento urbano. No Brasil é possível destacar como alguns dos motivos do processo de abandono de áreas localizadas no centro das capitais, a expansão urbana em novos eixos de desenvolvimento, a segurança pública insatisfatória, a ausência de equipamentos e adequação do património edificado às novas necessidades da população.

Em Portugal o processo de abandono de áreas centrais do Porto e Lisboa ocorreu principalmente pelo elevado estado de degradação das edificações, os altos preços de venda, e a ausência ou insuficiência de estacionamentos (Mendes, 2024). Através de políticas para proporcionar a revalorização das áreas centrais principalmente com foco na atividade turística, muitas dessas áreas passaram pelo processo de gentrificação, tornando a habitação ainda mais inacessível à população local de baixa renda. Desta forma as políticas para habitação social nas regiões centrais também podem ser utilizadas como importante instrumento de combate a gentrificação, através da utilização mais justa do património edificado, não o restringindo a uma utilização para alojamentos turísticos, mas também servindo de habitação para a população local.

A localização corresponde a um dos principais benefícios para a população contemplada com os programas de habitação social em regiões centrais. Em comparação com áreas periféricas a

proximidade da infraestrutura urbana de lazer, transportes, atividades comerciais e serviços pode ser traduzida em maiores oportunidades de empregabilidade, e redução do tempo de deslocação no cotidiano, proporcionando um aumento da qualidade de vida. A figura 3 mostra o Bairro da Bouça, habitação social construída na década de 1970 na região central do Porto.

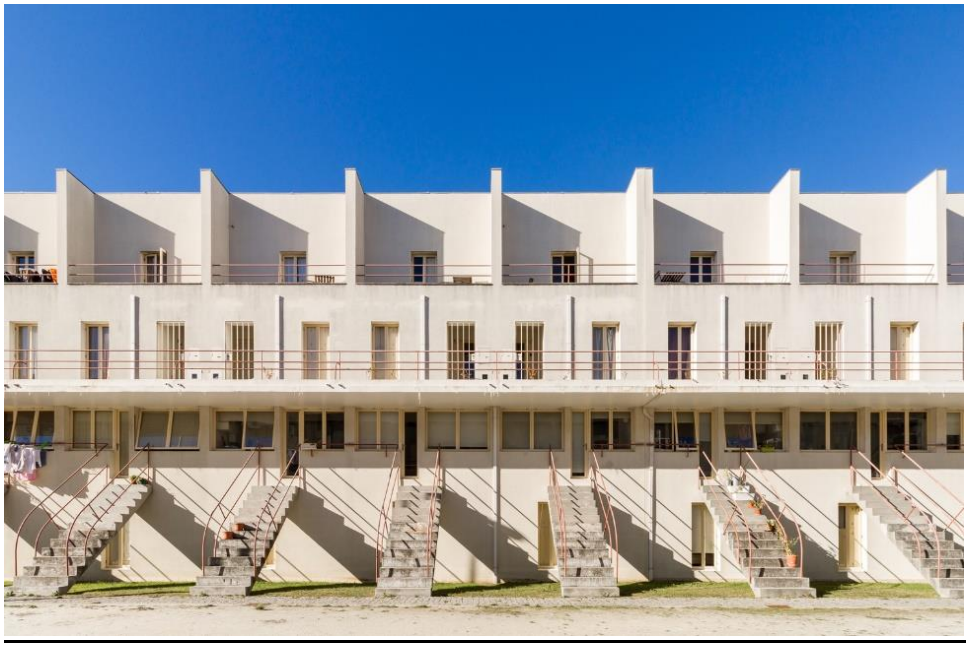


Figura 3 - Habitação social Bairro da Bouça localizado na Lapa, região central do Porto – Portugal (Fontenelle, 2018).

Para além da qualidade construtiva, e de uma localização segura e apropriada, é importante garantir segurança e estabilidade para as pessoas através da habitação. A possibilidade de ser proprietário da unidade habitacional, ou de estar livre de flutuações de preço no valor da uma renda através de políticas de estabilização de valores, evitando a possibilidade de despejos ou a necessidade de mudanças inesperadas, são fatores que asseguram a permanência saudável dos moradores na região, uma segurança que elimina as preocupações do indivíduo de baixa renda que tem grande influência na qualidade de vida. Desta forma é primordial que o programa de habitação social adote um modelo de governança que viabilize a permanência do morador através do pertencimento legal do imóvel, ou da prática da renda social.

De acordo com João Mendes, geógrafo do movimento Habitar Lisboa, em Portugal o medo do despejo e do aumento da renda é uma realidade extrema, na qual os inquilinos predominantemente não apresentam interesse em reformas de obras profundas, ou qualquer tipo de intervenção para melhoria do desempenho energético e conforto térmico da unidade habitacional (Mendes, 2024)**.** No Brasil o programa Minha Casa Minha Vida viabiliza a propriedade do imóvel de acordo com a faixa etária de renda no qual o indivíduo comtemplado está inserido. Com a criação da nova modalidade reabilitação, a propriedade do imóvel originalmente pública, pode ser viabilizada aos moradores ou administrada através de entidades oficiais designadas pela administração pública, como movimentos sociais que atuam nas frentes por habitação para setores de baixa renda. A figura 4 mostra o Edifício Dandara localizado no centro da Cidade de São Paulo, um dos primeiros exemplares da modalidade reabilitação do Programa Minha Casa Minha Vida.

Figura 4 - Edifício Dandara antes e depois da requalificação para habitação social, localizado no centro da cidade de São Paulo – Brasil (EBC, 2024)**.**

Desta forma a requalificação de edificações para a atividade habitacional em regiões centrais das cidades configura uma intervenção benéfica capaz de transformar a realidade de importantes regiões em processo de desvalorização e abandono, utilizando os territórios consolidados da cidade, favorecendo o desenvolvimento económico e social através da habitação.

3 A HABITAÇÃO SOCIAL E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A habitação social é uma oportunidade de incluir a população de baixa renda na transição energética das cidades através do investimento público no setor residencial. Neste contexto destaca-se a possibilidade de inclusão de energias renováveis na construção ou reabilitação de casas e edifícios para essa finalidade. Dentre as tecnologias consolidadas e disponíveis, na atualidade, a energia solar fotovoltaica é a mais adequada para ser implementada em construções residenciais devido às características operacionais, com ausência de partes móveis, e a capacidade de integração no sistema construtivo e na rede elétrica local.

Building Integrated Photovoltaics (BIPV) correspondem a sistemas construtivos pré-fabricados que integram células fotovoltaicas na envolvente das edificações para gerar eletricidade e também desempenhar outras funções construtivas. As células são integradas de forma modular a sistemas de esquadria, revestimentos de paredes externas, parapeitos, telhas, chapas para coberturas, claraboias, cortinas de vidro, dentre outros elementos construtivos. Assim, podem fazer parte de variadas partes da envolvente da edificação e simultaneamente gerar eletricidade para ser consumida pela unidade habitacional em tempo real, suprir e gerar créditos com a rede elétrica local, ou para o armazenamento em baterias para consumo posterior. A possibilidade de instalação em qualquer parte da envolvente que esteja exposta à incidência solar é um dos mais relevantes benefícios do BIPV, e como são instalados de forma integrada ao sistema construtivo da edificação não há a necessidade de utilização de estruturas adicionais para instalação. Desta forma o BIPV representa uma opção flexível capaz de aproveitar de forma otimizada o potencial de geração energética por meio da incidência solar na edificação (Kuhn, Christof Erban, Eisenlohr, Ensslen, & Neuhaus, 2021) (Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016).

Atualmente há uma grande variedade de produtos caracterizados como BIPV constituídos de diferentes tipos de células fotovoltaicas, desde sistemas mais simples como filmes flexíveis para integração a estruturas pré-existentes, vidros com diferentes graus de transparência para aplicação em envidraçados e fachadas, até sistemas desenvolvidos de forma personalizada para constituição de grandes áreas como fachadas e telhados. De acordo com o tipo de célula diferentes tipos de acabamento podem ser obtidos – opacos, transparentes, metálicos, acetinados, espelhados, com células visíveis ou camufladas na superfície do material. Desta forma a utilização do BIPV não está condicionada a uma tradicional aparência azul escura dos convencionais painéis fotovoltaicos feitos de silício cristalino para fixação nos telhados, mesmo sendo a célula solar deste material a predominante no mercado de fotovoltaicos integrados e não-integrados. A figura 5 mostra uma cobertura translúcida executado com diferentes cores de fotovoltaicos integrados.

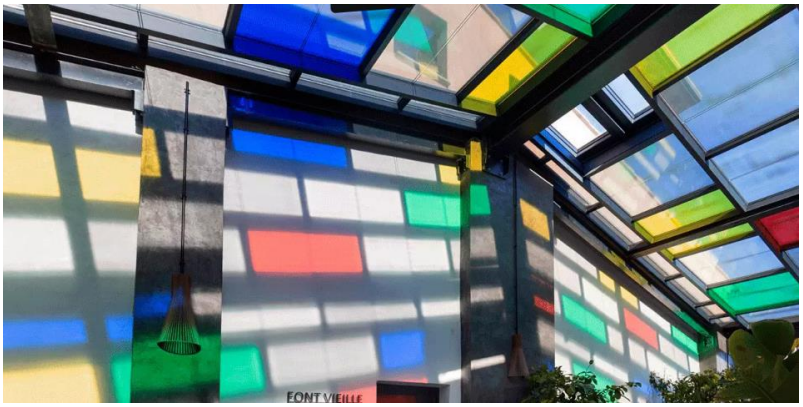


Figura 5 - BIPV translúcido em diferentes cores para composição de cobertura (Onyx Solar Group LLC, 2024).

A necessidade de inclusão do BIPV em projetos de habitação social é capaz de gerar um ecossistema de benefícios o colocando como um elemento cooperante central para a transição energética e sustentabilidade das cidades. Por ser um elemento pré-fabricado, promove uma construção mais rápida, com maior qualidade construtiva e capacidade de geração de empregos qualificados – uma vez que corresponde a um componente construtivo que demanda capacitação técnica para instalação integrada. Ao utilizar o património edificado como central de geração de energia para consumo local, o território urbano tem o seu potencial de utilização maximizado. Além disso representaria um aumento no número de edificações de baixo consumo energético, servindo de exemplo para realização de outros projetos com essa intenção ao nível do projeto. O elevado custo inicial do BIPV é um fator que vem sendo solucionado pela indústria através de técnicas de fabricação e emprego de matérias-primas de baixo custo. Para um projeto de habitação social, a grande diversidade e flexibilidade dos materiais já desenvolvidos, torna a implementação do BIPV uma opção viável ao ser realizada de acordo com estratégias de projeto que priorizem a eficiência e a integração do sistema, também visando a redução de custos.

A implementação do BIPV representa a inclusão de um sistema capaz de aumentar a resiliência do fornecimento de eletricidade perante a possíveis interrupções de fornecimento da rede local e subsequentes consequências, assim como colocação em locais afastados da rede elétrica. Quando acoplado a baterias e conectado a outros sistemas similares, de unidades habitacionais ou edifícios, forma um *microgrid* que é capaz de operar de forma isolada (*islanding*), desconectada da rede local, o que maximiza a resiliência do sistema principalmente em situações de eventos climáticos extremos. A figura 6 mostra um edifício de habitação social com a fachada composta por fotovoltaicos integrados.

Figura 6 - Edifício de habitação social com fachada em BIPV localizado na cidade de Best, Holanda (IEA PVPS, 2021).

Para a população comtemplada, o maior benefício é a redução dos gastos com o consumo energético de eletricidade, e a redução da dependência dos preços voláteis praticados pelas empresas responsáveis pela distribuição e venda de eletricidade, podendo viabilizar a utilização de equipamentos que melhorem o conforto térmico e bem-estar dos usuários como aparelhos de ar-condicionado e aquecimento. Desta forma a inclusão do BIPV também pode ser compreendida como um importante elemento de combate à pobreza energética.

Especificamente no caso Português, a busca por habitação a um preço acessível é tão intensa e angustiante que faz com que as pessoas não considerem o conforto térmico uma prioridade, é possível afirmar que a população já passou pelos três estágios comportamentais perante o problema – normalização sociocultural, subsistência e desconexão do sistema -, utilizando de mecanismos adaptativos para lidar com as baixas temperaturas em habitações com o padrão construtivo deficitário, incapaz de manter a unidade habitacional aquecida no inverno e arejada no verão (Stojilovska, et al., 2023) (Horta, et al., 2019)**.** Assim a utilização de lenha, cobertores, roupas de inverno, ingestão de bebidas quentes, e abertura de janelas para ventilação noturna, configuram estratégias adaptativas convencionalmente aceites pela sociedade devido à ausência de construções com o devido isolamento térmico, aquecimento central, ventilação cruzada, dentre outras estratégias a nível do sistema arquitetónico construtivo que tornam a edificação responsiva a variações bioclimáticas (Horta, et al., 2019) (Delgado, Matos, & Guimarães, 2022)**.**

Mesmo sendo um país mediterrâneo com um inverno menos severo em comparação aos países da Europa Central e do Norte, Portugal apresenta uma média aproximada de 1166 graus-dias de aquecimento, correspondentes a um índice no qual a temperatura é inferior a temperatura base de 18 graus Celsius, e o aquecimento se faz necessário para obtenção do conforto térmico no interior das edificações. Com uma predominância de valores maiores desse índice no extremo Norte (1561 dias), e menor no extremo sul (597 dias) (Delgado, Matos, & Guimarães, 2022). Desta forma, mesmo diante de uma considerável variação entre norte e sul, a situação de pobreza energética em relação a baixa temperatura não pode ser ignorada, assim como as estratégias ativas para garantir o conforto térmico, não podem ser tratadas como um bem de consumo restrito a classes que possuem maiores rendimentos.

De acordo com o estudo conduzido por Fowler et al. (2015), dentre 31 países europeus analisados durante os anos de 2005 a 2014, nos meses de dezembro a março, Portugal ocupa a segunda posição dentre os países com maior número de mortes no inverno, com a média de 25.9%, definido pelo índice de mortes excessivas no inverno. Dentre as várias causas da mortalidade sazonal pode-se destacar fatores relacionados a pobreza energética como as habitações frias, a baixa renda, e a escassez de combustíveis para garantir um aquecimento apropriado (Fowler, et al., 2015). Desta forma a possibilidade de utilizar equipamentos de climatização e ter uma habitação adequada ao clima nas diferentes estações do ano representa um grande avanço para melhoria da qualidade de vida das populações mais vulneráveis que sofrem principalmente com as baixas temperaturas durante os meses de inverno, podendo impactar na redução da mortalidade.

Na realidade brasileira, devido à dimensão continental e a diferentes zonas bioclimáticas, as demandas por estratégias passivas e ativas de aquecimento ou refrigeração são determinadas pelas características do clima predominante e a severidade das temperaturas nos meses de verão e inverno. Predominantemente as construções brasileiras de habitação popular não possuem isolamento térmico e fornecimento de água quente, a estratégia ativa convencional para o aquecimento da água, quando financeiramente viável, é realizada através de chuveiros elétricos - equipamentos com baixa eficiência diretamente ligados a rede elétrica para o fornecimento de água quente. Assim torna-se necessário adotar estratégias ativas para garantia do conforto térmico diante do cenário de altas e baixas temperaturas. Principalmente em eventos de ondas de calor e massas de ar frio, que afetam as populações mais vulneráveis devido a precariedade das condições habitacionais em que vivem, ocasionando mortes por hipotermia ou pela utilização de estratégias de aquecimento indevidas, como a tentativa de aquecer ambientes através da queima do carvão.

Principalmente diante do cenário de altas temperaturas, predominantes no clima tropical e tropical húmido, é cada vez mais importante a utilização de equipamentos para garantir o conforto térmico nas edificações, pelo que a implementação do BIPV na habitação social proporciona a viabilidade de utilização destes equipamentos com menor impacto financeiro à população de baixa renda.

Infelizmente, quer no Brasil quer em Portugal, não há expectativas dos segmentos populacionais de baixa renda relacionados a uma possibilidade de redução da pobreza energética através da habitação social. A prioridade é a obtenção da habitação mesmo que em condições construtivas inadequadas ao cenário climático atual. Segundo Ivamberto da Conceição, arquiteto da entidade nacional União por Moradia Popular no estado do Maranhão, há uma grande necessidade de acompanhamento de execução e testagem da inclusão de fonte de energias renováveis fotovoltaicas na habitação social, acreditando que a inclusão seria recebida com entusiasmo pela população assim como o impacto positivo na qualidade de vida relacionado a diminuição de gastos financeiros (Pereira, 2023).

Com a inclusão do BIPV na reabilitação das edificações para habitação social mais um elemento de melhoria para a qualidade de vida da população contemplada é adquirido, uma vez que com a garantia da redução dos gastos com eletricidade a utilização de equipamentos para o conforto térmico se torna viável, reduzindo significativamente os impactos da pobreza energética no cotidiano dos moradores que assim podem direcionar seus esforços económicos a outras demandas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ecossistema de benefícios obtidos com a inclusão de fontes de energia fotovoltaica integrada, BIPV, em programas de habitação social é um produto de ações sistemáticas que utiliza como base uma tecnologia para responder a questões socioambientais, colocando o cidadão de baixa renda como peça central dos fluxos integrativos do sistema. Com uma abordagem centrada nas pessoas, os benefícios

da geração de eletricidade local podem ser aproveitados de forma a beneficiar os setores da sociedade que mais necessitam dessa fonte de energia diante de um cenário económico árduo, intensificado pela imprevisibilidade dos eventos extremos originários das mudanças climáticas. A figura 7 sintetiza os principais benefícios obtidos com a inclusão de BIPV em edificações para habitação social.

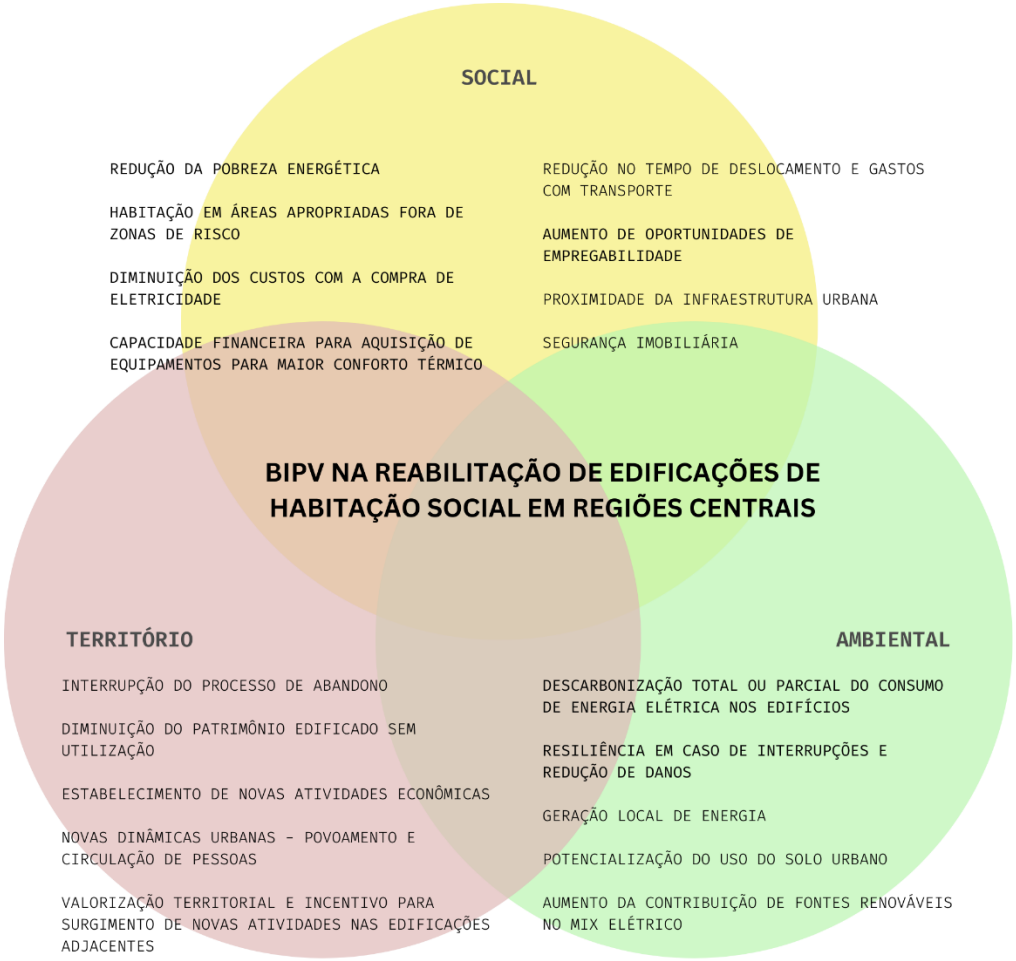


Figura 7 – Ecossistema de benefícios gerados com a inclusão de BIPV na reabilitação de edificações para habitação social em regiões centrais.

A urgência da necessidade de descarbonizarão do consumo de energia nas cidades requer maiores iniciativas públicas e financiamentos governamentais. O acesso à energia proveniente de fontes renováveis, como a fotovoltaica, não pode ser tratado como um bem de consumo da iniciativa privada, acessível somente a classes com maior poder de compra. Além de prover habitações dignas com padrão construtivo adequado à realidade climática local, é também necessário incluir a população de baixa renda na transição energética.

Assim, é fundamental que os programas de habitação social sejam aperfeiçoados para que possam abordar de forma objetiva as demandas da atualidade, por forma a viabilizar a habitação proporcionando o aumento da qualidade de vida do cidadão. O combate à pobreza energética, através da inclusão de energias renováveis, e a localização em áreas centrais com a reabilitação de edifícios já existentes, configuram medidas capazes de responder a múltiplas demandas, contribuindo para o desenvolvimento sustentável das cidades e colocando o cidadão como objeto central para garantir a continuidade do ciclo de benefícios objetivados com os programas de habitação social.

REFERÊNCIAS

Açikkalp, E., Hepbasli, A., Palmero-Marrero, A. I., & Borge-Diez, D. (2023). Application of net zero extended exergy buildings concept for sustainable buildings analysis. *Journal of Building Engineering, 68*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106095

Aitor Varea Oro, S. J. (2024). Balanço e perspectivas em torno da execução das políticas públicas de habitação (2018-2026): o plano de recuperação e resiliência em foco. *Construção Magazine, 120*, 14-21.

Amnistia Internacional. (2023, Dezembro 12). *Amnistia Internacional - Em defesa dos direitos humanos*. Retrieved Abril 2024, from https://www.amnistia.pt/declaracao-direitos-humanos/

Araújo, P. (2018). *Prefeitura de Imperatriz*. Retrieved from Prefeitura de Imperatriz: https://imperatriz.ma.gov.br/noticias/habitacao/prefeitura-abre-inscricoes-para-mil-casas-do-minha-casa-minha-vida.html

Aruta, G., Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M. (2023). Optimizing the energy transition of social housing to renewable nearly zero-energy community: The goal of sustainability. *Energy and Buildings, 282*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112798.

Bahaj, A., & James, P. (2007). Urban energy generation: The added value of photovoltaics in social housing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11*, 2121-2136. doi:doi:10.1016/j.rser.2006.03.007

Bodach, S., & J.Hamhaber. (2010). Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Energy Policy, 38*(12), 7898-7910. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.009.

Broers, W., Kemp, R., Vasseur, V., Abujidi, N., & Vroon, Z. (2022). Justice in social housing: Towards a people-centred energy renovation process. *Energy Research & Social Science, 88*. doi:https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102527

Curado, A., & Freitas, V. d. (2019). Influence of thermal insulation of facades on the performance of retrofitted social housing buildings in Southern European countries. *Sustainable Cities and Society, 48*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101534.

Delgado, J., Matos, A. M., & Guimarães, A. S. (2022). Linking Indoor Thermal Comfort with Climate, Energy, Housing,and Living Conditions: Portuguese Case in European Context. *15*. doi:https://doi.org/10.3390/en15166028

EBC, E. B. (2024). *Agência Gov*. Retrieved from Agência Gov: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202404/ministra-faz-agenda-em-sao-paulo-com-movimentos-sociais-e-empresarios-1

FEANTSA. (2020). *FEANTSA - Working Together to End Homelessness in Europe*. Retrieved from https://www.feantsa.org/en/country-profile/2020/11/12/country-profile-portugal?bcParent=27

Fontenelle, R. (2018). *Arch Daily*. Retrieved from Arch Daily: https://www.archdaily.com.br/br/899055/aluguel-para-turistas-em-bairro-projetado-por-alvaro-siza-gera-divisao-entre-moradores

Fowler, T., Southgate, R. J., Waite, T., Harrell, R., Kovats, S., Bone, A., . . . Murray, V. (2015). Excess Winter Deaths in Europe: a multi-country descriptive analysis. *European Journal of Public Health, 25*(2), 339–345. doi:https://doi.org/10.1093/eurpub/cku073

Fundação João Pinheiro. (2024, Abril). *Fundação João Pinheiro*. Retrieved from Fundação João Pinheiro: https://fjp.mg.gov.br/paineis-interativos-de-dados/

Gomesa, P. V., Netoa, N. K., Carvalhoa, L., Sumailia, J., Saraivaa, J., & Dias, B. (2018). Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues. *Energy Policy, 115*, 199-206. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.014

Horta, A., Gouveia, J. P., Schmidt, L., Sousa, J. C., Palma, P., & Simões, S. (2019). Energy poverty in Portugal: Combining vulnerability mapping with household interviews. *Energy and Buildings, 203*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109423.

IBGE. (2022). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Retrieved from Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: https://www.ibge.gov.br/

IEA PVPS. (2021). *Task 15 - Categorization of BIPV applications Breakdown and classification of main individual parts of building skin including BIPV elements.*

Kuhn, T. E., Christof Erban, M. H., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy and Buildings, 231*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381.

Mendes, L. F. (2021). Plano de Recuperação e Resiliência em Portugal e a questão da habitação e do arrendamento. In O. E. Senhoras, *COVID-19: consequências econômicas e organização social.* Ponta Grossa: Atena. doi:https://orcid.org/0000-0001-5281-4207

Mendes, L. F. (2024, Abril 23). A crise habitacional em Portugal. (F. P. Batista, Interviewer)

Metrópoles, O. d. (2024, maio). *Observatório das Metrópoles*. Retrieved from Observatório das Metrópoles: https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/nucleo-porto-alegre-analisa-os-impactos-das-enchentes-na-populacao-pobre-e-negra-do-rio-grande-do-sul/poa-e-canoas/

Ministério das Cidades. (2023, setembro 13). Conheça o programa Minha Casa, Minha Vida - O maior programa de habitação de interesse social do Brasil está de volta com novas regras. Brasília, DF, Brasil. Retrieved from https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/noticias-1/conheca-o-programa-minha-casa-minha-vida

Nascimento, D. M., & Braga, R. C. (2009). Déficit habitacional: um problema a ser resolvido ou uma lição a ser aprendida? *RISCO Revista de pesquisa em arquitetura e urbanismo*(9), 98-109. doi:https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i9p98-109

Onyx Solar Group LLC. (2024). *Onix Solar*. Retrieved July 25, 2023, from https://onyxsolar.com/

Pereira, I. d. (2023, Dezembro 18). O novo programa Minha Casa Minha Vida: expectativas e prospecções para o futuro. (F. P. Batista, Interviewer)

Pinto, J. T., Amaral, K. J., & Janissek, P. R. (2016). Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. *Solar Energy, 133*, 73-84. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.048.

Revista Projeto. (2023, fevereiro 27). Retomada do Minha Casa, Minha Vida aponta melhorias no setor. Retrieved from https://revistaprojeto.com.br/noticias/retomada-do-minha-casa-minha-vida-aponta-melhorias-no-setor/

Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings, 128*, 99-110.

Stojilovska, A., Dokupilová, D., Gouveia, J. P., Bajomi, A. Z., Tirado-Herrero, S., Feldmár, N., . . . Feenstra, M. (2023). As essential as bread: Fuelwood use as a cultural practice to cope with energy poverty in Europe. *Energy Research & Social Science, 97*. doi:https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102987.

Stojilovska, A., Guyet, R., Mahoney, K., Gouveia, J. P., Castano-Rosa, R., Zivcic, L., . . . Tkalec, T. (2022). Energy poverty and emerging debates: Beyond the traditional triangle of energy poverty drivers. *Energy Policy, 169*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113181

Taborianski, V. M., & Pacca, S. A. (2022). Carbon dioxide emission reduction potential for low income housing units based on photovoltaic systems in distinct climatic regions. *Renewable Energy, 198*, 1440-1447. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.091

Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2015). Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Police, 87*, 524-541. doi:DOI:10.1016/j.enpol.2015.08.041

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VIABILIDADE DE USO DA CINZA DE CASCA DE CAFÉ COMO ATIVADOR ALCALINO ALTERNATIVO

Davi Vaz André Junior[a]; Madeleing Taborda Barraza[a]; Carlos Maurício Fontes Vieira[a]; Markssuel Teixeira Marvila[b]; Afonso Rangel Garcez de Azevedo[c]

[a]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Materiais Avançados, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brazil. davi.jjrvaz@gmail.com; madelatb@gmail.com; vieira@uenf.br.

[b]Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba, 38810-000, Rio Paranaíba, Brazil. markssuel.marvila@ufv.br.

[c]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brazil. afonso@uenf.br.

RESUMO

Na procura de ativadores alternativos para a formação de compósitos de ativação alcalina, foi identificado que a cinza da casca de café possui um alto teor de álcalis potássico (K_2O), que é solúvel e leva à formação de hidróxido de potássio (KOH) quando entra em contato com a água. Este hidróxido já é um ativador comercial usado na área, porém, apresenta elevado custo quando comparado com ativadores convencionais de NaOH ou Na_2SiO_3. O objetivo deste trabalho foi viabilizar o uso da Cinza da Casca do Café, resíduo amplamente disponível no Brasil, como potencial ativador alcalino, em substituição aos ativadores químicos tradicionalmente utilizados nas reações. Assim, foi realizado o condicionamento e tratamento físico do resíduo. Quando adicionada à pasta do material álcali-ativado a base de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio, o qual estava sendo substituído em 10%, 25% e 50% (em massa) pelo hidróxido. Em estado fresco, registrou-se um incremento da viscosidade do sistema de referência quando incorporado e, mediante calorimetria de condução isotérmica, foi observado que até 10% cinza do café contribuiu ao fluxo de calor do sistema principal. Da mesma forma, teores menores de substituição não comprometeram significativamente o desempenho mecânico do compósito, indicando que existe uma limitação de uso do resíduo, para ser incorporados em ativações alcalinas.

PALAVRAS-CHAVE

Café, Cinza, Ativador, Alcalino, Aproveitamento

1. INTRODUÇÃO

Os materiais álcali-ativados (MAA) são fabricados a partir de precursores como as argilas calcinadas, escórias, cinzas industriais e cinzas de biomassa, que são ativadas com agentes alcalinos. Destes os mais usados são ricos em cálcio, sódio e potássio, especificamente os hidróxidos/silicatos. A importância deles está no carregamento de dois íons alcalinos que integram a rede semicristalina e são responsáveis pelo desempenho mecânico das amostras, que são fabricadas emitindo menor quantidade de CO_2, quando comparados à produção do cimento Portland.

Todavia, os MAAs não são completamente sustentáveis, visto que a exploração de argilas, assim como a produção de ativadores alcalinos industriais ainda gera quantidades significativas de dióxido de carbono (Soriano *et al.*, 2022). A diferença de emissão entre os MAAs e a fabricação de cimento Portland é de apenas 9%, assim, a procura por utilizar ativadores alternativos levaria ao incremento dessa diferença (Turner e Collins 2013).

Por outro lado, as cinzas da casca do café são produzidas após queima dos grãos, as quais se juntam aos tantos tipos de biomassa existentes no setor agrícola. Estas são descartadas em sua maioria porque até o momento somente a indústria estética faz uso dela na produção de sabonete, porém não consegue absorver o volume de resíduo gerado, visto que, por exemplo, a produção mundial de café para o ano 2023-2024 foi estimada em 178 milhões de sacas de 60 quilos. O que representa a geração de 5340 milhões de quilos de resíduo (50% do beneficiamento do café) (Embrapa 2024). Este volume de resíduo se torna significativo para o Brasil, que é o principal produtor de café, e o destino dele é o aterro sanitário. Todavia, este material possui um alto conteúdo de álcalis potássico (K_2O), um componente atrativo para a formação de hidróxidos ou silicatos.

Jayanthi *et al.* (2022), utilizaram resíduo da casca de arroz como precursor em material álcali ativado, substituindo parcialmente a escória de alto forno, mas este material já é amplamente utilizado para ativações alcalinas e cimento (Huo *et al.*, 2023; Díaz *et al.*, 2024). O material é calcinado em forno em temperaturas que variaram entre 500 e 600 °C. Nessas condições, os resultados de caracterização mostraram a presença de sílica, majoritariamente amorfa, cerca de 95%. E assim como Istuque *et al.*, 2022, que incorporando 20% de substituição obtiveram um ganho de resistência a compressão.

Carevic *et al.* (2020), avaliaram a viabilidade de substituição parcial do cimento Portland em argamassa por biomassa de madeira resultante de usinas elétricas. As porcentagens de substituição foram de 5%, 10% e 15% em massa. Apesar da perda de trabalhabilidade a medida em que o teor de cinza foi aumentando, os autores relataram que em todas as substituições, houve ganho de resistência a compressão, além das argamassas com 5% e 10% apresentarem um menor valor de absorção por capilaridade.

Finalmente, certos autores indicam que as cinzas deste tipo devem ser calcinadas em temperatura similares a uma argila e por tempos elevados (>12 horas) caso seja objetivado o incremento da reatividade do álcalis, requerendo também tratamentos adicionais de superfície e uso em proporções menores (Lima, Gomes and Moraes, 2023). Entretanto para viabilizar seu uso, neste estudo será utilizado a cinza da casca do café calcinada pela empresa fornecedora, avaliando seu potencial de uso como ativador alternativo, reduzindo o possível gasto energético e compreendendo sua interação físico-química com o ambiente geopolimérico. Espera-se que exista compatibilidade

entre os materiais nas condições de preparo e que possa ser indicado em que porcentagem de incorporação se torna viável o uso deste resíduo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como precursor foi utilizado um metacaulim comercial (MC), a cinza da casca de café (CCC) foi obtida de uma empresa da região, as composições químicas estão registradas na Tabela 1 e as principais fases mineralógicas e as curvas de granulometria estão registradas na Figura 1. Também é apresentada a aparência da casca de café e a cinza obtida dela.

Tabela 1 - Composição de óxidos dos materiais utilizados

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	P_2O_5	Outros	ρ (g/cm³)
MC (%)	53,73	42,21	0,57	0,11	0,03	2,15	0,40	-	0,8	2,52
CCC (%)	3,21	-	3,91	23,93	-	62,20	3,89	1,67	1,19	2,28

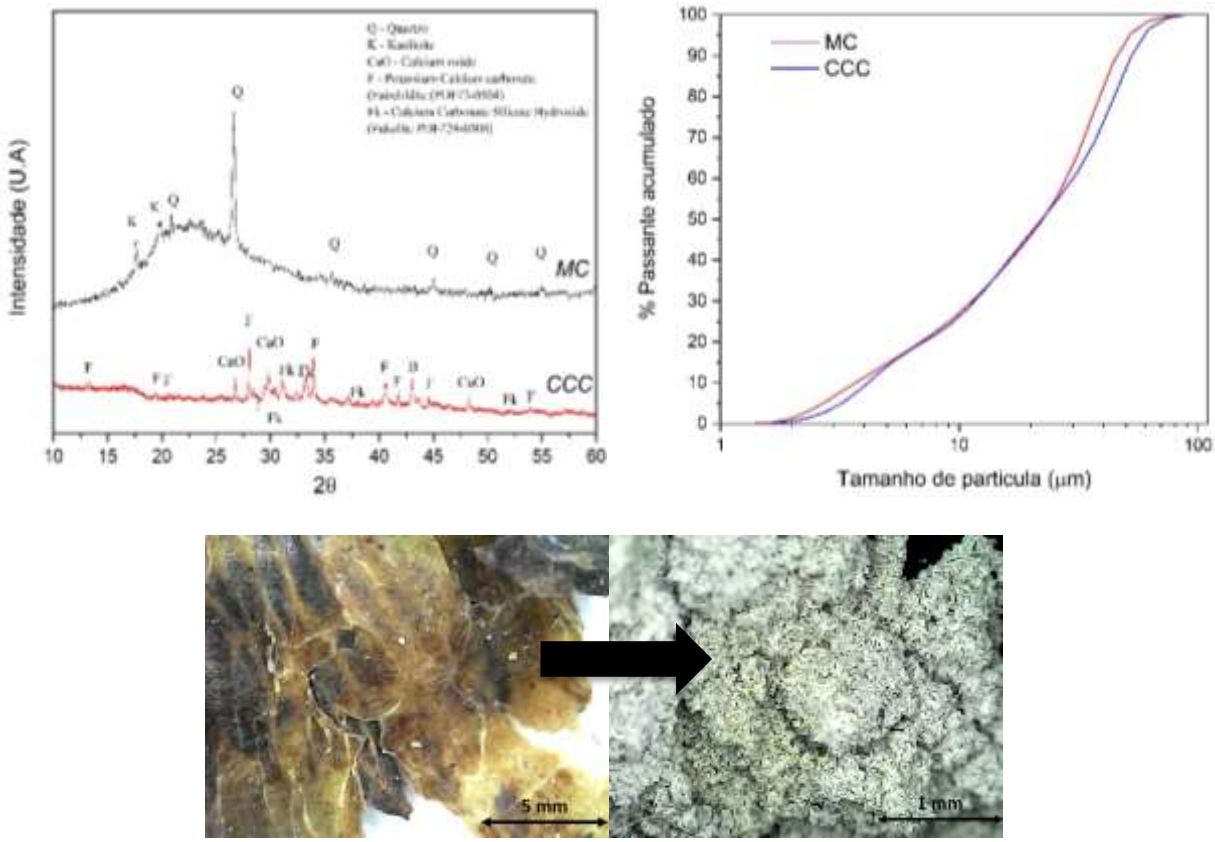


Figura 1 - Espectro de difração de raios-X e Distribuição granulométrica do metacaulim (MC) e da cinza da casca do café (CCC)

A solução ativadora foi constituída de silicato de sódio em pó (SSP) (com módulo de sílica SiO_2/Na_2O = 3,5) e de hidróxido de potássio (HP) (98% de pureza). Para obter um silicato solúvel foi colocado o silicato em pó (44 gramas) em água destilada (76 gramas) com aquecimento em 80°C durante 120

minutos. Uma vez resfriado, foi acrescentado o hidróxido de potássio ou sua substituição de CCC em 0%, 10%, 25% e 50%. A solução foi preparada em um agitador magnético e utilizada após 24 horas. Esta solução total foi misturada com o metacaulim durante 4 minutos e depois moldadas em cilindros de diâmetro 19 mm X 24 mm de altura, que ficaram na estufa a 60°C por 48 horas. As proporções especificadas de cada grupos se registram na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das pastas

Grupo	MC (g)	H_2O (g)	SSP (g)	HP (g)	CCC (g)
0%	130	76	44	14	-
10 %				12,6	1,4
25 %				10,5	3,5
50%				7	7

O estado fresco das pastas foi avaliado com um viscosímetro Rotacional Digital MVD-8, com um rotor tipo L3 e uma rotação fixa de 60 rpm. Também foi utilizado um calorímetro de condução isotérmica da marca *Tam Air* com 8 canais, a 25°C, durante 48 horas. O estado endurecido das pastas foi avaliado mediante a resistência à compressão uniaxial, utilizando uma prensa *instron* 34 FM-10 numa taxa de aplicação de carga de 0,05Mpa/s. Finalmente a distribuição de poros foi determinada por Intrusão de mercúrio (PIM) usando *micrometritics AutoPore* IV de 5-60000 Pa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da viscosidade das pastas foram registrados na Figura 2, a tendência foi congruente às referências bibliográficas: na medida que a CCC era incorporada no sistema foi registrando incremento na viscosidade, isso pode ser justificado por dois motivos: o primeiro, o CCC registrar área superficial similar ou maior ao precursor, absorvendo parte da solução. O segundo motivo é, o processo de dissolução do K_2O, que ao se transformar em KOH incrementa a viscosidade do sistema (Caldas, de Azevedo and Marvila, 2023), ainda que, parte do CCC também é CaO, que na presença de agua também se solubiliza e forma $Ca(OH)_2$. Diferencialmente, o grupo 10% registrou um comportamento similar à referência, teores maiores incrementaram a viscosidade em 38,85% e 62,55%, para 25% e 50% de substituição. Resultados de Marangon *et al.,* (2021) indicam que incorporar cinza de biomassa na argamassa geopolimérica levou à retenção d'água devido à alta área superficial das partículas. Porém, não pode ser descartado um efeito sinérgico.

Na Figura 3 é apresentado o fluxo de calor e o calor total acumulado das pastas. Dos picos que normalmente são registrados na reação dos geopolímeros, um associado à dissolução e outro à polimerização, somente o pico de dissolução é comum a todos os grupos avaliados, porém a polimerização parece ter acontecido diferencialmente para a matriz de referência (0%). A intensidade do pico de dissolução diz muito da interação do precursor no meio (Pacheco-Torgal *et al.*, 2014; Rasmus *et al.,* 2023), entretanto, as amostras possuem o mesmo tipo e quantidade de precursor e ainda assim intensidades são distantes para 10% e 50% quando comparadas com 0%. O grupo 10% promove uma energia térmica superior (60,68%) comparada com 0%, enquanto os outros teores não contribuem significativamente, ao contrário reduzem a intensidade do pico da referência. Porém, com o passar do tempo essa variação da energia é reduzida ao ponto de se igualar com os grupos com substituição. Somente o grupo 0% se mantem com valores de fluxo de calor acima dos outros grupos, até estabilizar após 38 horas.

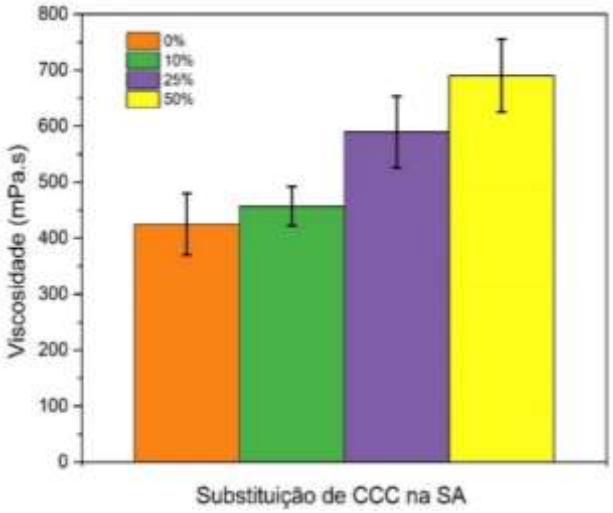


Figura 2 - Viscosidade das pastas com substituição de Hidróxido de potássio pela CCC

Em relação ao calor total acumulado, a referência sobrepassa ao grupo mais distante em 44,36% (25%), porém parece ter um início de estabilidade após 40 horas, o que não se aplica para os grupos com substituição. Resultados obtidos (Ruviaro *et al.*, 2023), introduzindo cinza de biomassa, demostram que teores maiores a 20% levam à redução da energia térmica emitida pelo sistema devido à redução da contribuição da cinza no sistema, ainda que estas cinzas fossem calcinadas a 500°C e não em 300°C como as cinzas deste estudo.

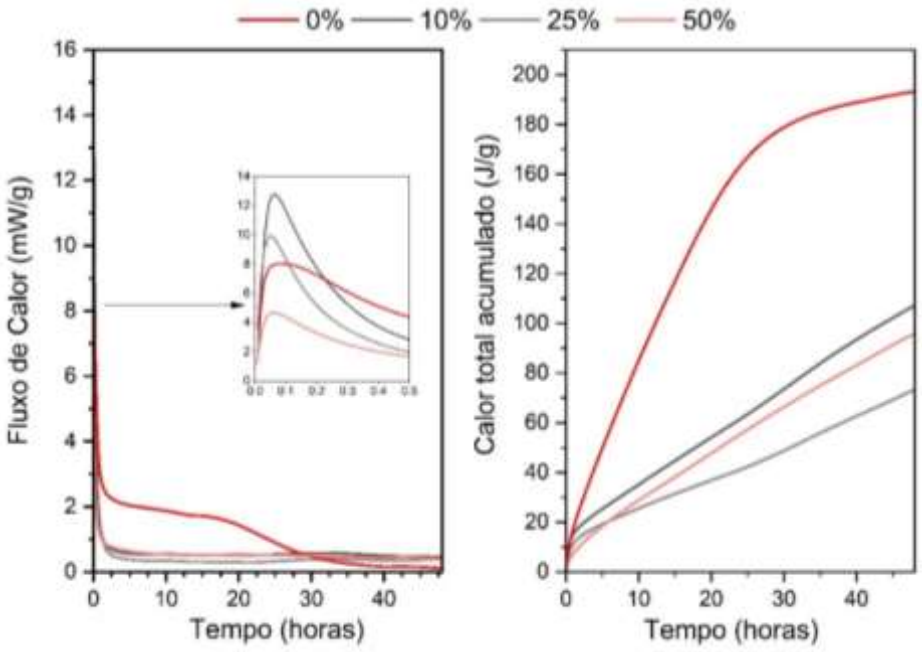


Figura 3 - Curva de fluxo de calor e calor total acumulado das pastas

Conforme é observado na Figura 4, os teores de 10% e 25% do resíduo levaram a manter ou incrementar os valores de resistência, porém exclusivamente para 7 dias. Para 28 dias, a matriz de referência atinge melhor desempenho que todas as incorporações de resíduo, o que indicaria que

parte dele não contribui significativamente ao desenvolvimento das reações, tal como se observou nas medições de calorimetria. Parte dessa redução na taxa de polimerização pode estar relacionada à alta presença de carbonatos, que podem causar um efeito inibidor ou deletério da formação de cadeias quando sobressaturam o sistema e o efeito causado pelo ativador principal (Lee and Van Deventer, 2002; Yip *et al.*, 2008). Adicionalmente, dificultando a trabalhabilidade das pastas a sua presença latente manifestaria debilidade na estrutura com o passar do tempo, e que se evidencia na redução da resistência para 28 dias nos grupos de 25% e 50%. Todavia o grupo 10% registra uma queda de 17,06% para os 28 dias de cura, comparado com a referência, o que indica um possível teor ótimo menor a este valor.

Estudos envolvendo cinza de biomassa como agente ativador de materiais álcali-ativados, relataram estabilidade na resistência a compressão com baixo teor de resíduo. Soriano *et. al.* (2020), utilizaram cinza de resíduo de amêndoa como ativador alternativo, que registrando 46,98% de K_2O afirmam obter incremento na taxa de formação de dissolução e gelificação, como foi demonstrado parcialmente na Figura 4, com picos de dissolução maiores (Lee and Van Deventer, 2002).

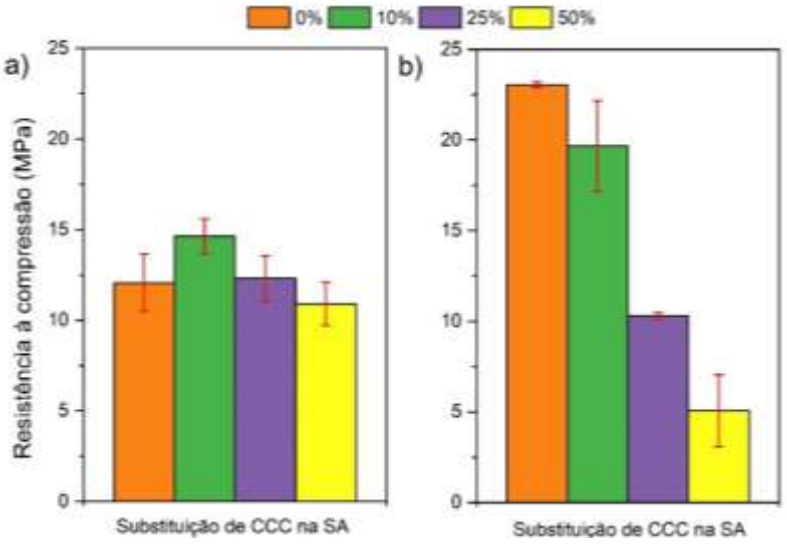


Figura 4 - Comportamento da resistência à compressão das pastas para a) 7 dias e b) 28 dias

Em relação à distribuição de tamanho de poro, a Figura 5 compara as variações de um sistema para outro. Sendo que o grupo de referência tem sua distribuição predominantemente bimodal, com um pico de maior intensidade em ~0,015µm, numa faixa de mesoporos (2-50nm). E outro pico em 0,4 µm (microporos). Quando o 10% do resíduo é incorporado um pico de menor intensidade surgem na mesma faixa de mesoporos (0,05 µm), entretanto um pico centralizado em 0,4 µm, com maior intensidade à referência, indica a formação mais poros na faixa microporos. O teor de 25% leva à formação de poros centralizados na faixa microporos e finalmente 50% possui uma distribuição bimodal de mesoporos e microporos, com valores centralizados em 0,025 e 0,6 µm. Isso manifesta que o teor de 10% pode ter refinado a microestrutura em um segmento de poros, mas levou a maior presença de poros, enquanto teores maiores levaram ao deslocamento de intensidade de poros maiores (entre 0,025 e 0,75 µm). Todavia, as porosidades totais foram: 31,73%, 29,09%, 27,40% e 38,74%, para 0%, 10%, 25% e 50%, respectivamente. Sendo assim, até 25% podem reduzir a

porosidade dos sistemas, porém não implica que seja pela formação de novos produtos de reação, tal como se vê no desempenho mecânico.

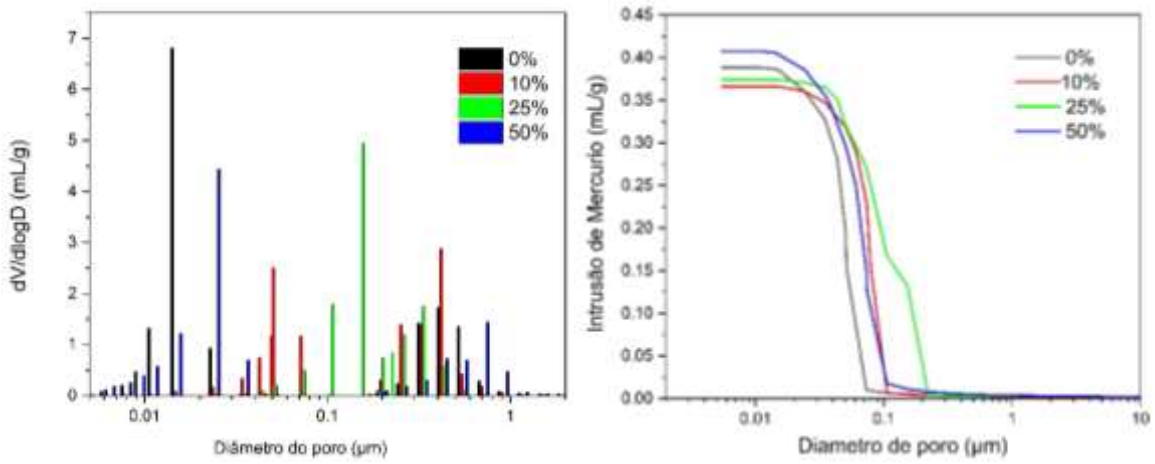


Figura 5 - Distribuição de tamanho de poro via Intrusão de Hg

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que foi possível fabricar um compósito com ativador alternativo a base de cinza da casca do café. Entretanto, existe um teor conveniente a ser utilizado para não comprometer a trabalhabilidade das pastas, já que conforme a substituição acontecia, a viscosidade do sistema incrementava. Da mesma forma que, existe um teor que leva a uma redução de porosidade, porém não necessariamente isso indica contribuições na formação de produtos de reação que façam incrementar a resistência à compressão.

Em geral, substituições do ativador comercial pelo alternativo a partir de 25% não são sugeridas pela exposição a redução na taxa de produtos de reação. Entretanto, baseados nas existências por normas brasileiras de argamassa, a CCC mostra-se viável para ser utilizada como ativador alcalino alternativo em substituições de até 50% para aplicações como assentamento de blocos estruturais e de revestimentos cerâmicos.

5. REFERÊNCIAS

Caldas, P.H.C.H., de Azevedo, A.R.G. and Marvila, M.T. (2023) 'Silica fume activated by NaOH and KOH in cement mortars: Rheological and mechanical study', Construction and Building Materials, 400(July), p. 132623. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132623.

Díaz, A.G. et al. (2024) 'Improved strength of alkali activated materials based on construction and demolition waste with addition of rice husk ash', Construction and Building Materials, 413(January). Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134823.

Huo, Y. et al. (2023) 'Durability of alkali-activated slag concrete incorporating silica fume and rice husk ash', Journal of Building Engineering, 78(June), p. 107637. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107637.

Istuque, D.B. et al. (2022) 'The role of dissolved rice husk ash in the development of binary blast furnace slag-sewage sludge ash alkali-activated mortars', Journal of Building Engineering, 52(April). Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104472.

Lee, W.K.W. and Van Deventer, J.S.J. (2002) 'Effects of anions on the formation of aluminosilicate gel in geopolymers', Industrial and Engineering Chemistry Research, 41(18), pp. 4550–4558. Available at: https://doi.org/10.1021/ie0109410.

Lima, F.S., Gomes, T.C.F. and Moraes, J.C.B. (2023) 'Effect of coffee husk ash as alkaline activator in one-part alkali-activated binder', Construction and Building Materials, 362(July 2022), p. 129799. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129799.

Ruviaro, A.S. et al. (2023) 'Valorization of oat husk ash in metakaolin-based geopolymer pastes', Construction and Building Materials, 367(January), p. 130341. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130341.

Yip, C.K. et al. (2008) 'Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers', Cement and Concrete Composites, 30(10), pp. 979–985. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.07.004.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO TÉRMICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO

Sofia Real[a]; José Bogas[b]; Ricardo Cruz[b]; Martim Nabais[b]; Maria Glória Gomes[b]

[a]Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal; sreal@lnec.pt

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal; jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt; ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt; maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt; martimnabais@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a caracterização do comportamento térmico de blocos de terra comprimida (BTC) estabilizados com cimento reciclado termoativado (CRP) e com incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD). Para tal, foi realizado um vasto trabalho experimental, em que foram analisadas as propriedades térmicas de BTC produzidos com diferentes tipos de solo, tipos e teores de estabilizante, e percentagens de incorporação de RCD. Dado que o desempenho térmico dos BTC é afetado pela sua microestrutura, estes também foram caracterizados em termos de microporosimetria de intrusão de mercúrio e adsorção de nitrogénio.

As propriedades térmicas dos BTC foram essencialmente influenciadas pela sua porosidade global, e em segundo plano, pelo tipo e distribuição da porosidade, independentemente da sua composição. A condutibilidade térmica dos BTC foi afetada pelo teor de humidade, dependendo essa influência da distribuição de porosidade. Mesmo tendo em consideração BTC com idêntica porosidade total e resistência mecânica, a substituição de cimento Portland (CEM) por CRP ou de solo por RCD conduziram a melhor desempenho térmico. O comportamento térmico dos BTC com CRP ou CEM difere pela forma como estes estabilizantes afetam de forma diferente a sua microestrutura.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida, cimento reciclado termoativado, agregado reciclado, condutibilidade térmica, microestrutura

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
REPÚBLICA PORTUGUESA

1 INTRODUÇÃO

O desempenho térmico dos edifícios e, consequentemente dos materiais de construção, é crucial para a sua sustentabilidade, dado que contribui não só para o conforto térmico, mas também para a redução do consumo energético necessário à manutenção desse estado. Os blocos de terra comprimida (BTC), que são essencialmente compostos por terra, um material abundante e económico, apresentam-se como materiais de construção amigos do ambiente com boa capacidade de isolamento térmico (Rigassi, 1985).

As propriedades térmicas dos materiais de construção encontram-se intimamente ligadas à sua porosidade e, consequentemente, à sua massa volúmica (Adam e Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Real et al., 2015). Adam e Jones (1995) demonstraram que tal também é válido para BTC estabilizados, tendo obtido uma correlação exponencial entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica. Além disso, os autores salientaram que a composição do solo também afeta a massa volúmica e o desempenho térmico dos BTC. Zhang et al. (2017) destacaram a importância da composição mineralógica do solo para a condutibilidade térmica, em particular da presença de quartzo, que pode conduzir a maiores condutibilidades térmicas do que outros minerais. Por outro lado, Ouedraogo et al. (2020) reportaram que o tipo de solo teve pouca influência para a condutibilidade térmica dos BTC, ao testarem solos com massas volúmicas semelhantes.

Em geral, os BTC com melhor desempenho térmico tendem a apresentar um comportamento mecânico e de durabilidade mais fraco, dado que estas propriedades são influenciadas pela porosidade de forma oposta. Mansour et al. (2016) estudaram a influência da pressão de compactação no desempenho dos BTC, tendo observado que o aumento da pressão de compactação conduzia a maior massa volúmica e menor porosidade, e consequentemente, a maior condutibilidade térmica e resistência mecânica. Além disso, geralmente, os BTC não estabilizados (NE) não apresentam durabilidade adequada, em especial em termos de resistência à água (Adam e Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Zhang et al., 2017). Assim, a estabilização química apresenta-se como uma solução eficaz para incrementar significativamente a durabilidade dos BTC (Bogas et al., 2019). Saidi et al. (2018) verificaram que a estabilização com cimento e cal hidráulica resultava numa redução da capacidade de absorção dos BTC, mas aumentava a condutibilidade térmica. De facto, a incorporação de estabilizantes, nomeadamente cimento (CEM), leva à formação de produtos de hidratação que preenchem parcialmente a porosidade dos BTC, resultando em maiores massas volúmicas e, consequentemente, em menor capacidade de isolamento térmico. No entanto, Zhang et al. (2017) não observaram uma variação relevante da condutibilidade térmica de BTC estabilizados com 5-8% de cimento, com mesma massa volúmica. Tal foi atribuído a uma condutibilidade térmica semelhante entre solo e pasta de cimento, bem como à percentagem de incorporação reduzida, que não terá sido suficiente para reduzir a porosidade após a sua hidratação. Todavia, a resistência à compressão deste BTC aumentou consideravelmente com a incorporação de cimento por efeito de cimentação do solo.

Contudo, em termos de sustentabilidade ambiental, a incorporação de CEM em BTC contraria a natureza ecológica da construção em terra, contribuindo para um aumento relevante da pegada de carbono. Neste sentido, têm sido desenvolvidos novos ligantes eco-eficientes como alternativa ao CEM, nomeadamente cimento reciclado termoativado (CRP), já testados em outros materiais de construção (Carriço et al., 2022; Real et al., 2021a) com potencial para ser incorporados em BTC. No entanto, o conhecimento dos efeitos da incorporação de CRP em BTC ainda é escasso, nomeadamente das suas propriedades térmicas.

Este estudo caracteriza o desempenho térmico de BTC eco-eficientes. Para tal, foi determinada a condutibilidade térmica de BTC produzidos com dois tipos de solo (S1 e S2), substituição parcial de

solo por resíduos de construção e demolição (RCD) (0-25%) e incorporação de 0-10% de estabilizante (CRP e/ou CEM).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÃO

Para a produção dos BTC, foram selecionados dois tipos de solo (S1 e S2) provenientes de Montemor-o-Novo, um resíduo de construção e demolição (RCD) da *Vimajas*, CEM I 42,5R (CEM) da *Secil* e cimento reciclado termoativado (CRP) produzido em laboratório.

Os solos S1 e S2 apresentavam massas volúmicas de 2,70 e 2,59 g/cm^3 (NP 83, 1965), limites de liquidez de 30 e 23,7%, limites de plasticidade de 22 e 18,9%, índices de plasticidade de 8 e 4,7% (NP 143, 1969), teores de matéria orgânica < 1% e de 1,48% e teores ótimos de humidade de 16 e 10,9% (ASTM D698, 2021), respetivamente. Além disso, S1 e S2 eram compostos por cerca de 20,1 e 5% de brita, 48,4 e 69,8% de areia, 31,5 e 25,2% de argila/silte (E 239, 1970; HB 195, 2012), com 13 e 4,2% de argila (com base em ensaios de sedimentação), respetivamente. Adicionalmente, a composição granulométrica dos solos encontrava-se dentro dos limites sugeridos pela XP P 13-901 (2001). Os solos foram ainda analisados de acordo com análises de difração de raios-X e de termogravimetria, sendo essencialmente compostos por quartzo e albite e pequenas quantidades de argilas expansivas, nomeadamente nontronite (S1) e montmorillonite (S2). Os RCD apresentavam uma massa volúmica de 2300 kg/m^3 e absorção de água às 24horas de 4,3% (EN 1097-6, 2013), sendo compostos por cerca de 45% de betão, 28% de agregado natural, 17% de cerâmicos de alvenaria, 2% de materiais betuminosos, 0,03% de vidro e 8% de outros materiais.

O cimento CEM I 42,5R apresentava uma consistência normal de 0,295 e um tempo de presa de 190-310 minutos, bem como apenas 1,02% de hidróxido de cálcio (CaO) livre. O CRP foi obtido a partir de pasta produzida em laboratório com relação água/cimento de 0,55 e resistência à compressão aos 28 dias de 33,4 MPa. Cerca de 3 meses após a produção, a pasta foi submetida a processos de moagem, de forma a obter partículas de dimensão inferior a 125 μm. De seguida, as partículas foram sujeitas a tratamento térmico num forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 150°C, onde permaneceram durante 1 hora, seguido de novo aquecimento a 10°C/min até 650°C, onde permaneceram durante 3 horas, tendo finalmente sido arrefecidas dentro do forno até temperatura ambiente. O CRP apresentava uma consistência normal de 0,73, um tempo de presa de 290-385 minutos e cerca de 13,94% de CaO livre.

Para este estudo, os BTC foram produzidos em duas fases, com cerca de 220×105×60-80 mm com recurso a uma prensa manual da *Terstaram* com uma força de compactação de 150kN. Na fase 1, os BTC foram produzidos com o solo S1 e 5-10% de estabilizante (CRP ou CEM), enquanto, na fase 2, foi utilizado o solo S2, até 25% de RCD e 5-8% de estabilizante (CRP ou CEM), para melhorar a sua eco-eficiência. A composição dos BTC encontra-se no Quadro 1. De referir que, após a produção, os BTC estabilizados foram sujeitos a 7 dias de cura húmida, e os BTC não estabilizados a 7 dias de cura seca cobertos com película.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

A condutibilidade térmica (CT) foi determinada através de um método transiente modificado (ASTM D5334, 2014; ASTM D5930, 2009), recorrendo a um analisador de transferência de calor *ISOMET 2114* com sonda plana da *Applied Precision Enterprise*. A condutibilidade térmica foi convertida para uma temperatura e 10°C, de acordo com a ISO/FDIS 10456 (2007).

A caracterização física e mecânica dos BTC foi realizada através de ensaios de massa volúmica (MV) (EN 772-13, 2000) e de resistência à compressão aos 28 dias (f_c) (EN 772-11, 2011; NBR 8492, 2012). Os ensaios de resistência mecânica foram realizados sobre BTC em ambiente de laboratório com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com capacidade de 3000kN e uma célula de carga com capacidade de 200kN. A porosidade total estimada (*PT*) dos BTC após hidratação do estabilizante foi determinada de conforme explicado em (Bogas et al., 2023). Foram também realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e de adsorção de nitrogénio (N_2) para seis composições. Os ensaios de MIP e de adsorção de N_2 foram realizados com recurso a um porosimetro *AutoPore IV 9500 V1.09* e um analisador *Micromeritics ASAP 2010*, respetivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

O Quadro 1 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas dos BTC estudados. Os S1.BTC apresentaram menores massas volúmicas secas do que os S2.BTC, o que pode ser explicado pelo facto de o solo S2 estar associado a menor teor ótimo de humidade e melhor compactação (secção 2.1). Em geral, a incorporação de RCD não teve um efeito relevante na massa volúmica dos S2.BTC (Quadro 1). Devido à sua menor massa volúmica (RCD), seria expectável que a massa volúmica decrescesse com a substituição de solo por RCD. No entanto, a maior compacidade granular atingida com a incorporação de RCD compensou este efeito. Assim, as ligeiras diferenças observadas deveram-se essencialmente à variação do grau de compactação, pelo que não se observou nenhuma tendência, em que o S2.CEM8.RCD15 foi o BTC que atingiu a maior compacidade.

A incorporação de CEM não influenciou a massa volúmica de forma relevante (Quadro 1), indicando que a compacidade dos BTC foi pouco afetada pelo teor de CEM. No entanto, foram observadas diferenças mais significativas com a incorporação de CRP, devido à sua maior necessidade de água. De facto, as massas volúmicas dos BTC com CRP tenderam a ser inferiores às dos BTC com o mesmo teor de CEM, associado à sua menor porosidade total (Quadro 1). Por um lado, os S1.BTC com CRP foram produzidos com maior teor de água do que os com CEM (Quadro 1). Por outro lado, para teor de água idêntico, os S2.BTC com CRP foram mais difíceis de compactar do que os com CEM, devido à maior necessidade de água do CRP. Além disso, de acordo com estudos anteriores (Bogas et al., 2022), o CRP tende a produzir uma quantidade de produtos de hidratação ligeiramente inferior do que o CEM a longo-prazo, o que contribui para o decréscimo da água ligada em BTC no estado seco.

Os S2.BTC atingiram resistências à compressão quase duas vezes superiores às dos S1.BTC, mesmo tendo um teor de estabilizante inferior. Tal pode ser explicado pelo maior grau de compactação alcançado nos S2.BTC do que nos S1.BTC, que pode ser confirmado pela sua porosidade total (Quadro 1). A substituição parcial de solo por RCD teve um efeito pouco relevante na resistência mecânica dos S2.BTC (Quadro 1), observando-se a mesma tendência da massa volúmica. Por outro lado, a incorporação de estabilizante contribuiu claramente para o aumento da resistência à compressão (Quadro 1), independente do tipo de estabilizante. No entanto, para a mesma percentagem de incorporação de estabilizante, os BTC com CEM apresentaram resistências à compressão cerca de 35% (S1) e 64% (S2) superiores à dos BTC com CRP. Conforme referido, os S1.BTC com CRP foram produzidos com maior teor de água do que os com CEM (Quadro 1). Além disso, devido à maior necessidade de água do CRP, a compactação dos BTC com este tipo de estabilizante foi maior difícil do que a dos com CEM para a mesma quantidade de água. Adicionalmente, conforme referido, os produtos de hidratação produzidos pelo CRP a longo-prazo tendem a ser ligeiramente inferiores aos do CEM, o que poderá contribuir para um menor grau de cimentação dos BTC. Contudo, a incorporação

de CRP resultou numa melhoria da resistência mecânica de cerca de 1,9 (S1) e 2,7 (S2) vezes em relação aos BTC não estabilizados (NE). De referir que, apesar da sua maior porosidade total, o S1.NE atingiu maior resistência mecânica do que o S2.NE, essencialmente devido ao facto de o solo S1 apresentar um maior teor de finos e argila, proporcionando uma maior capacidade de cimentação natural.

Quadro 1 – Composição dos BTC e resultados dos ensaios

Fase	Designação	Tipo de solo	RCD (%)	CEM (%)	CRP (%)	Água total (%)	MV seca (kg/m³)	PT (%)	fc (MPa)	CT seca (W/mK)
Fase 1	S1.CEM10	S1	-	10	-	15,0	1769	34,2	5,92	0,51
	S1.CRP10	S1	-	-	10	16,5	1595	39,0	4,44	0,38
	S1.CEM5	S1	-	5	-	15,2	1737	36,5	3,34	0,46
	S1.CRP5	S1	-	-	5	16,2	1649	39,3	2,45	0,41
	S1.CRP2.CEM8	S1	-	2	8	15,0	1742	35,4	5,12	0,50
	S1.CRP5.CEM5	S1	-	5	5	15,5	1683	37,1	4,99	0,46
	S1.NE	S1	-	-	-	14,4	1754	34,4	2,33	0,53
Fase 2	S2.CEM8	S2	25	8	-	14,0	1865	28,6	9,04	0,69
	S2.CEM8.RCD15	S2	15	8	-	14,0	1925	28,0	9,99	0,76
	S2.CEM8.RCD0	S2	-	8	-	14,0	1895	28,2	9,34	0,80
	S2.CEM5	S2	25	5	-	14,0	1874	29,2	6,52	0,63
	S2.CRP8	S2	25	-	8	14,0	1778	32,8	5,51	0,63
	S2.CRP1,6.CEM6,4	S2	25	6,4	1,6	14,0	1845	28,1	10,43	0,75
	S2.CRP4.CEM4	S2	25	4	4	14,0	1874	30,3	8,39	0,66
	S2.NE	S2	25	-	-	12,0	1835	30,4	2,08	0,75

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

O Quadro 2 apresenta os resultados da análise microestrutural realizada para 6 composições. A porosidade total obtida a partir de MIP (PT_{MIP}) variou entre 31,8 e 34,5% e entre 23,9 e 27,5%, para S1.BTC e S2.BTC, respetivamente. Da mesma forma, o volume total de poros obtido para adsorção de N_2 variou entre 0,0386 e 0,0447 cm^3/g e entre 0,0206 e 0,0366 cm^3/g, respetivamente. Assim, os S1.BTC apresentaram maior porosidade do que os S2.BTC, o que corrobora os resultados da massa volúmica seca e da porosidade total estimada (Quadro 1), confirmando-se a sua menor compacidade. No entanto, apesar de a sua porosidade ser maior e mais grosseira, os S1.BTC apresentaram maior

superfície específica do que os S2.BTC. Além disso, o volume de poros <50nm (N_2) dos S1.BTC também foi superior ao dos S2.BTC, o que pode ser atribuído ao maior teor de partículas finas destes BTC.

Quadro 2 – Resultados das análises MIP e de adsorção de N_2

Designação	Análise MIP			Análise de adsorção de N_2			
	Porosidade total <400µm (%)	Porosidade entre 6-50nm (%)	Fração da porosidade total entre 6-50nm (%)	Volume de poros total <150nm (cm^3/g)	Volume de poros <50nm (cm^3/g)	Fração do volume de poros total <50nm (%)	Superfície específica BET (m^2/g)
S1.CEM10	32,30	5,98	18,51	0,0447	0,0155	34,71	9,09
S1.CRP10	34,50	6,20	17,96	0,0446	0,0186	41,68	9,72
S1.NE	31,77	4,92	15,47	0,0386	0,0235	60,86	15,6
S2.CEM8	23,94	7,53	31,47	0,0366	0,0159	43,41	6,39
S2.CRP8	25,78	5,15	19,97	0,0306	0,0138	45,18	6,02
S2.NE	27,50	2,33	8,48	0,0206	0,0111	53,82	7,33

Embora a PT_{MIP} dos BTC estabilizados não tenha sido sempre inferior à dos BTC.NE, a sua porosidade foi claramente mais refinada. De facto, a estabilização resultou num incremento da quantidade de mesoporos entre 6 e 50nm (MIP). Por outro lado, a estabilização contribuiu para o decréscimo da superfície específica, que foi até 72 e 22% maior nos NE do que nos restantes S1.BTC e S2.BTC correspondentes, respetivamente. Tal deve-se ao facto de o estabilizante inativar as partículas finas de argila, promovendo a sua separação e aglomeração, reduzindo o espaço intercamada e a superfície específica (Wu et al., 2022). Este efeito foi mais visível nos S1.BTC porque o seu teor de argila era superior ao dos S2.BTC.

Os BTC com CRP apresentaram maior PT_{MIP} do que os BTC com a mesma percentagem de incorporação de CEM I, independentemente do tipo de solo. Tal deve-se ao facto de os BTC com CRP terem sido produzidos com maior quantidade de água total (S1.BTC) ou terem sido mais difíceis de compactar (S2.BTC) do que os BTC com CEM I. Todavia, apesar da sua maior porosidade total, a sua microestrutura foi semelhante a mais refinada do que a dos BTC com CEM I correspondentes, em particular nos S1.BTC. De facto, a fração da porosidade correspondente à porosidade mais fina do S1.CRP10 foi semelhante no MIP (6-5nm) e superior na adsorção de N_2 (<50nm) do S1.CEM10. Tal pode ser explicado pelo facto de, devido à porosidade das partículas de CRP, parte da água da mistura ser absorvida pela porosidade intrapartícula, contribuindo para a redução do espaço interpartícula e para a densificação da sua microestrutura (Bogas et al., 2022).

No entanto, o mesmo não se verificou nos S2.BTC, em que o BTC com CEM I apresentou uma microestrutura mais refinada do que o BTC com CRP, o que explica a resistência à compressão ligeiramente menor para determinada porosidade (Quadro 1). Todavia, a superfície específica dos BTC

com CRP foi muito semelhante à dos BTC com CEM I, independentemente do tipo de solo. Tal é indicativo de que, em geral, ambos os estabilizantes foram eficientes.

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A condutibilidade térmica seca dos BTC variou entre 0,38 e 0,80 W/mK, em que a dos BTC com 5-10%CEM variou entre 0,51 e 0,8 W/mK (Quadro 1), encontrando-se dentro dos valores apresentados por outros autores (Adam e Jones, 1995; Saidi et al., 2018; Zhang et al., 2017). De acordo com a literatura, as propriedades térmicas dos materiais de construção são essencialmente afetadas pela sua porosidade, conforme demonstrado na Figura 1, em que se observa uma boa correlação entre estas propriedades, mesmo tendo em conta diferentes tipos de solo, percentagens de incorporação de RCD e tipos e teores de estabilizante.

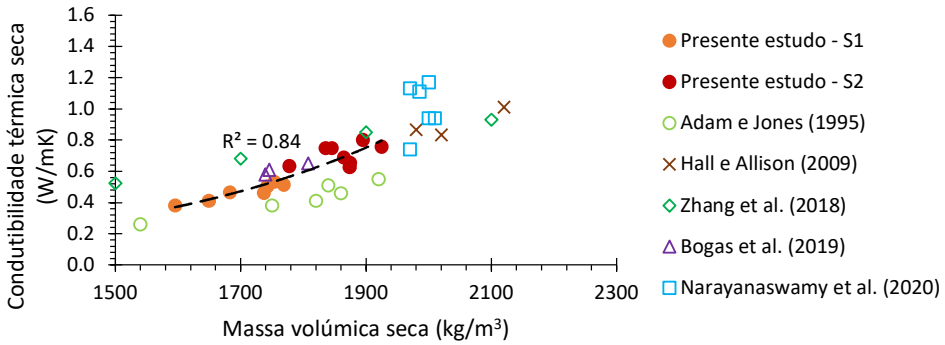


Figura 1 – Condutibilidade térmica seca em função da massa volúmica seca, segundo diferentes estudos (Adam and Jones, 1995; Bogas et al., 2019; Hall and Allinson, 2009; Narayanaswamy et al., 2020; Zhang et al., 2018)

3.3.1 INFLUÊNCIA DO TIPO E TEOR DE ESTABILIZANTE

A Figura 2 apresenta a condutibilidade térmica seca de BTC com diferentes percentagens de incorporação de estabilizante. Em geral, o tipo e percentagem de incorporação de estabilizante não influenciou a condutibilidade térmica de forma relevante, não se tendo observado tendência clara, em especial em BTC com CEM. Tal deve-se ao facto de a massa volúmica seca e a porosidade total dos BTC terem sido mais afetadas pelas condições de compactação do que pelas propriedades de cimentação.

No entanto, a incorporação de estabilizante levou ao decréscimo da condutibilidade térmica, mesmo quando a porosidade total foi menor (Figura 3). Adicionalmente, conforme discutido, para a mesma porosidade total, algumas composições apresentaram diferentes condutibilidades térmicas. Tal deve-se ao facto de a condutibilidade térmica seca ser afetada não só pela porosidade total, mas também pela distribuição de porosidade. De facto, na Figura 3, as composições acima da curva de regressão apresentam porosidades menos refinadas (secção 3.2). Este aspeto é mais evidente no caso do S2.NE, que apresentou uma porosidade muito mais grosseira dos que as outras composições. De forma semelhante, o S2.CEM8 encontra-se abaixo da curva de regressão, tendo apresentado uma porosidade bastante mais refinada do que o S2.CRP8 ou o S2.NE. Por outro lado, os S1.BTC seguiram todos a mesma tendência de condutibilidade térmica seca em função da porosidade total estimada, porque o refinamento da microestrutura do S1.CEM10 e do S1.CRP10 foi semelhante. Para porosidades totais idênticas, o S1.NE, com porosidade ligeiramente mais grosseira, também apresentou uma condutibilidade térmica seca ligeiramente superior à do S1.CEM10.

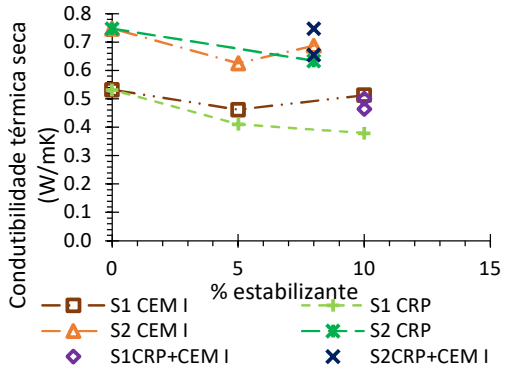


Figura 2 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da percentagem de incorporação de estabilizante

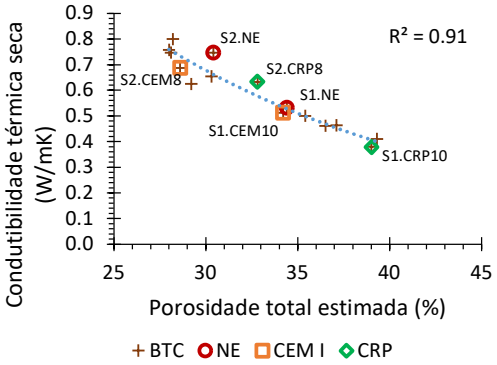


Figura 3 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da porosidade total estimada

A maior condutibilidade térmica em microestruturas mais grosseiras pode ser explicada pelo facto de, assumindo uma distribuição uniforme de poros, para o mesmo volume total de poros, uma maior quantidade de poros de menor dimensão resultaria numa estrutura mais homogénea do que uma menor quantidade de poros de maior dimensão distribuídos na matriz (Figura 4). Esta última tenderia a contribuir para maiores desvios das linhas de fluxo, com maior condução de calor, do que a outra (Figura 4), i.e., o contracto entre sólidos e o a trajetória do fluxo de calor deverá ser mais difícil em estruturas porosas mais refinadas (Figura 4).

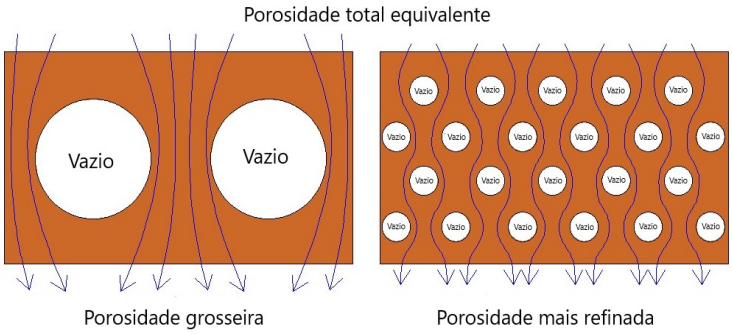


Figura 4 – Representação esquemática da distribuição de fluxo de calor em microestruturas com porosidade mais grosseira (esquerda) ou mais refinada (direita), para porosidade total equivalente

De forma resumida, para a mesma percentagem de incorporação, a condutibilidade térmica seca dos S1.BTC e S2.BTC com CRP foram até 26 e 8% inferiores às dos com CEM, respetivamente. Este resultado pode ser atribuído essencialmente à maior porosidade dos BTC com CRP. Adicionalmente, embora a condutibilidade térmica dos BTC com CRP tenha diminuído com a percentagem de incorporação deste tipo de estabilizante, o mesmo não se verificou para os BTC com CEM, que não apresentaram tendência clara (Figura 2). Tal pode ser explicado pelo facto de a variação da massa volúmica seca dos BTC com CRP ter sido mais relevante do que a dos BTC com CEM. A substituição parcial de CEM por CRP conduziu a propriedades térmicas intermédias (Figura 2). Em comparação com os respetivos BTC não estabilizados (NE), a condutibilidade térmica seca dos S1.BTC e S2.BTC variou até 29 e 16%, respetivamente. A maior diferença observada nos S1.BTC pode ser justificada pela maior variação da

sua massa volúmica seca (até 9 e 3% nos S1.BTC e S2.BTC, respetivamente (Quadro 1)). Conforme seria expectável, observou-se uma correlação fraca entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão dos BTC (Figura 5). Por um lado, para além do eventual preenchimento da porosidade com produtos de hidratação, os estabilizantes contribuíram para o efeito de ligação das partículas, resultando num aumento da resistência mecânica sem afetar a condutibilidade térmica de forma relevante. De facto, a correlação entre estas propriedades melhora quando os NE não foram considerados (Figura 5). Por outro lado, conforme discutido, a incorporação de RCD teve pouca relevância para a resistência à compressão dos BTC, mas reduziu a condutibilidade térmica. Finalmente, dado que a humidade também influencia ambas as propriedades, o facto de os ensaios terem sido realizados em condições diferentes também terá contribuído para os resultados.

3.3.2 INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A Figura 6 mostra a condutibilidade térmica seca dos S2.BTC com 8%CEM e percentagens de incorporação de RCD diferentes. A condutibilidade térmica seca decresceu até 16% com a percentagem de incorporação de RCD.

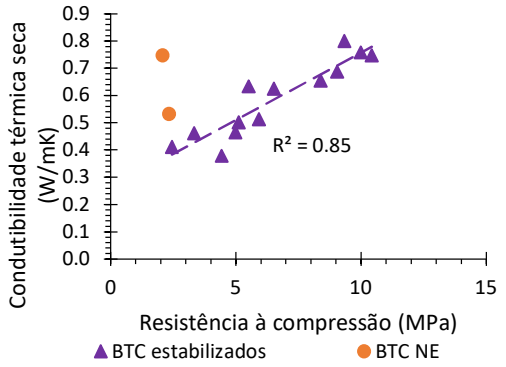


Figura 5 – Condutibilidade térmica seca em função da resistência à compressão em ambiente de laboratório

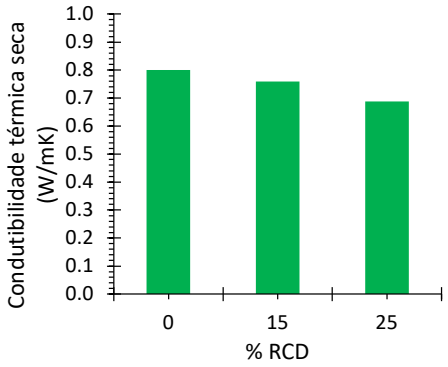


Figura 6 – Condutibilidade térmica seca dos BTC em função da percentagem de substituição de solo por RCD

Por um lado, o solo foi parcialmente substituído por um RCD mais poroso. Por outro lado, os BTC com incorporação de RCD atingiram maior grau de compactação (secção 3.1). A conjugação destes fatores resultou em variações desprezáveis de massa volúmica seca e porosidade total (Quadro 1). No entanto, conforme referido, a condutibilidade térmica também é influenciada por outros aspetos como a composição mineralógica e a distribuição da porosidade. Neste caso, para porosidade total semelhante a ligeiramente superior, os BTC com RCD exibiram uma distribuição de porosidade diferente, sendo compostos por agregados porosos dispersos numa matriz ligeiramente mais densa do que os BTC sem RCD. De facto, a variação de distribuição de porosidade introduzida pela substituição de parte do solo por RCD, afeta o comportamento do fluxo de calor. As partículas de solo densas foram parcialmente substituídas por partículas de RCD porosos, que têm menor condutibilidade térmica do que a matriz de solo (Figura 7). Desta forma, ao contrário de um sistema com apenas solo, em que o fluxo de calor atravessa preferencialmente as partículas de solo densas, num sistema com solo e RCD, o fluxo de calor tende a contornar a partículas porosas de RCD, atravessando a matriz de solo (Real et al., 2021b). Assim, embora a matriz de solo tenha sido ligeiramente mais densa nos BTC com RCD (secção 3.1), a sua condutibilidade térmica foi inferior à dos sem RCD (Figura 6). Por outras palavras, a incorporação de RCD alterou a progressão do fluxo de calor,

tendo influenciado a condutibilidade térmica global além da variação da porosidade total. De facto, a substituição de solo por RCD leva à redução da quantidade de pontos de contacto entre partículas de solo, reduzindo a condutibilidade térmica (Mansour et al., 2016).

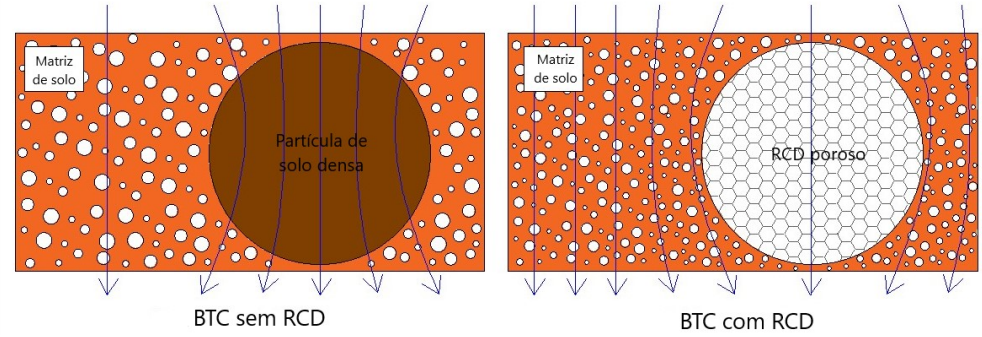


Figura 7 – Representação esquemática da distribuição de fluxo de calor em BTC sem RCD (esquerda) e com substituição de solo por RCD (direita)

4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo caracterizar o comportamento térmico de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado e com incorporação de resíduos de construção e demolição.

A condutibilidade térmica dos BTC foi essencialmente influenciada pela sua porosidade total, e com menor relevância, pela sua distribuição de porosidade, em vez da sua composição. Devido à sua menor massa volúmica e maior porosidade total, os BTC com CRP apresentaram melhores condutibilidades térmicas do que os BTC com CEM, mantendo, contudo, um desempenho mecânico adequado. Além disso, para a mesma porosidade total, os BTC com porosidade mais refinada apresentaram uma condutibilidade térmica ligeiramente menor, devido à sua estrutura mais homogénea, que resultou em menores desvios de fluxo de calor. Assim, mesmo para porosidade total e resistência à compressão semelhante, a substituição de CEM por CRP ou incorporação de RCD teve tendência para melhorar o desempenho térmico dos BTC.

Em suma, os resultados demonstram os benefícios da incorporação de CRP e RCD para o desempenho térmico dos BTC, conduzindo a soluções mais eco-eficientes.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS através do projeto UIDB/ 04625/2020, bem como a colaboração da SECIL e da Vimajas, pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo. O terceiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

Adam, E., Jones, P., 1995. Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. Build. Environ.

30, 245–253. https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00041-P

ASTM D5334, 2014. Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. American Society for Testing & Materials (ASTM).

ASTM D5930, 2009. Thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique. American Society for Testing & Materials (ASTM).

ASTM D698, 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). American Society for Testing & Materials (ASTM).

Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J., Guedes, M., 2022. Hydration and phase development of recycled cement. Cem. Concr. Compos. 127, 104405. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405

Bogas, J., Real, S., Cruz, R., Azevedo, B., 2023. Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. J. Build. Eng. 79. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107892

Bogas, J., Silva, M., Gomes, M., 2019. Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. Int. J. Archit. Herit. 13, 569–584. https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891

Carriço, A., Bogas, J., Real, S., Pereira, M., 2022. Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. Constr. Build. Mater. 333, 127392. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392

E 239, 1970. Soils. Grain-size analysis by wet sieving. Laboratório de engenharia civil (LNEC).

EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption. European Committee for standardization (CEN).

EN 772-11, 2011. Methods of test for masonry units. Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry un. European Committee for standardization (CEN).

EN 772-13, 2000. Methods of test for masonry units. Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone). European Committee for standardization (CEN).

Gomes, M., Bogas, J., Real, S., Moret Rodrigues, A., Machete, R., 2023. Thermal Performance Assessment of Lightweight Aggregate Concrete by Different Test Methods. Sustain. 15. https://doi.org/10.3390/su151411105

Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. Build. Environ. 44, 1935–1942. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007

HB 195, 2012. The australian earth building handbook. Standards Australia.

ISO/FDIS 10456, 2007. Building materials and products – hygrothermal properties – tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. International Standards Orgatization (ISO).

Lowell, S., Shields, J., Thomas, M., Thommes, M., 2005. Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size, and density. Choice Rev. Online 42, 42–5288. https://doi.org/10.5860/CHOICE.42-5288

Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A., Jabrallah, S., 2016. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). Constr. Build. Mater. 104, 44–51. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024

Narayanaswamy, A., Walker, P., Venkatarama Reddy, B., Heath, A., Maskell, D., 2020. Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. Constr. Build. Mater. 243, 118096. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118096

NBR 8492, 2012. Soil-cement brick. Dimensional analysis, compressive strength and water absorption. Test method. Associação brasileira de normas técnicas (ABNT).

NP 143, 1969. Soils. Determination of consistency limits. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

NP 83, 1965. Soils. Determination of particle density. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

Ouedraogo, K., Aubert, J., Tribout, C., Escadeillas, G., 2020. Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? Constr. Build. Mater. 236, 117578. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578

Real, S., Bogas, J., Carriço, A., Hu, S., 2021a. Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. Appl. Sci. 11, 2454. https://doi.org/10.3390/app11062454

Real, S., Bogas, J., Gomes, M., Ferrer, B., 2015. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. Mag. Concr. Res. 68, 798–808. https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424

Real, S., Maia, C., Bogas, J., Gomes, M., 2021b. Thermal conductivity modelling of structural lightweight aggregate concrete. Mag. Concr. Res. 73, 798–809. https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00320

Rigassi, V., 1985. Compressed earth blocks : Manual of production. Vol. I. Eschborn, Germany: CRAterre-EAG.

Saidi, M., Soukaina, A., Zeghmati, B., Sediki, E., 2018. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. Constr. Build. Mater. 167, 566–577. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063

Wu, J., Deng, Z., Deng, Y., Zhou, A., Zhang, Y., 2022. Interaction between cement clinker constituents and clay minerals and their influence on the strength of cement-based stabilized soft clay. Can. Geotech. J. 59, 889–900. https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0194

XP P 13-901, 2001. Compressed earth blocks for walls and partitions. Definitions. Specifications. Tset methods. Delivery acceptance conditions. Association Française de Normalisation (AFNOR).

Zhang, L., Gustavsen, A., Jelle, B., Yang, L., Gao, T., Wang, Y., 2017. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. Constr. Build. Mater. 151, 504–511. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047

Zhang, L., Yang, L., Jelle, B., Wang, Y., Gustavsen, A., 2018. Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. Constr. Build. Mater. 162, 576–583. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ISOLAMENTO TÉRMICO NATURAL: MÉDULA DE MONTANOA QUADRANGULARIS SHULTZ BIP

G. JIMÉNEZ-OBANDO[a], R.A. TOLOSA-CORREA[a-c], J.S. ARCILA HENAO[b], S. MONTOYA BARRETO[b]

[a]Escuela de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 27 # 64-60, Manizales, Colombia, gjimenezob@unal.edu.co

[b]Universidad de Caldas, Calle 65 # 26-10, Manizales, Colombia, juan.arcila@ucaldas.edu.co, sandra.montoya@ucaldas.edu.co

[c]Grupo de Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 27 # 64-60, Manizales, Colombia, ratolosac@unal.edu.co

RESUMO

El nome científico é Montanoa quadrangularis Schultz Bipontianus in K. Koch, conhecido na Colômbia como arboloco, anime, koya, pauche, jiquimilla ou escorzonera. O arboloco é uma espécie endêmica da região dos Andes colombo-venezuelanos (Álvarez Mejía, 2006) (Naranjo, 2013). Uma vantagem do aproveitamento do arboloco é que após cada corte, continua gerando caules da mesma cepa cortada, o que torna desnecessário o cultivo desta espécie para sua exploração, contribuindo para a sustentabilidade do material. Os troncos jovens são compostos por medula rodeada por uma fina parede cortical. Sua medula tem uma aparência semelhante ao poliestireno expandido, razão pela qual em algumas regiões da Colômbia é conhecida como isolamento térmico natural (Álvarez Mejía, 2006). A densidade deste material é de 0.034 g/cm³, uma porcentagem de absorção de água de 425.17%, uma condutividade térmica em estado anidro de 0.044 W/mK e uma alta resistência a meios ácidos e alcalinos. Na presente pesquisa foi realizada a análise da microestrutura, composição do material mediante microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier, microscopia confocal, termogravimetria diferencial de varredura e difração de raios X, além da análise de durabilidade em ambientes ácidos e alcalinos, juntamente com outras propriedades físicas e térmicas. Finalmente, foi comparado com outros materiais de origem natural e artificial, para validar seu potencial como isolante térmico na construção.

Palavras-chave: Materiais sustentáveis, isolamento térmico, montanoa quadrangularis Schultz Bip, arboloco, pauche.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis e respeitosas com o meio ambiente. Dentro desse contexto, os materiais de construção não foram exceção, destacando um interesse renovado em alternativas naturais para o isolamento térmico. Uma dessas alternativas promissoras é a medula de Montanoa quadrangularis Shultz Bip (MQSB), uma árvore nativa das regiões tropicais e subtropicais da Colômbia e Venezuela.

O MQSB pertence à família *Asteraceae*, ordem *Asterales*, classe *Dicotyledonae*, subdivisão *Angiospermae*, e divisão *Magnoliophyta*. Comumente conhecido como arboloco, anime, koya, pauche, jiquimilla ou escorzonera (Álvarez Mejía, 2006), esta árvore é uma espécie fundamental na regeneração de ecossistemas afetados por processos erosivos, especialmente em áreas de média montanha (Science, 2006). Seu nome científico completo é *Montanoa quadrangularis Schultz Bipontianus in K. Koch* (Álvarez Mejía, 2006).

MQSB cresce tipicamente a altitudes entre 1400 e 2500 metros acima do nível do mar, alcançando alturas de até 20 metros, embora a maioria dos indivíduos se encontre entre 5 e 15 metros. Como mostrado na figura 1, sua copa é rala com ramificações que emergem desde a parte inferior do tronco (Álvarez Mejía, 2006). Nos Andes venezuelanos, foram reportados indivíduos desde 1200 metros acima do nível do mar, sendo mais prolífico nas florestas úmidas premontanas e montanas (Gutiérrez & Gaviria R., 2009).

A medula do MQSB é particularmente interessante por sua estrutura e propriedades. Os troncos jovens são formados por medula rodeada por uma fina parede cortical. À medida que a árvore cresce e seu tronco ganha altura e diâmetro, a parede cortical se transforma em madeira e a medula diminui até quase desaparecer (Álvarez Mejía, 2006). Como pode ser visto na figura 2, a medula do MQSB se assemelha ao poliestireno expandido (EPS), o que levou a que em algumas regiões da Colômbia ela seja chamada de “icopor” (nome utilizado na Colômbia para o EPS) natural.

Figura 1 – MQSB jovem

Figura 2 – Medula sem córtex

O MQSB também é valioso por sua capacidade de regenerar caules da mesma cepa cortada, o que significa que não é necessário replantar a árvore para continuar aproveitando seus recursos. Isso não só facilita sua exploração, mas também contribui para a sustentabilidade do material.

O objetivo da presente pesquisa é explorar o potencial que a medula do MQSB tem como uma alternativa sustentável e ecologicamente responsável para o isolamento térmico na construção, aproveitando suas propriedades únicas e contribuindo para a regeneração de ecossistemas e para o desenvolvimento sustentável das comunidades locais onde está árvore é endêmica.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MICROESTRUTURA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (SEM) E CONFOCAL

As micrografias foram tiradas com um microscópio eletrônico TESCAN VEGA 3 SBU e com um microscópio confocal de varredura a laser Olympus FV1000 de alta gama. As amostras foram de um cm^3 e, para a SEM, foram recobertas com grafite.

2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (XRD)

Os padrões de difração de raios X (XRD) das amostras foram realizados à temperatura ambiente, usando um difratômetro Rigaku MiniFlex II equipado com uma fonte de radiação de Cu Kα (λ=1.540562 Å) a 30 kV e 15 mA, em modo contínuo. Os dados foram coletados em intervalos 2Θ de 3 a 70° com uma velocidade de varredura de 5°/min, uma largura de amostragem de 0.02° e uma resolução de 0.01. Foram utilizados 15 mg da amostra, a qual foi previamente pulverizada.

2.3 TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (TGA)

A análise foi realizada em um Analisador Termogravimétrico TA Instruments Q50/500, com 10 mg de amostra usando um algoritmo de alta definição (sensibilidade 1; resolução 5) para as análises em fluxo de N2 (100 ml/min) e a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O intervalo de medição foi desde a temperatura ambiente até 800°C.

2.4 DENSIDADE

Esta característica física foi medida sob os parâmetros da norma ASTM D3575-20 (ASTM International, 2020). O tamanho médio da amostra foi de 4.56 cm de diâmetro e 1.25 cm de altura para um volume médio de 20.48 cm^3, superando o volume mínimo recomendado pela norma que é de 16.4 cm^3. Todas as amostras (30 unidades) foram medidas com um paquímetro digital com precisão de um milésimo de centímetro e pesadas em uma balança com precisão de dez milésimos de grama. A altura foi medida em cada amostra em quatro pontos correspondentes a cada quadrante do círculo. Finalmente, foram pesadas em estado anidro após permanecer a 50ºC em uma estufa, até atingir peso constante após três medidas.

2.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Esta característica física foi medida sob os parâmetros da norma ASTM D570-22 (ASTM International, 2022a). O tamanho médio das amostras foi de 4.55 cm de diâmetro e 1.27 cm de altura. Todas as amostras (30 unidades) foram pesadas em estado anidro (peso condicionado) em uma balança com precisão de um milésimo de grama, após terem permanecido por 24 horas a 50°C em uma estufa. Em seguida, foram saturadas com água destilada por outras 24 horas. Devido à baixa densidade do material, as amostras foram forçadas a permanecer em imersão com a ajuda de uma malha e bolinhas de vidro, garantindo o contato com a água em toda a sua superfície. Terminado o tempo de imersão, estas foram secas superficialmente e pesadas novamente. Posteriormente, foram pesadas pela

terceira vez em estado anidro (peso recondicionado), após permanecerem 24 horas a 50°C em uma estufa, com o objetivo de identificar material solúvel e/ou impurezas como pós adquiridos durante o processo de usinagem das amostras.

O cálculo do incremento de peso e da perda de material solúvel foi realizado com as seguintes equações:

$$incremento\ de\ peso, \% = \frac{peso\ húmedo - peso\ acondicionado}{peso\ acondicionado} x100 \quad \text{Equação 1}$$

$$pérdida\ material\ soluble, \% = \frac{peso\ acondicionado - peso\ reacondicionado}{peso\ acondicionado} x100 \quad \text{Equação 2}$$

2.6 DURABILIDADE EM MEIO ÁCIDO E ALCALINO COM ESPECTROSCOPIA INFRAVERMELHA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As análises de espectroscopia vibracional foram realizadas em um equipamento PERKIN ELMER SPECTRUM BX FT-IR usando um detector DTGS, em um intervalo de 4000-400 cm^{-1}. As amostras foram analisadas em modo de transmitância, utilizando uma amostra de controle e as outras duas após uma exposição de três anos em uma solução composta por água destilada e H_2SO_4 até que se alcançasse um pH de 1, e outra em uma solução de água destilada e NaOH com um pH de 13.

2.7 PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas avaliadas foram condutividade e difusividade térmica e calor específico, registradas com um equipamento ISOMET 2114, de acordo com o estabelecido na norma ASTM-D5334 (ASTM International, 2022b) A sonda de agulha foi introduzida em cada uma das amostras cilíndricas (47 unidades) de, no mínimo, 15 cm de comprimento, e suficientemente espessas de maneira que o material ao seu redor fosse de pelo menos 20 mm. As amostras foram secas em forno a uma temperatura de 50°C até atingir peso constante após três medidas. Em seguida, foram envolvidas com uma lâmina ultrafina de polietileno de baixa densidade, a fim de garantir seu estado anidro. As amostras, uma vez secas e envolvidas, foram deixadas em repouso por 48 horas à temperatura ambiente (22°C ± 1°C) antes de sua medição térmica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MICROESTRUTURA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E CONFOCAL

A figura 3 mostra uma micrografia eletrônica de varredura (SEM) que revela a estrutura interna da medula do MQSB, bastante similar em sua microestrutura ao cortiça, como pode ser observado na figura 5. O que salta à vista é uma conformação celular esponjosa e porosa, evidência das propriedades físicas inerentes a esse tipo de material. As imagens 3 y 4 revelam células vegetais de paredes finas, com dimensões e silhuetas diversas que apesar de sua variabilidade, tendem a um arranjo geométrico

que alterna entre hexágonos y pentágonos, refletindo um padrão de crescimento estruturado y ordenado.

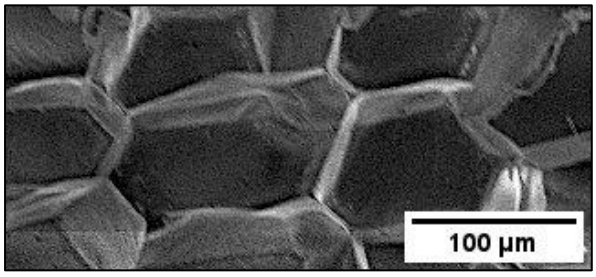


Figura 3 – Micrografia SEM de MQSB

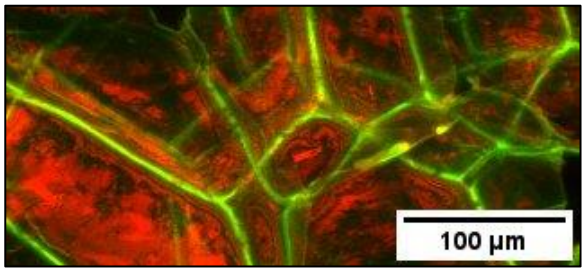


Figura 4 – Micrografia Confocal de MQSB

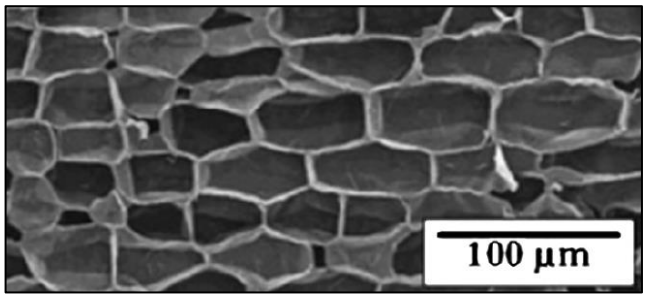


Figura 5 – Cortiça, seção tangencial (Brás et al., 2013)

Na Figura 4, obtida por meio de microscopia confocal, a estrutura das células se destaca de forma muito mais marcada, exibindo com grande clareza a rede tridimensional que compõem. Esta nitidez se deve à capacidade do microscópio confocal de focar em diferentes níveis de profundidade, permitindo uma apreciação mais completa e detalhada do emaranhado celular. Essas células, dispostas em uma formação compacta, delineiam espaços vazios que confirmam a presença de ar intracelular, uma particularidade que contribui significativamente para a leveza e o potencial isolante térmico da medula de MQSB.

3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (XRD)

A Figura 6 exibe um padrão de difração de raios X onde se distinguem dois picos principais a 2Θ, um a 15° e outro a 22,08°. O pico situado a 15° 2Θ mostra uma distância interplanar de 5,9014 Å com uma intensidade de 1368 cps, constituindo o primeiro pico relevante no espectro. Este pico é indicativo de planos semicristalinos associados com a celulose. m materiais com alto conteúdo de celulose, como o linho e o algodão, podem ser identificados dois picos de difração próximos ao ângulo de 16° 2Θ. No entanto, quando a amostra contém uma quantidade significativa de componentes amorfos, tais como a hemicelulose e a celulose amorfa, como é comum nas fibras de madeira, esses dois picos tendem a se fundir em um mais largo (Tserki et al., 2005), evidência que se observa na medula de MQSB. O segundo pico, localizado a 22,08° 2Θ, é o de maior altura, com uma distância interplanar de 4,0225 Å e uma intensidade de 1690 cps. Este pico sugere uma região semicristalina na amostra e está associado com celulose cristalina, um componente estrutural que configura as plantas.

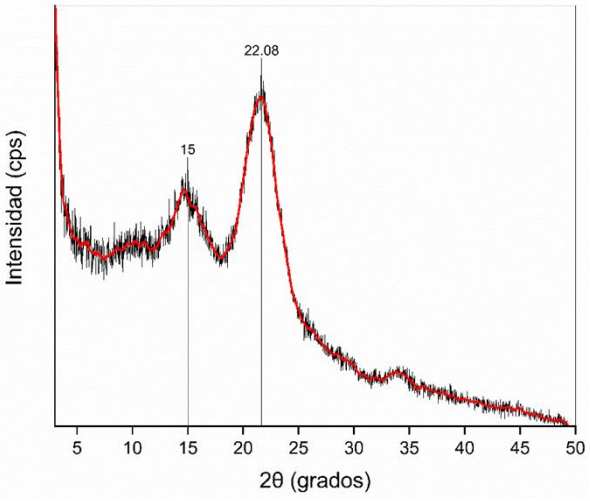


Figura 6 – XRD de MQSB

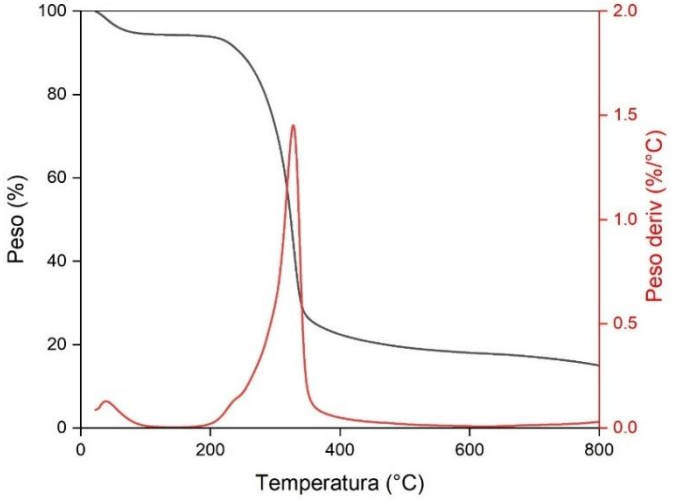


Figura 7 – TGA de MQSB

3.3 TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (TGA)

A Figura 7 ilustra o perfil termogravimétrico da amostra de medula de MQSB, onde se observa uma perda de peso inicial de 5,542%, iniciando a degradação térmica perto de 200°C. Este limiar de temperatura corresponde ao início da decomposição da lignina, um achado coerente com os dados reportados na literatura (Wielage et al., 1999). A degradação prossegue até os 573,25°C, momento em que a amostra experimenta uma redução massiva de peso de 76,13%, deixando um resíduo final de 15,15%.

Este comportamento na decomposição térmica da medula de MQSB é comparável ao de outros materiais vegetais, como a fibra de *guadua angustifolia Kunth* (Tolosa et al., 2014) , mas difere de outras fibras cujos processos de degradação começam a temperaturas superiores, por volta de 240°C (Mohanty et al., 2001) (John & Anandjiwala, 2008) (Satyanarayana et al., 2009). Em contraste, a cortiça natural mostra uma resistência térmica ligeiramente maior, iniciando sua degradação a 282°C e concluindo a 485°C (Menager et al., 2019).

Os resultados termogravimétricos indicam que a medula de MQSB começa a degradar-se a uma temperatura comparável com outros materiais lignocelulósicos, embora com algumas diferenças específicas. A temperatura de início da decomposição sugere que a medula de MQSB poderia ser adequada para aplicações em ambientes onde as temperaturas não excedam 137,61°C, que é quando inicia a perda de água. Por exemplo, poderia ser utilizada na fabricação de componentes isolantes ou materiais de construção que requerem certa resistência térmica, mas sempre mantendo a operação abaixo do limiar de degradação para assegurar a integridade e a durabilidade do material.

3.4 DENSIDADE

A medula de MQSB apresenta uma baixa densidade de 0,034 g/cm³, com um desvio padrão de 0,0059 e um coeficiente de variação de 17,26%. Esta medida mostra uma variabilidade considerável em comparação com os valores relatados anteriormente por Álvarez Mejía (2006), que registrou uma densidade de 0,05 g/cm³, 32% maior do que o determinado neste estudo.

Ao posicionar a medula de MQSB no contexto de outros materiais naturais leves, como o ráquis do milho, com densidades que variam entre 0,3 e 0,33 g/cm³ (Pinto et al., 2011), a cortiça, com um intervalo de 0,12 a 0,18 g/cm³ (Pisello et al., 2016), e a madeira de Ochroma pyramidale, conhecida como madeira de balsa, com uma densidade de 0,1 a 0,25 g/cm³ (Borrega & Gibson, 2015), a medula de MQSB se posiciona como um dos materiais mais leves entre os derivados de recursos renováveis. Sua densidade se aproxima até mesmo da de alguns materiais sintéticos de baixo peso, como o poliestireno expandido (0,010-0,025 g/cm³), a espuma de poliuretano (0,032-0,070 g/cm³) e a lã de vidro (0.012-0.11 g/cm^3) (Neila González, 2004), que provêm de fontes não renováveis.

3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A medula de MQSB exibe uma marcada tendência a absorver água, evidenciada por uma absorção de 425,17%, com um desvio padrão de 1,16% e um coeficiente de variação de 27,28%. Além disso, mostrou uma perda de material solúvel de 1,94%, embora com uma alta variabilidade refletida em um percentual de desvio de 88,11%. Esta propensão à absorção de água é consideravelmente mais alta em comparação com materiais como a cortiça, que tem uma taxa de absorção de apenas 9,2% (Gonçalves & Fernanda, 2015). É importante mencionar que esses resultados são significativamente diferentes dos informados por Álvarez Mejía (2006), que reportou uma taxa de absorção de água de 2,15%.

3.6 DURABILIDADE EM MEIO ÁCIDO E ALCALINO COM ESPECTROSCOPIA INFRAVERMELHA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Foram realizados estudos de durabilidade da medula de MQSB submetendo-a a condições extremas, utilizando amostras frescas (controle) e amostras que estiveram imersas por três anos em meios com pH extremamente ácido (pH 1) e alcalino (pH 13), preparados com ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, respectivamente. As variações das bandas vibracionais foram observadas e analisadas por meio de espectroscopia infravermelha, conforme apresentado na Figura 8.

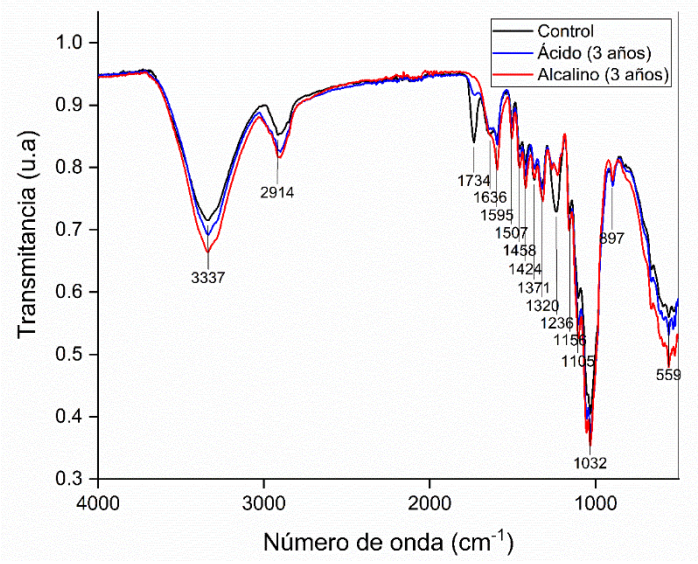


Figura 8 – FTIR de MQSB

As transformações observadas nos picos espectrais sob condições ácidas e alcalinas são as seguintes:

A banda larga em torno de 3400 cm^{-1}, associada a alongamento O-H, característica dos grupos hidroxila presentes na celulose, lignina e outros polissacáridos (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020), exibe um pico marcado e amplo em 3337 cm^{-1}. Detecta-se uma leve mudança na posição e na intensidade, o que pode indicar modificações nas ligações de hidrogênio ou uma diminuição na quantidade de grupos hidroxila. O pico em torno de 2900 cm^{-1}, correspondente ao alongamento C-H de grupos metila e metileno, que são tipicamente encontrados em lipídios e ceras vegetais, assim como na holocelulosa e lignina (de Menezes et al., 2009), mantém-se constante em 2914 cm^{-1}, sugerindo que esses grupos não são significativamente alterados pelo ambiente ácido. Na região de 1750 cm^{-1}, relacionado ao alongamento C-O correspondente à hemicelulose (Pandey & Pitman, 2003), observa-se uma degradação considerável no meio ácido e o desaparecimento no meio alcalino, indicando uma possível ruptura ou modificação nos anéis aromáticos da lignina. O pico próximo a 1650 cm^{-1}, atribuído ao alongamento C=O do grupo funcional amida em proteínas (Kyomugasho et al., 2015), reduz-se e desloca-se levemente, o que pode refletir reações de oxidação ou esterificação devido à exposição prolongada ao ácido. A Região de impressão digital, abaixo de 1500 cm^{-1}, que inclui alongamentos C=C em anéis aromáticos da lignina (Pandey & Pitman, 2003) e alongamentos C-H, C-O, O-H de flexão (Argyropoulos, 2001) (de Menezes et al., 2009) (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020), apresenta mudanças menores em alguns picos, sugerindo alterações leves na estrutura química da celulose e da lignina.

3.7 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A medula de MQSB destaca-se em seu estado anidro por uma condutividade térmica de 0,044 W/mK, com um baixo desvio de 0,003 e um percentual de variabilidade de 6,62%. Com uma difusividade térmica registrada em 0,47 x 10^{-6} m^2/s e um calor específico de 2787,75 J/kg K, a medula de MQSB apresenta uma divergência em relação aos valores relatados por Álvarez Mejía (2006), que reportou uma condutividade de 0,1 W/mK. (2006).

Ao comparar a medula de MQSB com outros materiais naturais ou sintéticos, como se observa no quadro 1, sua condutividade térmica é comparável à das fibras de madeira e da cortiça, e se encontra dentro do intervalo da lã de ovelha e das fibras das folhas de abacaxi. Embora alguns materiais sintéticos como o poliestireno expandido e extrudado, a espuma de poliuretano e a lã de vidro apresentem uma condutividade térmica ligeiramente mais baixa, a medula de MQSB mantém-se competitiva em seu desempenho térmico. Além disso, seu calor específico é superior ao de muitos outros materiais, como a lã mineral, o poliuretano e a lã de vidro, indicando sua capacidade para armazenar energia térmica.

A difusividade térmica da medula de MQSB alinha-se mais com a dos materiais sintéticos, demonstrando uma rápida resposta às mudanças de temperatura. No entanto, é crucial destacar que, enquanto os materiais de origem vegetal comumente requerem processos industriais que consomem energia para serem convertidos em isolantes térmicos, a medula de MQSB oferece a vantagem de poder ser utilizada em seu estado natural com mínima transformação, representando uma economia energética considerável e um impacto ambiental reduzido.

Quadro 1 – Comparação de propriedades térmicas de diferentes materiais de origem renovável e não renovável. (1) (Neila González, 2004), (2) (Al-Ajlan, 2006), (3) (Tangjuank, 2011), (4) (Cherki et al., 2014), (5) (Schiavoni et al., 2016), (6) (Dickson & Pavía, 2021), (7) (Wi et al., 2021), (8) (Ajabli et al., 2023)

Materiais	**Condutividade térmica (W/m K)**	**Difusividade térmica (x 10^{-6} m^2/s)**	**Calor específico (J/kg K)**
Médula MQSB (presente estudo)	0.044	0.47	2787.75
Cortiça (4, 5)	0.037-0.050	-	1524.5
Espuma poliuretano (1, 2, 7)	0.020-0.023	0.41-0.51	-
Fibra celulose (6)	0.039	-	2150
Fibra folha de abacaxi (3, 8)	0.035-0.042	-	1000
Fibra madeira (1, 5)	0.038-0.050	0.09-0.12	-
Lana ovelha (1, 5, 6)	0.034-0.054	0.24	1700
Lana vidro (1, 6, 7)	0.034-0.037	0.36-3.88	1030
Poliestireno expandido (1, 8)	0.031-0.038	0.97-3.24	1250
Poliestireno extrudido (1, 7, 8)	0.025-0.028	0.045-0.99	1450-1700

4 CONCLUSÕES

A pesquisa sobre a medula de MQSB destaca suas propriedades únicas e o potencial deste elemento vegetal. Entre elas estão:

- ***Leveza e baixa densidade:*** A densidade da medula é de aproximadamente 0,034 g/cm³, que é baixa em comparação com outros materiais leves como a madeira de balsa e a cortiça. Essa característica a torna ideal para aplicações no setor da construção, onde a redução de peso resulta em uma melhoria significativa na eficiência energética global, devido à diminuição da quantidade de material necessário por unidade de volume, comparando-a com outros materiais similares.
- ***Propriedades térmicas favoráveis:*** A medula possui propriedades térmicas comparáveis às de outros materiais vegetais e alguns sintéticos. Sua condutividade térmica está no intervalo de fibras de madeira e cortiça, e seu calor específico é consideravelmente alto, o que implica uma boa capacidade de armazenar calor. Essas características sugerem que a medula de MQSB pode ser eficaz como isolante térmico.
- ***Sustentabilidade:*** Proveniente de um recurso renovável e com a possibilidade de ser utilizada quase em seu estado natural, a medula oferece vantagens ambientais significativas em relação a materiais sintéticos que requerem processos de fabricação intensivos em energia, favorecendo a economia circular e possibilitando a inclusão de comunidades vulneráveis em seu ciclo de produção e manufatura.

- ***Compatibilidade com o ambiente circundante:*** A característica evidenciada na presente pesquisa determinou que a medula possui alta resistência a ambientes ácidos e alcalinos, permitindo sua utilização na conformação de diferentes tipos de compostos, especialmente em aplicações em ambientes agressivos ou com limitações derivadas do ambiente circundante. Sua estabilidade diante de agentes agressivos abre um caminho interessante, que deve ser analisado e estudado mais profundamente.

Por outro lado, entre os desafios e perspectivas para trabalhos futuros estão**:**

- ***Melhoria da Resistência à Água:*** O alto percentual de absorção de água representa o principal desafio para sua utilização. Pesquisas futuras poderiam se concentrar no desenvolvimento de revestimentos ou tratamentos hidrofóbicos que reduzam essa absorção sem comprometer a leveza e as propriedades isolantes do material.
- ***Aumento da Resistência Térmica:*** Dado o seu ponto de degradação térmica, pode-se explorar a possibilidade de melhorar esta propriedade por meio da combinação com outros materiais ou do desenvolvimento de compósitos híbridos que ampliem sua resistência ao calor***.***
- ***Otimização do Processamento:*** Seria benéfico desenvolver processos de fabricação que mantenham a baixa pegada de carbono do material e, ao mesmo tempo, permitam uma produção padronizada e de alta qualidade.
- ***Aplicações em Compósitos:*** A medula de MQSB pode ser explorada como componente em compósitos, particularmente em combinação com resinas ou polímeros que melhorem sua resistência à umidade e à temperatura.
- ***Análise de Ciclo de Vida:*** Estudos adicionais devem considerar a análise do ciclo de vida completo da medula de MQSB para compreender melhor seu impacto ambiental ao longo de seu uso, desde a produção até a disposição final. O que é claro é que este material contribui significativamente para uma economia circular com baixa pegada de carbono, aspectos relevantes como soluções para o aquecimento global.

5 AGRADECIMENTOS

O presente estudo contou com o apoio dos laboratórios de materiais, polímeros e materiais compósitos, materiais nanoestruturados e funcionais, processos produtivos e laboratório de orgânica da Universidade Nacional da Colômbia, Sede Manizales. Além disso, contou com recursos do projeto HERMES No 57919 em convênio com a Universidade de Caldas, “Desenvolvimento de biomateriais de construção utilizando os fungos de decomposição branca Ganoderma lucidum e Pleurotus ostreatus com resíduos lignocelulósicos por meio de fermentação em estado sólido”.

REFERÊNCIAS

Ajabli, H., Zoubir, A., Elotmani, R., Louzazni, M., Kandoussi, K., & Daya, A. (2023). Review on Eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 185). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113609

Al-Ajlan, S. (2006). Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering*, *26*, 2184–2191. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.006

Álvarez Mejía, L. M. (2006). *Biología, uso y manejo del arboloco (Montanoa quadrangularis)*. Editorial Universidad de Caldas.

Argyropoulos, D. S. (2001). Wood and Cellulosic Chemistry. Second Edition, Revised and Expanded Edited by David N.-S. Hon (Clemson University) and Nubuo Shiraishi (Kyoto University). Marcel Dekker: New York and Basel. 2001. vii + 914 pp. $250.00. ISBN 0-8247-0024-4. *Journal of the American Chemical Society*, *123*(36), 8880–8881. https://doi.org/10.1021/ja015237p

ASTM International. (2020). *ASTM D3575-20 Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers*. *15*(November 2020), 1–11. https://doi.org/10.1520/D3575-20.2

ASTM International. (2022a). ASTM D570 Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. *ASTM Standards*, 4. https://doi.org/10.1520/D0570-22.2

ASTM International. (2022b). *ASTM D5334-22 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. 10. https://doi.org/10.1520/D5334-22A.2

Brás, A., Leal, M., & Faria, P. (2013). Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*, *49*, 315–327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006

Cherki, A., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y., & Baillis, D. (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. *Construction and Building Materials*, *54*, 202–209.

de Menezes, A. J., Pasquini, D., Curvelo, A. A. da S., & Gandini, A. (2009). Self-reinforced composites obtained by the partial oxypropylation of cellulose fibers. 1. Characterization of the materials obtained with different types of fibers. *Carbohydrate Polymers*, *76*(3), 437–442. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.006

Dickson, T., & Pavía, S. (2021). Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *140*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752

Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. In *Journal of Materials Science* (Vol. 55, Issue 3). Springer US. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y

Gonçalves, M. C., & Fernanda, M. (2015). Materials for construction and civil engineering: Science, processing, and design. In *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3

John, M., & Anandjiwala, R. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, *29*, 187–207. https://doi.org/10.1002/pc.20461

Kyomugasho, C., Christiaens, S., Shpigelman, A., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. (2015). FT-IR spectroscopy, a reliable method for routine analysis of the degree of methylesterification of pectin in different fruit- and vegetable-based matrices. *Food Chemistry*, *176*, 82–90. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.033

Menager, C., Guigo, N., Wu, X., Vincent, L., & Sbirrazzuoli, N. (2019). “Green” composites prepared from polyfurfuryl alcohol and cork residues: Thermal and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *124*. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105473

Mohanty, A., Misra, M., & Drzal, L. (2001). Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. *Composite Interfaces - COMPOS INTERFACE*, *8*, 313–343. https://doi.org/10.1163/156855401753255422

Naranjo, M. E. (2013). *Impacto de la fragmentación de la selva nublada y su reemplazo por pasturas sobre su estructura y ecohidrología en los andes venezolanos (Tesis doctoral)*. Universidad de los Andes (República Bolivariana de Venezuela).

Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Editorial Munilla-Lería.

Pandey, K. K., & Pitman, A. J. (2003). FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *52*(3), 151–160. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00052-0

Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Pignatta, G., Cotana, F., & Santamouris, M. (2016). Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation. *Energy and Buildings*, *114*, 180–190. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.026

Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. *Progress in Polymer Science*, *34*(9), 982–1021. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002

Schiavoni, S., F.D'Alessandro, Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 988–1011.

Tangjuank, S. (2011). Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(19), 4528 – 4532. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80053090933&partnerID=40&md5=f6bb92401b1dc55ca8f6455729eac86d

Tolosa, R. A., Jimenez-Obando, G., Arias, N. P., Cardona, C. A., Giraldo, O., Tolosa, R. A., Arias, N. P., Cardona, C. A., & Giraldo, O. (2014). Cementicious materials reinforcement using angustifolia kunth bamboo fiber covered with nanostructured manganese oxidex. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *53*(20), 8452–8463. https://doi.org/10.1021/ie403958y

Tserki, V., Zafeiropoulos, N. E., Simon, F., & Panayiotou, C. (2005). A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *36*(8), 1110–1118. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.004

Wi, S., Park, J. H., Kim, Y. U., Yang, S., & Kim, S. (2021). Thermal, hygric, and environmental performance evaluation of thermal insulation materials for their sustainable utilization in buildings. *Environmental Pollution*, *272*, 116033. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116033

Wielage, B., Lampke, Th., Marx, G., Nestler, K., & Starke, D. (1999). Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene. *Thermochimica Acta*, *337*(1), 169–177. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00161-6

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VALORIZAÇÃO DE DRECHE CERVEJEIRA COMO SOLUÇÃO DE BASE NATURAL PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

Tarlattini Stefano[1]; Antunes Vítor[1,2]; Manso Maria[1,2]; Canto João[1,3]; Guerra Cristina[1,4]; Silva Joaquim[1,4]

[1] Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona, Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa, Portugal
[2] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
[3] COPELABS, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal
[4] BioRG - Bioengineering and Sustainability Research Group, Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona, Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa, Portugal
*autor correspondente: vitor.antunes@ulusofona.pt

RESUMO

A dreche cervejeira é o subproduto mais abundante da indústria cervejeira, representando cerca de 85% dos subprodutos totais. Trata-se de um material lenho celulósico rico em proteína e fibra, correspondendo a 20 e 70% da sua composição, respetivamente. Considerando estas propriedades e a experiência já existente na produção de produtos cerâmicos, esta apresenta um potencial de utilização como isolante térmico de edifícios. Em termos da eficiência energética do edificado, Portugal ocupa uma posição crítica entre os países com menos condições económicas para manter habitação devidamente aquecida. Este trabalho tem como objetivo a avaliação do potencial de isolamento térmico de argamassas leves para reboco isolante com aplicação de dreche. Numa primeira fase, procedeu-se à caracterização prévia da dreche com a determinação do seu teor em água, granulometria e massa volúmica. Foram produzidas argamassas com diferentes teores em água. O desempenho das soluções foi avaliado em termos de comportamento mecânico, nomeadamente, resistência à compressão e flexão, após vários períodos de cura por via seca. Os resultados foram comparados com argamassa de referência. A dreche apresentou um perfil de utilização bastante competitivo quando comparado com materiais comerciais convencionais amplamente utilizados, apresentando vantagens a nível do isolamento térmico, pela estrutura porosa e baixa condutividade térmica.

Palavras-chave: Dreche cervejeira, eficiência energética, isolamento térmico, reboco isolante

1 INTRODUÇÃO

Portugal ocupa um lugar crítico entre os países onde as pessoas dispõem de menores recursos económicos, para fazer face aos custos de climatização das suas habitações, de modo a assegurar as devidas condições básicas de conforto (Eurostat, 2020). Este problema terá uma tendência crescente, uma vez que se espera o aumento de 1,5 a 2 °C das temperaturas médias, de acordo com o relatório do Intergovernamental Panel on Climate Change (IPPC, 2018).

O tema da pobreza energética e eficiência energética no setor da construção trata-se um assunto de particular relevo na Comissão Europeia conformidade com as diretivas 2009/72/CE, 2009/73/CE e a Diretiva da Eficiência Energética 2018/2002. A redução do consumo de energia por via do aumento da eficiência energética em edifícios, transportes, indústria e serviços públicos é um imperativo da Diretiva da Eficiência Energética 2018/2002, que visa a redução de custos para consumidores e empresas, bem como a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de gases com efeito de estufa.

A utilização de medidas passivas, como é o caso da utilização de isolamento térmico, apresenta um papel fundamental na melhoria da eficiência energética dos edifícios. Materiais como a lã de vidro e de rocha, poliestireno expandido (EPS) e extrudido (XPS), poliuretano (PU) e aglomerado negro de cortiça (ICB), têm sido utilizados com esse fim. Apesar das suas propriedades isolantes, materiais como: a lã de vidro e de rocha, podem apresentar limitações a nível da segurança, podendo conduzir a irritações e problemas respiratórios; poliestireno e o poliuretano, podem levar à emissão de gases tóxicos e exibir inflamabilidade; aglomerado negro de cortiça embora de elevado custo, oferece benefícios importantes de sustentabilidade e eficiência energética; celulose, proveniente de papel reciclado e, portanto, interessante do ponto de vista de sustentabilidade, não apresenta propriedades isolantes tão competitivas quanto os produtos anteriormente referidos. Painéis de fibra de madeira de média densidade, com base em fibras de madeira e resinas, estão sujeitos a danos causados por insetos, roedores ou humidade, tal como a celulose; por outro lado, painéis de gesso cartonado, provenientes de gesso e cartão, são igualmente sensíveis à humidade.

A dreche trata-se de um subproduto da indústria cervejeira obtido na etapa de filtração do mosto. O mosto filtrado, por sua vez, é utilizado mais tarde na fermentação, para obtenção da cerveja final (Horne et al., 2021; Olajire, 2020). A dreche é o componente residual que fica retido nos filtros industriais. Do ponto de vista histológico, a dreche contém alguns grãos e a parte insolúvel residual da cevada maltada como a casca, pericarpo e aleurona; em termos de composição química – a dreche é composta, principalmente, por hemicelulose (30,60%), celulose (21,42%), proteínas (20,93%), lignina (11,41%), arabinoxilanas (10, 37%), amido (10,21%), lípidos (8,52%) e pequenas percentagens de cinzas e β-glucanas (Zeko-Pivač et al., 2022).

A estrutura porosa da dreche confere-lhe boas propriedades de retenção de ar, apresentando um potencial significativo como alternativa a outros materiais sustentáveis com propriedades de isolamento em uso na construção civil, como a casca de arroz. Tratando-se de um material renovável e biodegradável, apresenta vantagens face aos materiais sintéticos tradicionais, promovendo a sustentabilidade através da redução do consumo de energia e emissão dos gases de estufa.

Em termos de produção anual de dreche, prevê-se um aumento na Europa, estimando-se um valor de 8,5 milhões de toneladas (Zeko-Pivač et al. 2022). No Quadro 1 apresenta-se a disponibilidade da dreche no território nacional, em comparação com outros materiais, bem como o teor médio de água na sua composição (50 a 80%).

Quadro 1 - Subprodutos agroindustriais de natureza lenho celulósica com maior potencial de valorização (Duarte et al., 2007)

Subproduto	Total nacional (Mg)	Teor em água (%)
Dreche cervejeira	97 536,2	50-80
Bagaço de uva	69 840,0	20
Polpa de alfarroba	40 000,0	10
Casca de arroz	34 535,7	13
Repiso de tomate	30 768,9	70
Bagaço de azeitona	23 745,0	11
Casca de frutos rijos	13 584,0	11
Engaço de uva	9 316,0	20
Borra de vinho	8 992,0	-
Grainha de uva	5 400,0	10

Atualmente, a dreche é reconduzida, sobretudo, para a alimentação de gado (Zeko-Pivač et al. 2022) e, por último, descartada para compostagem. A reutilização deste material pode beneficiar a indústria cervejeira por redução dos custos associados ao seu desperdício, reduzir o impacto ambiental por diminuição do desperdício e assegurar, consequentemente, um efeito positivo na economia circular.

No presente trabalho, apresenta-se um estudo laboratorial sobre a utilização de dreche cervejeira em argamassas cimentícias com propriedades de isolamento térmico, como uma estratégia promotora da valorização deste subproduto industrial, através do prolongamento do seu ciclo de vida útil com potencial benefício da economia circular de materiais.

2 MATERIAIS E METODOLOGIAS DE ENSAIO

2.1 MATERIAIS

A dreche utilizada no presente estudo, conforme apresentado na Figura 1, foi obtida numa unidade de produção de cerveja. Foram cedidas e utilizadas várias amostras de dreche seca e húmida. Este subproduto apresenta na sua composição grãos alongados de diferentes dimensões. Verificou-se que, a dreche húmida apresenta uma tendência para aglomerar, contrariamente à dreche seca.

Figura 1 – Dreche cervejeira húmida (a) e dreche cervejeira seca (b).

Para a produção das argamassas foi utilizado um traço de 1:4, considerando a incorporação de dreche húmida, contendo o Cimento Portland de Calcário CEM II /B-L 32,5 N como ligante. Para a argamassa de referência, foi utilizado como agregado uma areia lavada para betão. Para as argamassas com dreche optou-se pela substituição total do agregado de areia para betão por dreche húmida adicionando 25%, 50% e 75% de água relativamente à quantidade de ligante.

2.2 METODOLOGIAS DE ENSAIO

2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA DRECHE

Em primeiro lugar determinou-se o teor em água da dreche mediante adaptação da norma EN 1097-5 (CEN, 2008). Para tal foram ensaiadas amostras de dreche seca e húmida procedendo à determinação da sua massa inicial e da sua massa final, após o processo de secagem em estufa ventilada a 60 °C, até obtenção de massa constante. Para a análise da dreche húmida foram utilizadas duas amostras distintas dado que as condições de filtração e armazenamento usadas na unidade produtiva podem ser variáveis.

A determinação da granulometria da dreche foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 (CEN, 2014) utilizada para a análise granulométrica de agregado procedendo-se à secagem prévia da dreche em estufa ventilada até massa constante.

A densidade relativa da dreche foi determinada com base na adaptação da norma EN 1097-3 (CEN, 1998). Este estudo baseou-se na análise de 4 amostras: uma de dreche seca em estufa a 60 °C durante 24 h; dreche seca ao ar; dreche húmida fornecida diretamente pela unidade produtiva; e dreche saturada em água durante 2 h. As quatro amostras foram inseridas individualmente no recipiente normalizado com 1 dm^3, no qual foi inserida a dreche. A massa volúmica é dada pelo quociente entre a massa da substância e o seu volume com vazios.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Para analisar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco foi analisada a sua consistência por espalhamento conforme indicado na norma EN 1015-3 (CEN, 2006), avaliando-se a deformação mediante quedas padronizadas da mesa de espalhamento. A medição do espalhamento das argamassas frescas com dreche foi realizada com recurso a uma régua para medição do diâmetro inicial e final em duas direções perpendiculares. Neste caso foram analisadas 3 argamassas com diferentes percentagens de incorporação de água, relativamente à massa de cimento: 25%, 50% e 75%.

O pH foi analisado em 3 argamassas contendo dreche e diferentes percentagens de incorporação de água relativamente à massa de cimento: 25%, 50% e 75%. Foi igualmente analisado o pH da dreche incorporada na argamassa, bem como de uma argamassa de referência. Para estas determinações foi utilizado um aparelho de medição de pH.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS APÓS CURA

As características das argamassas após cura as amostras de argamassa com dreche foram comparadas com uma argamassa de referência com um traço de 1:3 e uma razão água/cimento de 0,5. Neste estudo optou-se por analisar o comportamento mecânico das argamassas e definiu-se uma metodologia para análise da transmissão de calor.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a norma NP EN 1015-11 (CEN, 2019). Foram ensaiados provetes das argamassas com dreche e as 3 diferentes percentagens de água, assim como da argamassa de referência. No Quadro 2 são apresentadas as constituições de cada amassadura para a produção dos provetes prismáticos. Os ensaios foram realizados aos 7, 14, 28, e 60 dias de cura sem recurso a câmara saturada, uma vez que a dreche retém a água durante um longo período de tempo na argamassa.

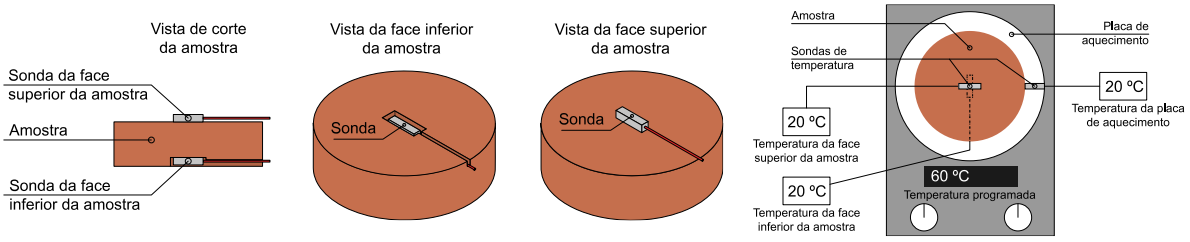
A resistência à flexão foi determinada de acordo com a norma NP EN 1015-11 (CEN, 2019) para as diferentes argamassas e para os mesmos dias de cura anteriormente definidos para os ensaios de compressão.

Para avaliação a condutibilidade térmica dos materiais foi definido um procedimento experimental, tendo sido para isso produzidos provetes cilíndricos com diâmetro de 10 cm e 4 cm de altura. Para esta avaliação foram produzidos 3 provetes com dreche contendo diferentes percentagens de água: 25 %, 50 % e 75 % e um provete de argamassa de referência como padrão (Quadro 2). Este ensaio pretendeu avaliar de uma forma comparativa o potencial de isolamento térmico das argamassas com incorporação de dreche.

Quadro 2 – Constituição das argamassas utilizadas no ensaio da determinação da transmissão de calor

% de água	Água (ml)	Cimento (g)	Dreche cervejeira (g)	Areia (g)
25	207,93	831,75	1180,80	-
50	415,65	831,75	1180,80	-
75	623,70	831,75	1180,80	-
Referência	337,50	675,00	-	2025,00

No ensaio foi usada uma placa de aquecimento, como fonte de emissão de calor, com temperatura programável e um conjunto de 3 termómetros digitais, com sonda exterior (exatidão de ±1 °C). As 3 sondas de temperatura foram colocadas, respetivamente, na superfície da placa de aquecimento, na face superior e na face inferior da amostra (Figuras 2a e 2b). Os valores de temperatura superficial nas duas faces da amostra, bem como na superfície da placa foram medidos várias vezes ao longo do tempo.



a) b)

Figura 2 – a) Pormenor da instalação das sondas de temperatura na superfície das amostras a analisar; b) Montagem experimental com indicação da colocação das amostras e respetivas sondas de temperatura

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA DRECHE

Conforme se verifica no Quadro 3 a dreche seca apresenta um teor em água de 2% o que é relativamente baixo quando comparado com a dreche húmida cujo teor em água variou entre 37% e 53%.

Quadro 3 – Teor em água das amostras de dreche

Dreche analisada	Teor de água (%)
Dreche seca	1,98
Dreche húmida – Ensaio 1	37,44
Dreche húmida – Ensaio 2	53,14

Verifica-se assim que os resultados da dreche húmida obtidos estão de acordo com a literatura, uma vez que o teor em água das dreches cervejeiras varia entre 40% a 80%. Neste caso, considera-se mais vantajosa a utilização de dreche húmida na elaboração de argamassas, diminuindo o gasto de energético com a secagem do material, e evitando, adicionalmente, o consumo de água adicional para a sua hidratação.

A análise granulométrica foi obtida através da peneiração e separação das partículas de dreche seca. Na Figura 3 apresenta-se a curva granulométrica da dreche, permitindo verificar as variações a nível da respetiva distribuição de partículas. A maioria das partículas de dreche encontram-se nos intervalos entre 2 a 4 mm e 1 a 2 mm caracterizando-se como um agregado fino (Coutinho, 1999). Atendendo à sua variabilidade granulométrica podemos considerar que este material possui a capacidade de preencher os espaços vazios da argamassa.

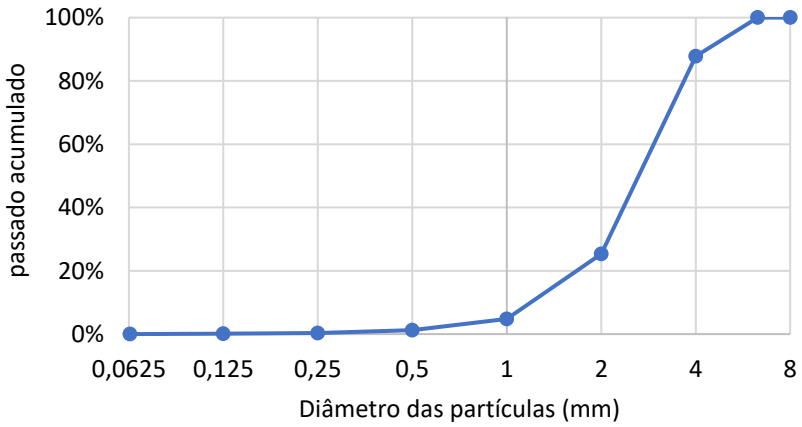


Figura 3 – Curva granulométrica da dreche

A densidade relativa foi determinada para 4 tipos de dreche conforme indicado na Quadro 4.

Quadro 4 – Massa volúmica obtida para os diferentes tipos de dreche

Tipo de dreche	Densidade da dreche (Kg/m^3)
1. Desidratada em estufa a 60 °C durante 24 h	190,1
2. Desidratada ao ar (temperatura ambiente)	180,7
3. Húmida fornecida diretamente pela unidade produtiva	513,5
4. Dreche saturada em água durante 2 h	534,1

As dreches desidratadas apresentam uma diferença pouco significativa entre si, quanto densidade. Da mesma forma, a dreche húmida apresenta uma densidade pouco distinta da dreche saturada. A diferença verificada na massa volúmica entre estes dois grupos deve-se à presença de água nos vazios intra e inter-partículas da dreche. Atendendo a que a densidade das amostras 3 e 4 é similar optou-se pela utilização da dreche húmida fornecida diretamente pela unidade produtiva, reduzindo-se assim a necessidade de incorporação de água para a produção das argamassas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A consistência das argamassas com dreche cervejeira foi aferida de acordo com a respetiva norma EN 1015-3 (CEN, 2006), verificando-se que os valores obtidos foram bastante reduzidos, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Espalhamento das argamassas com dreche obtidas com diferentes percentagens de água

Conteúdo em água (%)	Espalhamento (mm)
25	100
50	120
75	130

Para a argamassa com 25% de água, obteve um espalhamento de 100 mm, o que é limitador para a sua aplicação. As argamassas com dreche com 50% e 75% de água, apresentaram também valores bastante reduzidos de espalhamento de 120 e 130 mm, respetivamente. O facto de os valores de espalhamento terem sido reduzidos, pode ser um fator benéfico ou limitador dependendo da sua aplicação em obra.

Na determinação do pH das argamassas obtiveram-se os seguintes resultados: para a argamassa composta por 25% de água, o pH foi registado em 12; para a argamassa composta por 50% de água, o pH apresentou uma leve redução alcançando 11,96; para a argamassa composta por 75% de água, o pH foi registado em 11,76. A argamassa de referência exibiu o pH mais elevado, com valor de 13,20. A redução de pH das argamassas contendo dreche deve-se ao perfil ácido da mesma, tendo-se registado o valor de pH de 5,35 na sua análise (Figura 4). Este valor de pH está em conformidade com os valores citados na literatura para a dreche (Bamforth, 2009; Castro e Colpini, 2021).

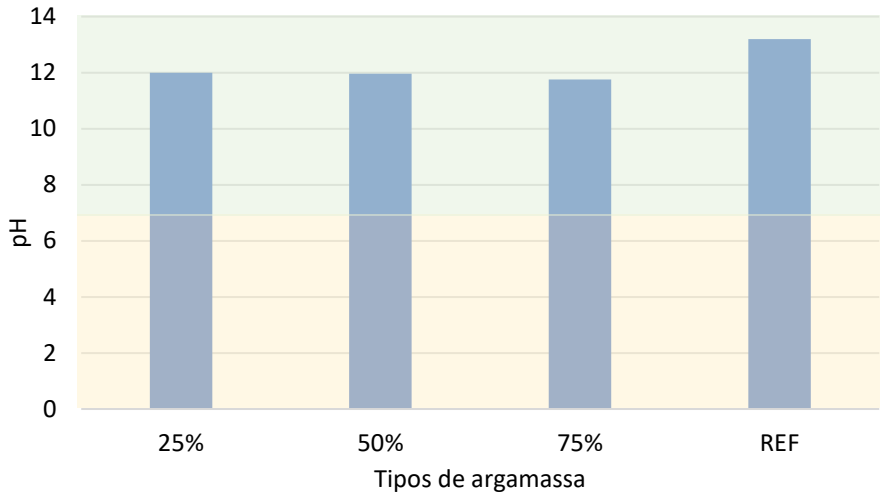


Figura 4 – Valores do pH das argamassas no estado fresco

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS APÓS CURA

A avaliação da resistência à flexão e à compressão das argamassas foi realizada aos 7, 14, 28, e 60 dias de cura, permitindo analisar o seu comportamento até atingir a cura completa. Na Figura 5 e na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para a resistência à flexão e à compressão simples, respetivamente, assim como o desvio padrão verificado nos 4 provetes ensaiados para cada idade de cura. Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão máxima comparativamente à argamassa de referência. Esta resistência à compressão máxima foi avaliada, dado que os provetes produzidos com argamassa com dreche não apresentavam uma rotura frágil, mas sim uma deformação o que permitia que o ensaio continuasse sem que ocorresse uma efetiva rotura do provete. Tanto no caso da resistência à flexão como para a resistência à compressão verifica-se um aumento da tensão de rotura ao longo da cura das argamassas. Dos resultados apresentados nas Figuras 5 e 6 é possível verificar que os provetes com 25% água apresentaram maior resistência mecânica tanto à compressão como à flexão quando comparados com os resultados obtidos para as argamassas com dreche com 50% e 75% de água.

Na Figura 7 os dados revelam uma tendência clara relativamente à comparação entres as argamassas com dreche na sua composição e a argamassa de referência no ensaio da determinação à compressão máxima. As argamassas contendo dreche apresentam resistências significativamente mais elevadas. Esta tendência pode estar relacionada com a presença acentuada de fibras na composição da dreche que conferem este efeito.

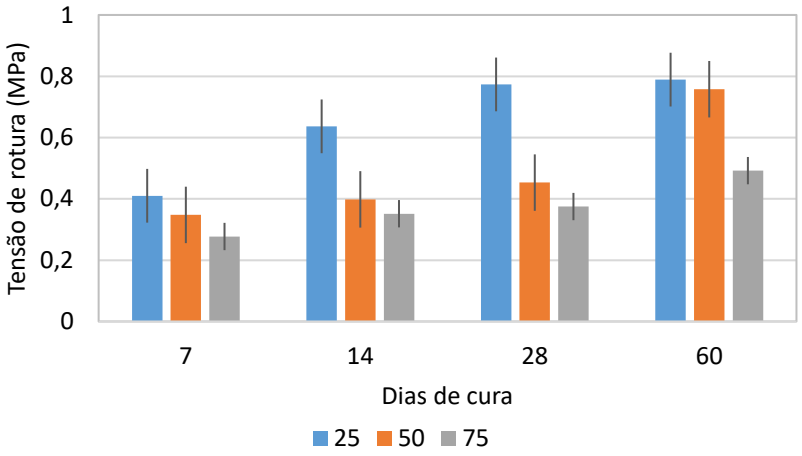


Figura 5 – Determinação da resistência à flexão

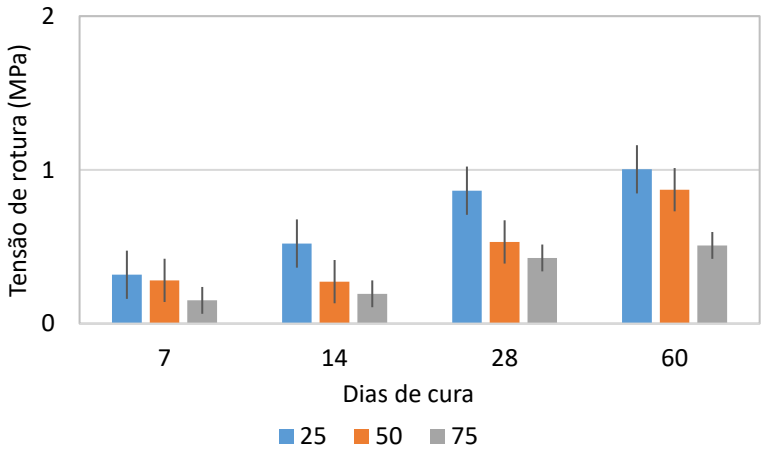


Figura 6 – Determinação da resistência à compressão

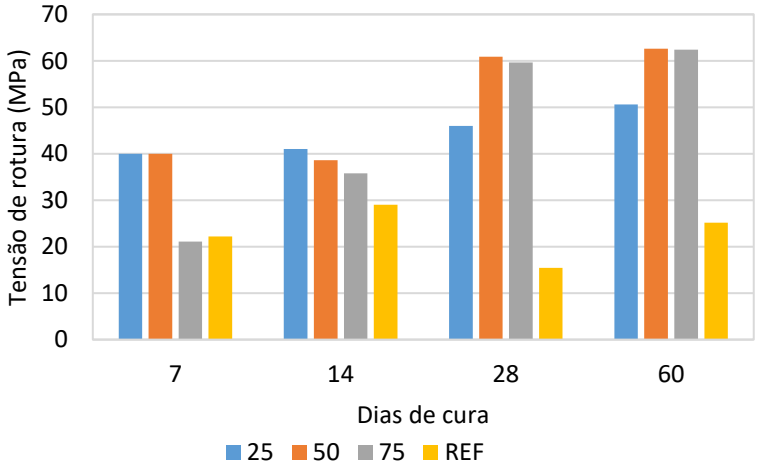


Figura 7 – Determinação da resistência à compressão máxima

Para determinar a transmissão de calor as amostras foram aquecidas numa das faces, recorrendo a uma placa de aquecimento, com temperatura controlada a 60 °C, estando a outra face exposta ao ar.

As temperaturas de ambas as faces (face em contacto com o ar e face em contacto com a placa) foram medidas ao longo do tempo com recurso a termómetros de sonda. A Figura 8 representa a diferença de temperatura entre faces ao longo de 60 minutos de análise. Pode verificar-se um aumento inicial desta diferença, que corresponde ao aquecimento da face em contacto com a placa, antes do calor transmitido por condução atingir a face superior. Esta diferença, após atingir um valor máximo, tende, ao fim de algum tempo, para um valor constante (patamar), que corresponde ao equilíbrio térmico da amostra, onde a amostra recebe calor da placa na face inferior e o perde, fundamentalmente por condução, para o ar, na face superior. Sendo que, esta diferença térmica entre faces, no equilíbrio térmico, é superior nas amostras com dreche, quando comparados com a argamassa de referência. Tal indica que, a resistência térmica das amostras com dreche é superior à da argamassa de referência.

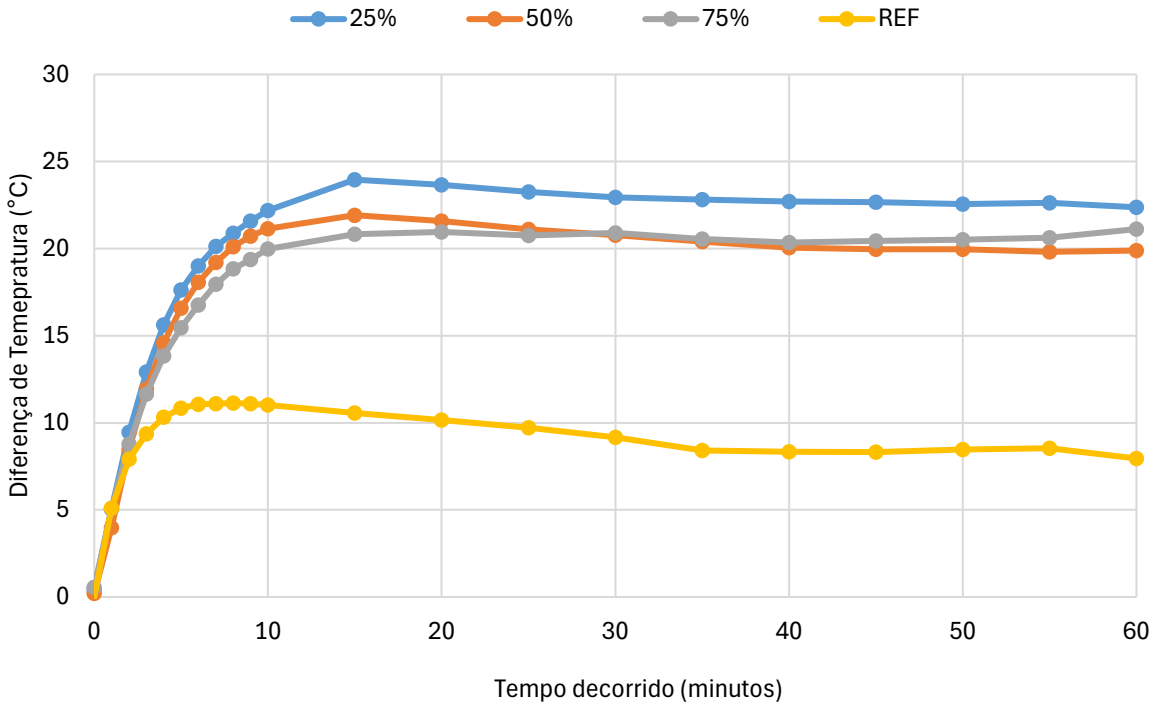


Figura 8 - Diferença de temperatura entre as duas faces da amostra ao longo do tempo.

4 CONCLUSÕES

A dreche obtida no decorrer do processo de fabricação de cerveja, evidenciou a sua variabilidade reduzida nas suas propriedades ao longo do tempo, revelando-se assim como uma opção consistente como subproduto para a indústria da construção. Os provetes prismáticos de argamassa produzidos com dreche cervejeira apresentaram viabilidade quando comparadas com a argamassa de referência, nomeadamente, quando comparada a sua resistência à compressão última com a resistência da argamassa de referência para os diferentes períodos de cura.

A dreche cervejeira, enquanto subproduto industrial, evidenciou a sua viabilidade de utilização em argamassas térmicas para reboco. Os ensaios realizados destacaram o seu perfil bastante competitivo a nível de isolamento térmico, salientando a sua elevada resistência térmica comparativamente com uma argamassa de revestimento convencional. O desempenho mecânico deste material revelou uma resistência mecânica elevada favorável a aplicações em construções.

Este material é um exemplo notável de reaproveitamento inteligente de subprodutos industriais, uma vez que além de melhorar a eficiência operacional, contribui também para a redução do desperdício e do seu impacto ambiental. Sugere-se a continuação do estudo, focando na otimização da percentagem de dreche, de forma a melhorar a resistência mecânica das argamassas.

AGRADECIMENTOS

Os autores Vítor Antunes e Maria Manso agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS.

REFERÊNCIAS

Bamforth C.W. (2009) Beer: *tap into the art and science of brewing.* Oxford University Press, New York, 3rd edition. ISBN-10: 978-0195305425

Castro, L.E.N., Colpini, L.M.S (2021) All-around characterization pf brewers' spent grain. European Food Research and Technology 247, 3013-3021 (2021). https://doi.org/10.1007/s00217-021-03860-5

CEN. 1998. *EN 1097-3 - Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids.* Brussels, Belgium: European Committee for Standardization

CEN. 2006. *EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).* Brussels, Belgium: European Committee for Standardization

CEN. 2008. *EN 1097-5. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 5: Determination of the water content by drying in a ventilated oven.* Brussels, Belgium: European Committee for Standardization

CEN. 2014. *NP EN 933-1. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1. Análise granulométrica. Método da peneiração*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization

CEN. 2019. *EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization

Coutinho, Joana de Sousa (1999) - *Agregados para argamassas e betões em Materiais de Construção 1*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. pp. 105-125.

Duarte LC, Esteves MP, Carvalheiro F, Vicente P, Gírio FM (2007) *Os subprodutos agro-industriais de natureza lenho-celulósica: caracterização da situação portuguesa*. In: Revista de Engenharia Química, Vol. 5, p. 56-62

Eurostat (2024). "Persons at risk of poverty or social exclusion by age and sex - EU 2020" Consultado a 23 de março 2024. (acesso: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ILC_PEPS01/default/bar?lang=en)

Horn, P. A., Pedron, N. B., Junges, L. H., Rebelo, A. M., da Silva Filho, H. H., e Zeni, A. L. B. (2021). *Antioxidant profile at the different stages of craft beers production: the role of phenolic compounds*. European Food Research and Technology. 247, pp. 439 – 452 https://doi.org/10.1007/s00217-020-03637-2

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of*

climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.).

Olajire, A. A. 2020. *The brewing industry and environmental challenges*. Journal of Cleaner Production, 256, 102817. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003

Zeko-Pivač A., Tišma M., Žnidaršič-Plazl P., Kulisic B., Sakellaris G., Hao J. e Planinić, M. (2022) *The Potential of Brewer's Spent Grain in the Circular Bioeconomy: State of the Art and Future Perspectives*. Front. Bioeng. Biotechnol., Sec. Bioprocess Engineering Volume 10, pp. 15. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870744

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA NO ÂMBITO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS TÉRMICAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

Amanda Barros[a]; Eva Barreira[a]; Lino Maia[a]; Maria Lurdes Lopes[a]

[a]CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto | Portugal; up202103253@edu.fe.up.pt (A.B.); barreira@up.pt (E.B.); linomaia@fe.up.pt (L.M.); lcosta@fe.up.pt (M.L.L.).

RESUMO

É primordial orientar o setor da construção para o desenvolvimento de soluções baseadas nos princípios da economia circular de modo a enfrentar os desafios atuais, tais como a redução do consumo de energia nas edificações, a mitigação dos efeitos das alterações climáticas, o esgotamento de recursos e a geração de resíduos. No que diz respeito ao ambiente construído, a melhoria das propriedades térmicas da envolvente do edifício é uma das necessidades crescentes para reduzir o consumo de energia no setor habitacional. Neste contexto, as argamassas térmicas têm sido uma tendência na indústria da construção devido ao seu desempenho frente à redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente do edifício. Por outro lado, a adição de resíduos tem sido estudada como alternativa para promover melhorias nas propriedades térmicas das argamassas e reduzir o consumo de materiais primários no setor da construção. O presente trabalho realiza uma revisão detalhada do desempenho térmico de argamassas térmicas com incorporação de resíduos através de uma revisão sistemática da literatura. Os tipos de resíduos incorporados nas argamassas térmicas e as diversas percentagens e formas de incorporação foram identificados ao longo das publicações reunidas nesta revisão. Além disso, são avaliados os resultados encontrados pelos autores das publicações relativamente à condutibilidade térmica. Por fim, discutem-se perspectivas relacionadas ao desenvolvimento de novos estudos na área de argamassas térmicas com incorporação de resíduos.

Palavras-chave: argamassas térmicas, desempenho térmico, economia circular, eficiência energética, resíduos.

1 INTRODUÇÃO

Os edifícios são os maiores consumidores de energia na Europa, sendo o aquecimento, o resfriamento e a água quente doméstica responsáveis por 80% da demanda total de energia (1). Assim, melhorar as propriedades térmicas das envolventes dos edifícios é uma das necessidades crescentes no que concerne à redução do consumo de energia no ambiente construído. A Comissão Europeia adotou, em 2015, um ambicioso Plano de Ação para a Economia Circular (2), o qual inclui iniciativas que estimulam a transição para uma economia circular. Além disso, em 2020, a Comissão Europeia lançou um novo Plano de Ação para a Economia Circular (3) visando aumentar a competitividade e promover o crescimento econômico sustentável, além de criar novos empregos (4). Este plano estabelece um programa de ação que abrange todo o ciclo, desde a produção e consumo até à gestão de resíduos (5). Por outro lado, as Nações Unidas estabeleceram a Agenda 2030, que inclui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (6).

O papel da construção civil, baseado nos conceitos da economia circular, é fundamental para atingir estes objetivos, pois permitirá o desenvolvimento de indústrias e cidades mais resilientes, sustentáveis e inovadoras. Neste âmbito, a utilização de material de isolamento térmico provou ser uma forma eficaz de reduzir as perdas de calor nos edifícios, diminuindo a transferência de calor através da envolvente do edifício (7). Uma vez que algumas das patologias mais comuns que ocorrem nas fachadas são devidas ao deficiente isolamento térmico, a redução do conforto térmico dos utilizadores é um problema recorrente (8), e, nos últimos anos, critérios de

desempenho térmico muito rigorosos para a envolvente dos edifícios foram implementados pelos países europeus (9), vários estudos foram realizados com particular interesse em argamassas térmicas (10–13).

Quanto aos potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das argamassas, a maioria está associada ao esgotamento fóssil, principalmente no que diz respeito ao elevado consumo de combustíveis fósseis na cadeia de abastecimento de argamassas (14). Estudos acerca da incorporação de matérias-primas secundárias em argamassas são, por sua vez, essenciais para que novas soluções sustentáveis possam ser expandidas para uma escala maior e mais abrangente. A otimização do processo de incorporação de resíduos à escala industrial permitirá, inclusive, a produção de argamassas sustentáveis num processo produtivo mais limpo face ao tradicional (15). Assim, a incorporação de resíduos em argamassas de revestimento, térmicas ou não, tem sido objeto de estudo de vários autores que analisaram as principais propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido das argamassas, bem como a durabilidade, o impacto ambiental, além das propriedades higrotérmicos destas.

Neste contexto, o principal objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão abrangente da literatura sobre a influência da incorporação de resíduos em argamassas térmicas como alternativa para atingir uma melhoria das propriedades térmicas destas. Pretende-se, com este trabalho, identificar os resíduos mais comuns incorporados em argamassas térmicas, as percentagens e formas de incorporação referidas na literatura e discutir o desempenho térmico das argamassas térmicas com os resíduos estudados pelos autores. Ao final deste trabalho foi possível identificar as lacunas nesta área do conhecimento e discutir perspectivas para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos deste trabalho, foi adotada uma metodologia baseada em três etapas. A Figura 1 apresenta um fluxograma detalhado da metodologia aplicada.

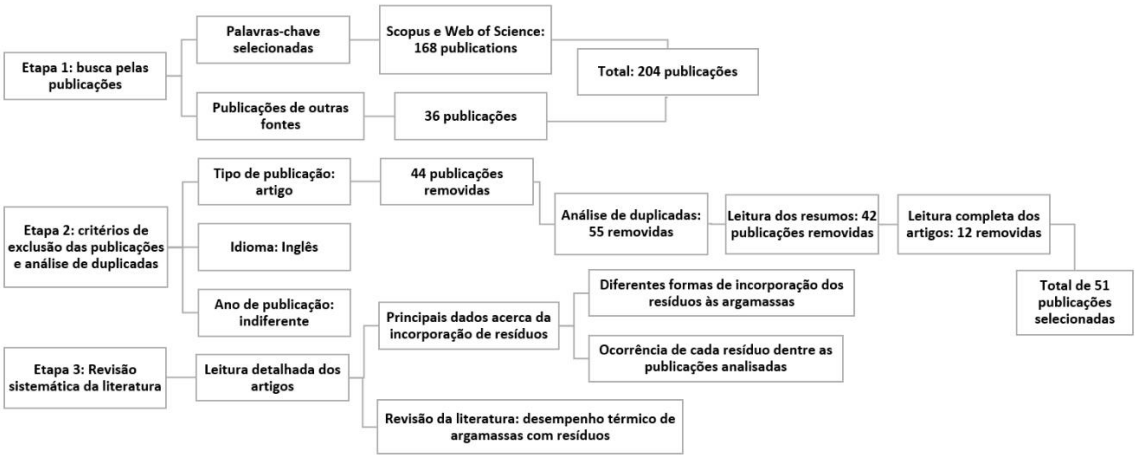


Figura 1- Metodologia aplicada em três etapas.

A primeira fase desta metodologia envolve a busca de publicações a serem analisadas. Esta etapa envolve duas sub-etapas: selecionar palavras-chave a serem aplicadas nas bases de dados escolhidas, nomeadamente Scopus e Web of Science, e reunir publicações complementares de outras fontes. No primeiro caso, as combinações de palavras-chave em inglês foram escolhidas para abranger os diversos termos utilizados na literatura para se referir a materiais de revestimento de superfície, como “render”, “plaster” e “mortar”. O mesmo aconteceu com os termos que se referem às propriedades de isolamento térmico, como “thermal” e “insulation”, e com a nomenclatura usual da literatura para resíduos, como “waste”, “residue”, “by-product” e “Construction and

Demolition Waste" (CDW). Por fim, os termos "energy efficiency", "sustainability" e "circular economy" foram incluídos nas palavras-chave de busca.

Tabela 1 apresenta as combinações de palavras-chave aplicadas nesta revisão e o número de publicações obtidas.

Tabela 1 - Palavras-chave aplicadas à busca de publicações nas bases de dados.

Grupo de palavras-chave	Número de publicações
"thermal mortar" OR "thermal render" OR "thermal plaster" OR "insulation mortar" OR "insulation render" OR "insulation plaster" AND "waste" OR "residue" OR "by-product" OR "CDW"	102
"thermal mortar" OR "thermal render" OR "thermal plaster" OR "insulation mortar" OR "insulation render" OR "insulation plaster" AND "waste" OR "residue" OR "by-product" OR "CDW" AND "energy efficiency"	29
"thermal mortar" OR "thermal render" OR "thermal plaster" OR "insulation mortar" OR "insulation render" OR "insulation plaster" AND "waste" OR "residue" OR "by-product" OR "CDW" AND "circular economy"	12
"thermal mortar" OR "thermal render" OR "thermal plaster" OR "insulation mortar" OR "insulation render" OR "insulation plaster"AND "waste" OR "residue" OR "by-product" OR "CDW" AND "sustainability"	25
Total de publicações (Scopus + WoS)	**168**

Relativamente às publicações obtidas em outras fontes, estas foram selecionadas a partir das referências bibliográficas dos 168 estudos encontrados nas bases de dados, não tendo sido detectadas automaticamente por estarem vinculadas a palavras-chave diferentes. Na segunda etapa da metodologia, foram aplicados os primeiros critérios de exclusão de publicações com base no idioma e tipo de publicação. Foram aceitos apenas os estudos publicados como artigos e na língua inglesa. O ano de publicação não foi considerado critério de exclusão. Posteriormente, também foram excluídas publicações que apareceram mais de uma vez. Com base na abordagem da publicação, avaliada pela leitura do resumo ou, em alguns casos, do documento completo, outras publicações foram excluídas por não se enquadrarem efetivamente na análise de argamassas térmicas com incorporação de resíduos. Ao final deste processo, foram selecionadas 51 publicações para serem analisadas nesta revisão. Após a leitura minuciosa dos artigos selecionados, foi possível identificar as principais constatações obtidas para o desempenho térmico, a absorção de água e capilaridade das argamassas térmicas com resíduos. As limitações dos estudos em análise também foram descritas. Por fim, foram elencadas as conclusões da revisão sistemática da literatura, apontando as lacunas observadas, bem como identificadas as perspectivas futuras no âmbito do tema em estudo.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

3.1 RESÍDUOS ESTUDADOS PELOS AUTORES

Todos os resíduos estudados pelos autores das 51 publicações selecionadas foram identificados e agrupados de acordo com sua origem, seja mineral, vegetal, animal ou sintética (Tabela 2). No total, foram identificados 41 resíduos, sendo a maioria de origem vegetal, abrangendo 17 resíduos, seguidos pelos sintéticos, com 16 resíduos, pelos minerais, com 7 resíduos e, por fim, foi identificado apenas 1 resíduo de origem animal. A ocorrência de cada resíduo nas publicações avaliadas também está indicada na Tabela 2, entre parênteses. Pode-se afirmar que a cinza volante foi o resíduo mais estudado como componente de argamassas térmicas, com 12 ocorrências. Em seguida aparecem resíduos de poliestireno expandido (EPS), resíduos de borracha e resíduos de lã mineral, com 9, 5 e 4 ocorrências, respectivamente.

Tabela 2 - Lista de resíduos incorporados nas argamassas térmicas de acordo com sua origem, número de ocorrências (entre parênteses) e tipo de componente na mistura (a: como substituto da areia; b: como substituto do cimento; c: como substituto da cal; d: como substituto do gesso; e: como aditivo).

Item	Resíduos	Ref.
1	**Resíduos de origem mineral:** cinza volante[a,b,e] (12), resíduo de lã mineral[a,c,e] (4), fibra de vidro[a] (2), fibras de latão reciclado[e] (1), resíduos de mineração[b] (1), vidro expandido[a] (1), agregados piroclásticos reciclados[a] (1)	(16–35)
2	**Resíduos de origem vegetal:** resíduo de café[a,b] (3), resíduo de cortiça[a] (3), fibras de folhas caídas[b] (3), canas de cânhamo[a,c] (2), cinza de casca de arroz[a,b] (2), resíduo de madeira[a,b] (2), cinza de bagaço[b] (1), frutos de platanus acerifolia dessecados e esmagados[a] (1), talos de cana picados[a] (1), cascas de amêndoa/avelã/nozes[a] (1), cascas de coco[a] (1), vagens de feijão e ervilha[a] (1), fibras de curauá[e] (1), casca e medula de girassol[a] (1), fibra de juta reciclada[c] (1), fibra de cardo[c] (1), caroço de azeitona[e] (1)	(11,17,31,36–48)
3	**Resíduos de origem animal:** conchas residuais terrestres[b] (1)	(49)
4	**Resíduos sintéticos:** resíduo de EPS[a,b,e] (9), resíduos de borracha[a,e] (5), sílica ativa[b,e] (3), cinza de lodo de papel[a,b,e] (3), escória de alto forno[e] (2), agregados de concreto reciclado[a] (2), carbono negro reciclado[a] (1), pó de telha reciclado[d] (1), cerâmica de paredes reciclada[e] (1), resíduos de espuma de plástico[a] (1), papelão encharcado de água[a] (1), resíduo de polietileno tereftalato (PET)[a] (1), plástico reforçado com fibra de vidro pulverizado (GFRP)[a] (1), lama de serragem de silicato[a] (1), resíduo de cabos de plástico[d] (1), opus signinum[c] (1)	(16,19,20,23,24,26,27,29–31,36,45,50–65)

Considerando os estudos selecionados para esta revisão (Tabela 2) e o tipo de incorporação dos resíduos (em substituição à areia, em substituição ao cimento, em substituição à cal, em substituição ao gesso e como aditivo), 55% das publicações selecionadas avaliaram a incorporação de resíduos em substituição total ou parcial de agregados convencionais, como areia de leito de rio. Por outro lado, vários autores optaram pela substituição total ou parcial do ligante da argamassa por um resíduo, sendo que 23% dos estudos incorporaram o resíduo em substituição ao cimento, 6% à cal e 2% ao gesso. Além disso, 14% dos estudos testaram a incorporação de resíduos em argamassas como aditivo, sem remover total ou mesmo parcialmente nenhum dos componentes originais das argamassas em análise. A crescente necessidade de redução da utilização de materiais como areia e cimento na indústria da construção explica a maioria dos estudos dedicados à análise da incorporação de resíduos como componente substituto. A maioria dos autores destacou duas perspectivas dos ganhos ambientais: conferir um destino alternativo aos resíduos que seriam descartados em aterros e reduzir o consumo de matérias-primas no setor da construção.

3.2 DESEMPENHO TÉRMICO DAS ARGAMASSAS TÉRMICAS COM RESÍDUOS

A condutibilidade térmica é fator determinante para a classificação de argamassas térmicas (66). Devido a este fato, todos os autores avaliaram o desempenho térmico de argamassas incorporando resíduos. Diversas publicações incorporaram cinzas volantes em argamassas, isoladas ou combinadas com outro resíduo. Nestes estudos, a adição de resíduos resultou em melhor desempenho térmico das argamassas. Li et al. (16) e Haibo (20) adicionaram cinzas volantes e resíduos de EPS às argamassas simultaneamente. Os primeiros autores destacam que, à medida que se aumenta o teor de resíduos de EPS, a condutibilidade térmica da amostra diminui, de forma mais acentuada quando o EPS está em baixo teor e com menor impacto quando está em alto teor. A pesquisa de Haibo corrobora com estes resultados uma vez que a condutibilidade térmica das argamassas também diminuiu após a adição de resíduos. Haibo explica que quanto maior o teor de resíduos, maior o volume ocupado, o que reduz a densidade aparente do material, resultando em menor condutibilidade térmica. Segundo o autor, para garantir um bom desempenho da argamassa, a granulometria do EPS deve ser inferior a 2.5 mm.

Escória de alto forno e sílica ativa também foram estudadas juntamente com cinzas volantes (23,24,26,27), resultando em argamassas mais eficientes termicamente. De acordo com Li et al. (23), a condutibilidade térmica

é altamente influenciada pela escória e, devido às partículas menores, a escória e seus produtos de hidratação realizam os efeitos de microagregados e pozolânicos que dificultam a transferência de calor e reduzem a condutibilidade térmica. Os autores destacam que 20.73% de cinza volante e 21.49% de escória de alto forno é a composição ideal para argamassas térmicas, com erro de 1.52%. Por outro lado, Wang et al. (24) propõem como proporção ótima 5:5:1 para cinzas volantes, pó de escória e sílica ativa, respectivamente, a serem incorporados à argamassa. Rashad (26) obtiveram argamassas isolantes com baixa densidade e, consequentemente, baixa condutibilidade térmica (0.30-0.48 W/mK) após adição de sílica ativa e cinza volante. Os autores também afirmaramou que usar gesso como material aglutinante resulta em melhor desempenho do que o uso do cimento para fins de isolamento térmico. A redução da condutibilidade térmica é justificada pelo autor pela menor condutibilidade térmica do gesso quando comparado à do cimento. Esses resultados corroboram com outro estudo de Rashad et al. (27), que destaca que a substituição do metacaulim pela sílica ativa diminuiu a condutibilidade térmica de 0.113 W/mK para 0.095 W/mK.

A adição de cinzas volantes separadamente também foi estudada. A redução da condutibilidade térmica também foi alcançada após a adição de resíduos, seja como substitutos da areia (18) ou do cimento (21,22,25). Bicer et al. (18) observaram que à medida que o diâmetro granulométrico diminuiu, a densidade das cinzas aumentou 16.12%. Além disso, à medida que a taxa de adição de cinzas volantes aumentou em 10-90% nas misturas de cimento com cinzas volantes, a condutibilidade térmica diminuiu 14.47-24.52%. Em outro estudo, a incorporação de cinzas volantes e resina de tragacanto, comprovou reduzir em 34.52% o valor do coeficiente de condutibilidade térmica da argamassa, para as amostras sem resina, e em 42.03%, para as amostras com resina (22). Borges et al. (25) afirmam que as cinzas volantes reduziram a condutibilidade térmica nas amostras de argamassa, como esperado, com a maior redução para 50% de substituição do cimento.

A incorporação de baixos percentuais de resíduos também se mostrou relevante, como no estudo de La Scalia et al. (17), que adicionou resíduo de café às argamassas. Segundo os autores, mesmo a adição de apenas 5% de resíduo de café leva a uma importante redução da condutibilidade térmica e, consequentemente, a um maior desempenho isolante. O desempenho térmico das argamassas com resíduo de EPS foi considerado satisfatório, com o coeficiente de condutibilidade térmica variando de 0.25 a 0.13 W/mK no estudo de Seputyte-Jucike et al. (52) e garantindo uma redução até 0.09 W/mK no estudo desenvolvido por Koksal et al. (50). A resina voltou a ser utilizada para potencializar resultados em argamassas com resíduos. A resina de damasco foi escolhida por Bicer et al. (54) a ser adicionada no teor de 1% do peso do cimento total e o EPS foi incorporado nas proporções de 20%, 40%, 60% e 80% do volume total nas misturas. Uma forte correlação entre condutibilidade térmica e densidade foi encontrada pelos autores. Além disso, ao adicionar resina à mistura, foram obtidos melhores resultados quando comparados às misturas sem resina. Tittarelli et al. (51) realizaram uma comparação entre argamassas incorporando EPS virgem e resíduos de EPS no mesmo teor volumétrico. As argamassas de EPS reciclado demonstraram ter propriedades de isolamento térmico inferiores às fabricadas com material virgem, mas isto pode ser revertido aumentando a percentagem de EPS. Os autores destacam que é possível obter uma economia em relação aos custos superior a 25% utilizando EPS reciclado para obter argamassas com capacidade de isolamento térmico específica.

Alguns estudos analisaram a incorporação de resíduos de borracha em argamassas térmicas em substituição à areia ou como aditivo, melhorando suas propriedades térmicas (55–59). De acordo com Kazmierczak et al. (58), a adição de resíduos de borracha leva a uma redução da condutibilidade térmica de até 32% para uma argamassa com 6% de resíduos de borracha em substituição à areia. Como aditivo para argamassas, resíduos de borracha foram estudados por Meshgin et al. (59). As medições de condutibilidade térmica mostram que tanto percentagens menores quanto maiores de resíduos de borracha resultam em menor condutibilidade térmica. Segundo os autores, a condutibilidade térmica da argamassa depende não apenas da fração volumétrica das partículas de borracha, mas também do tamanho médio das partículas.

Morgado et al. (11) e Panesar et al. (38) analisaram a aplicação de resíduos de cortiça em argamassas e concluíram que os resultados de condutibilidade térmica são satisfatórios e garantem um desempenho térmico aceitável para estas misturas. Os valores de condutibilidade térmica atingiram um mínimo de 0.0715 W/mK para argamassas com rolhas de cortiça, segundo estudo de Gennusa et al. (36). Outros resíduos foram estudados em substituição à areia, como palha e fibras de folhas caídas. (39), canas de cânhamo (42), resíduo de madeira, resíduos de polietileno tereftalato (PET) e partículas de plástico reforçado com fibra de vidro pulverizado (GFRP) (45), casca de girassol (46), carbono negro reciclado derivado de pneus descartados (61), resíduos de vidro expandido (34), agregados piroclásticos reciclados (35) e lama de serragem de silicato (64). Vale ressaltar que em estudo realizado por Coppola et al. (63) com resíduos plásticos mostrou que a presença de agregados plásticos diminuiu a densidade da argamassa em até 36%, em relação à amostra de referência. Além disso, a condutibilidade térmica diminuiu 10% para a substituição de 50% do volume de areia. Em substituição ao cimento, vários outros estudos podem ser destacados (33,40,41,43).

Os resultados obtidos por Srikanth et al. (43) comprovam que a adição de 30% de cinza de bagaço como substituto parcial do cimento melhorou o desempenho térmico, culminando numa diminuição de 33% na condutibilidade térmica da argamassa. Ao mesmo tempo, a combinação de cinza de bagaço e cinza de casca de arroz (15% cada) diminuiu a condutibilidade térmica em até 31% em comparação à argamassa convencional. A pesquisa de Selvaranjan et al.(44) com cinza de casca de arroz em vez de areia de rio, apresenta valores que confirmam os mencionados por Srikanth et al. (43). Os autores destacam que a cinza da casca de arroz pode substituir até 30% da areia para produzir um reboco termicamente eficiente. Em vez de gesso, Durgun et al. (62) adicionou pó de cerâmica reciclado em argamassas. Segundo os autores, a presença de pó de revestimento cerâmico reciclado potencializou a perda de massa, diminuindo a condutibilidade térmica. Em outro estudo, Vidales-Barriguete et al. (65) adicionou resíduos de cabos plásticos em substituição ao gesso e os resultados mostraram que as propriedades térmicas das argamassas melhoraram com até 60% da incorporação de resíduos.

Alguns autores estudaram a incorporação de resíduos como aditivo em argamassas (32,47,48). De acordo com Barreca et al. (48), a adição de 70% do peso seco de caroço de azeitona permitiu reduzir a condutância térmica média da argamassa de cimento-cal em mais de 76% e a densidade em cerca de 30%. Além disso, os testes evidenciaram que a redução da condutibilidade térmica, relacionada com o aumento da percentagem de caroço de azeitona adicionado, é maior do que a redução da densidade. A Figura 2 apresenta os resultados de condutibilidade térmica encontrados em diferentes publicações referentes às argamassas com cinza volante, resíduos de EPS e resíduos de borracha, sendo estes, respectivamente, os resíduos mais estudados pelos autores. Por outro lado, a Figura 3 evidencia a relação entre a condutibilidade térmica e a densidade das argamassas com estes resíduos, nos casos em que os autores avaliaram estas duas propriedades.

De acordo com a Figura 2, os valores de condutibilidade térmica encontrados variam de 0.086 a 1.400 W/mK para argamassas com cinzas volantes, de 0.071 a 1.200 W/mK para argamassas com resíduos de EPS e de 0.582 a 1.000 W/mK para argamassas com resíduos de borracha. Para os mesmos percentuais de resíduos, há uma variação considerável nos valores de condutibilidade térmica encontrados pelos autores. Segundo os autores, não só a percentagem de resíduos é relevante, mas também as dimensões destes, a composição da argamassa, o tipo de ligante, a presença de aditivos e a combinação de um ou mais resíduos. Além disso, os resíduos podem apresentar comportamento variável quando adicionados à argamassa em substituição à areia, ao ligante ou como aditivo. Nos estudos indicados na Figura 3, observa-se que há uma relação diretamente proporcional entre os valores de condutibilidade térmica e densidade das argamassas com adição de cinza volante, resíduos de EPS e resíduos de borracha. Esta relação também foi constatada por outros autores (16,20,48,63), fato que corrobora com a expectativa de que argamassas com adição de resíduos de baixa densidade apresentem melhor desempenho térmico em relação às argamassas de referência (sem resíduos).

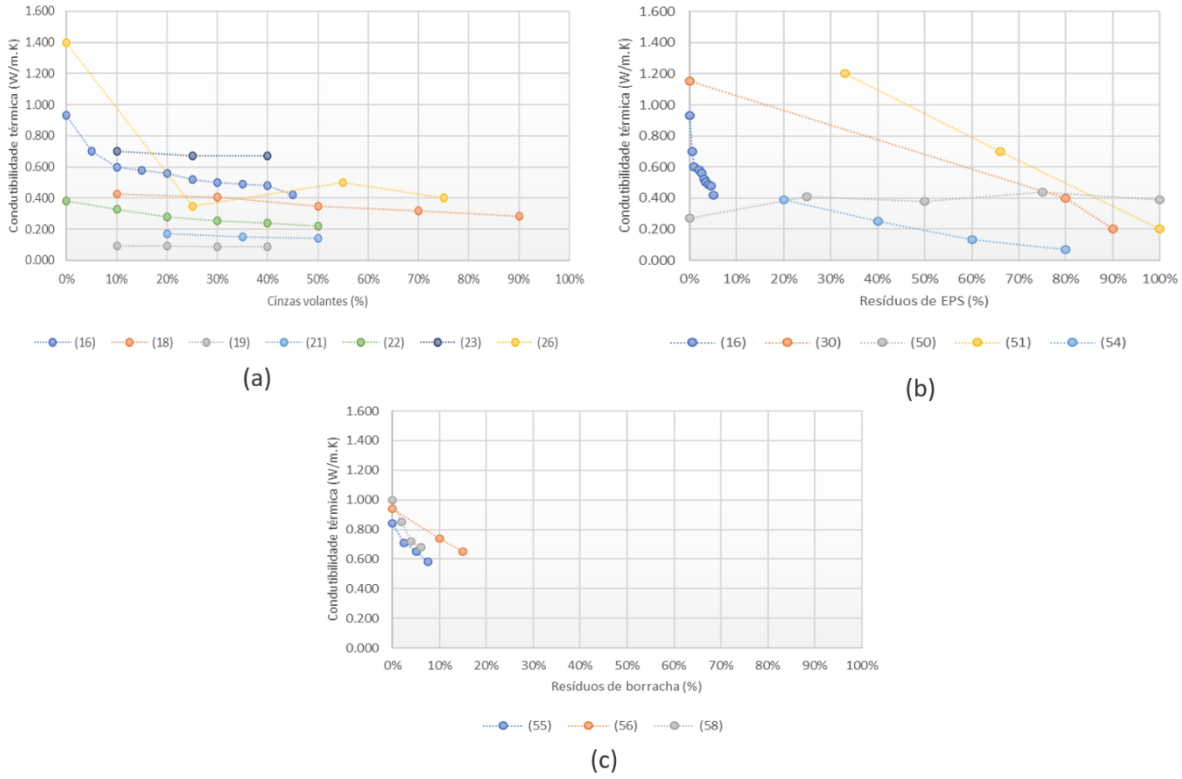


Figura 2 - Valores de condutibilidade térmica para argamassas com (a) cinza volante, (b) resíduo de EPS e (c) resíduo de borracha encontrados nos diferentes estudos.

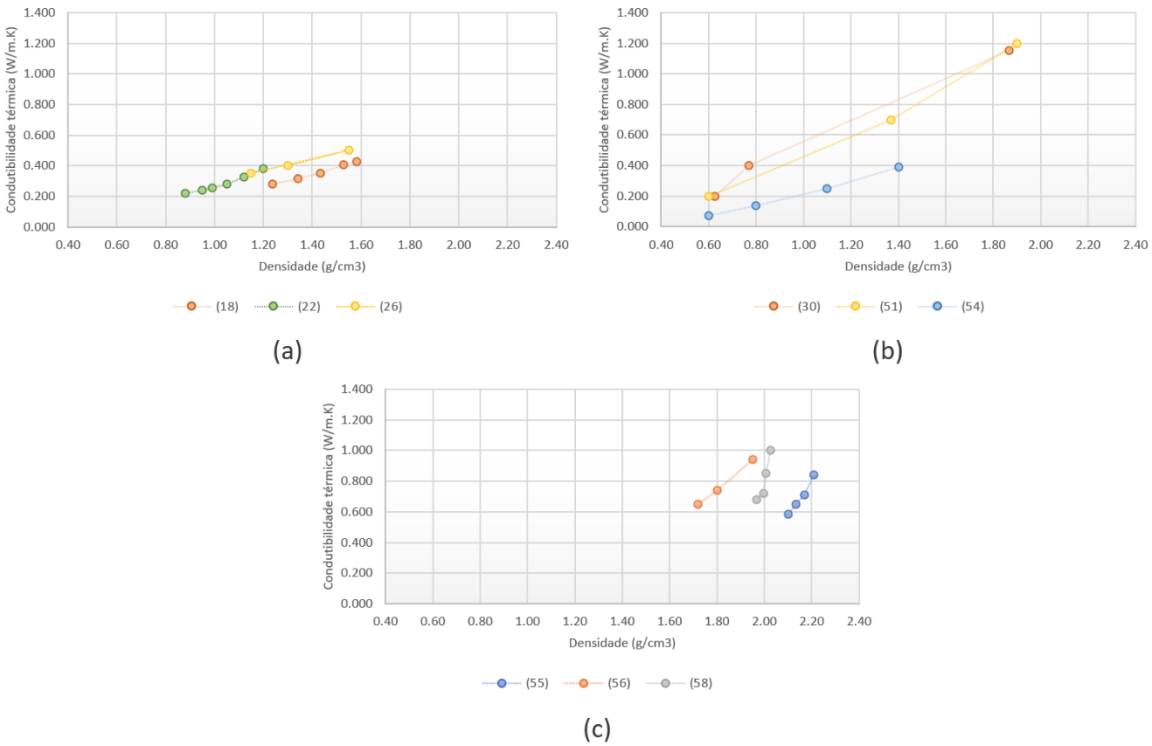


Figura 3: Relação entre a condutibilidade térmica e a densidade para argamassas com (a) cinza volante, (b) resíduo de EPS e (c) resíduo de borracha encontrados nos diferentes estudos.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

De acordo com a revisão da literatura apresentada neste trabalho e em relação ao desempenho térmico de argamassas térmicas com resíduos, pode-se destacar que há redução na condutibilidade térmica das argamassas após a adição de um ou mais de um resíduo. Além disso, a maioria dos autores atestam que foi encontrada uma forte relação entre a redução da condutibilidade térmica e a baixa densidade das argamassas, causada pela baixa densidade dos resíduos incorporados.

O tamanho e a forma das partículas dos resíduos afetam as propriedades das argamassas térmicas, bem como a adição de um ou mais tipos de resíduos. Além disso, alguns autores afirmam que as argamassas térmicas podem apresentar melhores resultados através da incorporação de resíduos combinados com outros materiais, como resinas, incorporadores de ar, vermiculita, entre outros. Pode-se afirmar que as publicações encontradas na literatura apontam resultados satisfatórios, com desempenhos das argamassas considerados promissores quando comparados com os das misturas de referência. Dessa forma, a incorporação de resíduos em argamassas térmicas é uma técnica eficaz para ajudar a alcançar a eficiência energética nos edifícios, ao mesmo tempo em que se aplicam alternativas para a eliminação de resíduos e para continuar o caminho para uma economia circular.

A falta de normas para caracterização de argamassas com resíduos explica a eventual necessidade dos autores de criarem procedimentos para ensaios laboratoriais ou adaptarem parcialmente os existentes. Ressalta-se também que nem sempre os autores esclarecem como as misturas são preparadas e como são realizadas as medições, o que pode dificultar o bom aproveitamento dos resultados por outros pesquisadores e a continuidade da pesquisa. Diferentes procedimentos experimentais seguidos nos diversos estudos analisados levantam dificuldades na comparação dos resultados. Portanto, é fundamental a utilização de testes padronizados e, quando estes não puderem ser aplicados integralmente, por não terem sido pensados para a incorporação de materiais com características que podem ser encontradas em resíduos, o procedimento deve ser descrito de forma clara e detalhada em estudos futuros, para garantir a intercomparabilidade de resultados.

Além disso, novos estudos sobre argamassas térmicas com novos resíduos e com resíduos já estudados devem ser desenvolvidos de modo a permitir a comparação de procedimentos e resultados, avaliar a influência das dimensões dos resíduos nas propriedades mecânicas e higrotérmicas, verificar o desempenho a longo prazo das argamassas através de testes de durabilidade e resistência ao fogo, realizar Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para mensurar os possíveis impactos ambientais causados pela fabricação e aplicação das argamassas e, por fim, analisar os custos e a disponibilidade de resíduos para que seja possível considerar a viabilidade de aplicação da argamassa térmica com incorporação de resíduos em escala industrial, fator muito relevante para obtenção de resultados práticos e viáveis, aproximando este campo de estudo da realidade do setor produtivo.

REFERÊNCIAS

1. European Union. DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Official Journal of the European Union. Official Journal of the European Union; 2012.

2. European Comission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. COM(2015) 614 final Dec 2, 2015.

3. European Comission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final Nov 3, 2020.

4. Ramírez CP, Barriguete AV, Muñoz JG, del Río Merino M, del Solar Serrano P. Ecofibers for the reinforcement of cement mortars for coating promoting the circular economy. Sustainability (Switzerland). 2020;12(7).

5. Mercader-Moyano P, Ramírez-de-Arellano-Agudo A. Selective classification and quantification model of C&D waste from material resources consumed in residential building construction. Waste Management & Research [Internet]. 2013 Feb 26;31(5):458–74. Available from: https://doi.org/10.1177/0734242X13477719

6. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. General Assembly Oct 21, 2015.

7. Ramos NMM, Maia J, Souza AR, Almeida RMSF, Silva L. Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS. Infrastructures (Basel). 2021 May 25;6(6):79.

8. Leão B. Estudo da durabilidade do sistema ETICS em paredes exteriores através da inspeção de edifícios [Masters dissertation]. [Porto, Portugal]: University of Porto; 2017.

9. European Union. DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union Jun 19, 2018.

10. Lisitano IM, Laggiard D, Fantucci S, Serra V, Fenoglio E. Evaluating the impact of indoor insulation on historic buildings: A multilevel approach involving heat and moisture simulations. Applied Sciences (Switzerland). 2021;11(17).

11. Morgado A, Soares A, Flores-Colen I, Veiga MR, Gomes MG. Durability of thermal renders with lightweight and thermal insulating aggregates: Regranulated expanded cork, silica aerogel and expanded polystyrene. Gels. 2021;7(2).

12. Pereira MC, Soares A, Flores-Colen I, Correia JR. Influence of exposure to elevated temperatures on the physical and mechanical properties of cementitious thermal mortars. Applied Sciences (Switzerland). 2020;10(6).

13. Maia J, Ramos NMM, Veiga R. A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems. Constr Build Mater. 2019;222:654–63.

14. Rezende Leite F, Lúcia Pereira Antunes M, Aparecido Lopes Silva D, Cipriano Rangel E, Cristino da Cruz N. An ecodesign method application at the experimental stage of construction materials development: A case study in the production of mortar made with ornamental rock wastes. Constr Build Mater. 2021 Jul 26;293:123505.

15. Amaral LF, Girondi Delaqua GC, Nicolite M, Marvila MT, de Azevedo ARG, Alexandre J, et al. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste - A mathematical model approach for granulometric optimization. J Clean Prod. 2020 Mar 1;248:119283.

16. Li H, Ren Y. Application of Polystyrene in Building Materials Based on Chemical Hydration Reaction. Chem Eng Trans. 2018;66:67–72.

17. La Scalia G, Saeli M, Miglietta PP, Micale R. Coffee biowaste valorization within circular economy: an evaluation method of spent coffee grounds potentials for mortar production. Int J Life Cycle Assess. 2021 Sep 19;26(9):1805–15.

18. Bicer A. Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING PROGRESS. 2018 Dec;8:78–82.

19. Chen M, Wang S, Lu L, Zhao P, Gong C. Effect of matrix components with low thermal conductivity and density on performances of cement-EPS/VM insulation mortar. J Therm Anal Calorim. 2016;126(3):1123–32.

20. Haibo L. Experimental study on preparation of fly ash polystyrene new insulation building material. Chem Eng Trans. 2017;59:295–300.

21. Carrajola R, Hawreen A, Flores-Colen I, de Brito J. Fresh properties of cement-based thermal renders with fly ash, air lime and lightweight aggregates. Journal of Building Engineering. 2021;34.

22. Bicer A. Influence of tragacanth resin on the thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. J Adhes Sci Technol. 2019;33(10):1019–32.

23. Li D, Pan Y, Liu C, Chen P, Wu Y, Liu J, et al. Optimal design of glazed hollow bead thermal insulation mortar containing fly ash and slag based on response surface methodology. Reviews on Advanced Materials Science. 2023;62(1).

24. Wang C, Peng H, Bian L, Yin H, Sofi M, Song Z, et al. Performance of alkali-activated cementitious composite mortar used for insulating walls. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING. 2021 Dec;44.

25. Borges A, Flores-Colen I, de Brito J. Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay. Constr Build Mater. 2018;191:535–43.

26. Rashad AM. Possibility of producing thermal insulation materials from cementitious materials without foaming agent or lightweight aggregate. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH. 2022 Jan;29(3):3784–93.

27. Rashad AM, Essa GMF, Morsi WM. Traditional Cementitious Materials for Thermal Insulation. Arab J Sci Eng. 2022;47(10):12931–43.

28. Piña Ramírez C, Vidales Barriguete A, Serrano Somolinos R, del Río Merino M, Atanes Sánchez E. Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. Constr Build Mater. 2020;265.

29. Ferrández D, Álvarez M, Saiz P, Zaragoza A. Experimental Study with Plaster Mortars Made with Recycled Aggregate and Thermal Insulation Residues for Application in Building. Sustainability (Switzerland). 2022;14(4).

30. Passos PM, Carasek H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. Cerâmica. 2018 Dec;64(372):577–88.

31. Majumder A, Canale L, Mastino CC, Pacitto A, Frattolillo A, Dell'Isola M. Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation. Energies (Basel). 2021 Jun 15;14(12):3564.

32. Borinaga-Treviño R, Orbe A, Canales J, Norambuena-Contreras J. Thermal and mechanical properties of mortars reinforced with recycled brass fibres. Constr Build Mater. 2021 May 17;284:122832.

33. Almeida J, Faria P, Ribeiro AB, Santos Silva A. Cement-based mortars production applying mining residues treated with an electro-based technology and a thermal treatment: Technical and economic effects. Constr Build Mater. 2021 Apr 19;280:122483.

34. Záleská M, Pavlíková M, Vyšvařil M, Pavlík Z. Effect of aggregate and binder type on the functional and durability parameters of lightweight repair mortars. Sustainability (Switzerland). 2021;13(21).

35. Contrafatto L, Lazzaro Danzuso C, Gazzo S, Greco L. Physical, mechanical and thermal properties of lightweight insulating mortar with recycled Etna volcanic aggregates. Constr Build Mater. 2020;240.

36. Gennusa ML, Marino C, Nucara A, Panzera MF, Pietrafesa M. Insulating building components made from a mixture of waste and vegetal materials: Thermal characterization of nine new products. Sustainability (Switzerland). 2021;13(24).

37. Yildiz FK, Kalem MS. Investigation of mechanical, thermal, and acoustic performance of insulation materials containing microwave and ultrasound pretreated coffee wastes and estimation of thermal parameters using artificial neural network. Environ Prog Sustain Energy. 2023 Jul;

38. Panesar DK, Shindman B. The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. Cem Concr Compos. 2012;34(9):982–92.

39. Jiang D, Lv S, Cui S, Sun S, Song X, He S, et al. Effect of thermal insulation components on physical and mechanical properties of plant fibre composite thermal insulation mortar. JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T. 2020 Nov;9(6):12996–3013.

40. Pedroso M, Flores-Colen I, Silvestre JD, Gomes MG, Hawreen A, Ball RJ. Synergistic effect of fibres on the physical, mechanical, and microstructural properties of aerogel-based thermal insulating renders. Cem Concr Compos. 2023;139.

41. Pedroso M, Gomes MDG, Silvestre JD, Hawreen A, Flores-Colen I. Thermophysical Parameters and Hygrothermal Simulation of Aerogel-Based Fibre-Enhanced Thermal Insulating Renders Applied on Exterior Walls. Energies (Basel). 2023;16(7).

42. Kosiachevskyi D, Abahri K, Daubresse A, Prat E, Chaouche M. Assessment of the hygrothermal, microstructural and chemical evolution of a hemp-based cementitious mortar under ETICS total weathering aging protocol. Constr Build Mater. 2022;314.

43. Srikanth G, Fernando A, Selvaranjan K, Gamage JCPH, Ekanayake L. Development of a plastering mortar using waste bagasse and rice husk ashes with sound mechanical and thermal properties. Case Studies in Construction Materials. 2022 Jun 1;16:e00956.

44. Selvaranjan K, Navaratnam S, Gamage JCPH, Thamboo J, Siddique R, Zhang J, et al. Thermal and environmental impact analysis of rice husk ash-based mortar as insulating wall plaster. Constr Build Mater. 2021 May 10;283:122744.

45. Corinaldesi V, Donnini J, Nardinocchi A. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. Constr Build Mater. 2015 Sep 30;94:337–45.

46. Affan H, Arairo W, Arayro J. Mechanical and thermal characterization of bio-sourced mortars made from agricultural and industrial by-products. Case Studies in Construction Materials. 2023;18.

47. Soltan DG, das Neves P, Olvera A, Savastano Junior H, Li VC. Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. Ind Crops Prod. 2017 Sep 1;103:1–12.

48. Barreca F, Fichera CR. Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. Energy Build. 2013 Jul 1;62:507–13.

49. Lertwattanaruk P, Makul N, Siripattarapravat C. Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. J Environ Manage. 2012 Nov;111:133–41.

50. Koksal F, Mutluay E, Gencel O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. Constr Build Mater. 2020 Mar 10;236:117789.

51. Tittarelli F, Giosuè C, Mobili A, Di Perna C, Monosi S. Effect of Using Recycled Instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. Procedia Eng. 2016 Jan 1;161:660–5.

52. Šeputytė-Jucikė J, Sezeman GA, Sinica M, Kligys M, Vaitkus S. IMPACT OF GRANULES FROM CRUSHED EXPANDED POLYSTYRENE PACKAGE ON PROPERTIES OF THERMO-INSULATING PLASTER. JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT. 2014 Jul 4;20(4):581–9.

53. Ferrándiz-Mas V, Bond T, García-Alcocel E, Cheeseman CR. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. Constr Build Mater. 2014 Jun 30;61:285–92.

54. Bicer A, Kar F. The effects of apricot resin addition to the light weight concrete with expanded polystyrene. J Adhes Sci Technol. 2017;31(21):2335–48.

55. Ibrahim OMO, Tayeh BA. Combined effect of lightweight fine aggregate and micro rubber ash on the properties of cement mortar. Advances in Concrete Construction. 2020;10(6):537–46.

56. Letelier V, Bustamante M, Muñoz P, Rivas S, Ortega JM. Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. Journal of Building Engineering. 2021;43.

57. Na O, Xi Y. Mechanical and durability properties of insulation mortar with rubber powder from waste tires. J Mater Cycles Waste Manag. 2017 Apr;19(2):763–73.

58. de Souza Kazmierczak C, Dutra Schneider S, Aguilera O, Albert CC, Mancio M. Rendering mortars with crumb rubber: Mechanical strength, thermal and fire properties and durability behaviour. Constr Build Mater. 2020 Aug 30;253:119002.

59. Meshgin P, Xi Y, Li Y. Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. Constr Build Mater. 2012;28(1):713–21.

60. Wang S, Chen M, Lu L, Zhao P, Gong C. Investigation of the Adaptability of Paper Sludge with Wood Fiber in Cement-Based Insulation Mortar. Bioresources. 2016 Nov;11(4):10419–32.

61. Zhao J, Huang G, Guo Y, Gupta R, Liu WV. Developing thermal insulation cement-based mortars using recycled carbon black derived from scrapped off-the-road tires. Constr Build Mater. 2023;393.

62. Durgun MY. Experimental research on gypsum-based mixtures containing recycled roofing tile powder at ambient and high temperatures. Constr Build Mater. 2021 May 24;285:122956.

63. Coppola B, Courard L, Michel F, Incarnato L, Scarfato P, Di Maio L. Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates. Constr Build Mater. 2018 May 10;170:200–6.

64. Zichella L, Marone P, Buonanno P, D'Amore M, Bellopede R. Silicate Sawing Sludge Recovery in Thermo Eco-Mortar for Macroporous Plaster. Materials. 2020 Mar 13;13(6):1293.

65. Vidales-Barriguete A, Santa-Cruz-astorqui J, Piña-Ramírez C, Kosior-Kazberuk M, Kalinowska-Wichrowska K, Atanes-Sánchez E. Study of the mechanical and physical behavior of gypsum boards with plastic cable waste aggregates and their application to construction panels. Materials. 2021;14(9).

66. NP EN 998-1 2017: especificação de argamassas para alvenarias: parte 1: argamassas para rebocos interiores e exteriores. 2017.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO MOÍDO EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

AMANDA DE OLIVEIRA AGUIAR[1]; NIANDER AGUIAR CERQUEIRA[1]; JONAS ALEXANDRE[1]; AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO[1]

[1]Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes – RJ, 28013-602, niander@uenf.br.

RESUMO

A presente pesquisa aborda a produção de tijolos de solo-cimento, explorando a inclusão de resíduos de tijolos cerâmicos moídos como componente, sendo importânte contribuição na gestão sustentável de resíduos na indústria da construção civil. A metodologia envolve o beneficiamento de resíduos de tijolos e sua incorporação ao tijolo de solo-cimento, sendo estudadas 4 (quatro) formulações diferentes: Tr (referência, com 90% de solo e 10% de cimento), T1, T2 e T3, sendo compostos respectivamente com 10%, 20% e 30% de resíduos de tijolos moídos em substituição ao solo. As amostras foram moldadas e curadas e ensaiadas para avaliar resistência, durabilidade e viabilidade técnica. Os ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água foram realizados aos 7 e 28 dia em 7 corpos-de-prova por composição. As diferenças estatísticas foram comprovadas por meio do teste de comparação de médias, pelo método de Tukey ($p<0,05$) e Análise de Variância. Os resultados revelam que a viabilidade, proporcionando vantagens ambientais e econômicas. As propriedades mecânicas dos tijolos mostram-se satisfatórias, contribuindo também para a redução do impacto ambiental associado à produção de tijolos convencionais, sendo T2 a melhor composição, com resistência de 2,18±0,36 MPa aos 7 dias e 2,43±0,29 MPa aos 28 dias.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Solo-cimento, Resíduo cerâmico, eco-eficiência.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, crucial para a economia global, enfrenta desafios ambientais significativos devido ao seu consumo excessivo de recursos naturais. Prevê-se que o aquecimento global atinja 1,5°C nas próximas décadas, exigindo reduções drásticas de CO2 para mitigar os impactos climáticos. A cadeia fornecedora de insumos, como a indústria cerâmica, também gera resíduos significativos, com até 70% dos resíduos sólidos urbanos originados da construção civil. Esses resíduos cerâmicos triturados, conhecidos como chamote, apresentam potencial para serem incorporados em novas massas cerâmicas, contribuindo para soluções mais sustentáveis na indústria.

Os tijolos de solo-cimento se encaixam no cenário atual como uma opção eco-friendly em comparação aos tijolos convencionais (Sena et al., 2017). Os tijolos convencionais são produzidos a partir de argila, recurso natural extraído de jazidas, além de passar por processo de queima, consumindo grande quantidade de energia e emitindo poluentes na atmosfera. Já os tijolos de solo-cimento, possuem em sua composição uma baixa quantidade de cimento e argila comparada à de areia. Os tijolos de solo-cimento são uma alternativa construtiva promissora, pois são versáteis, dispensam argamassa de assentamento e permitem que as tubulações de elétrica e hidráulica sejam embutidas. Os tijolos são produzidos com solo, cimento e água, podendo incorporar outros materiais sem comprometer suas propriedades.

A mistura solo-cimento é um material versátil aplicável em diversas áreas da construção civil, desde contrapisos até pavimentação, sendo também utilizado na fabricação de tijolos, blocos e paredes monolíticas. Para garantir a qualidade desse material, vários fatores são cruciais, como o tipo de solo utilizado, o método de mistura empregado e o grau de compactação alcançado. Além disso, aspectos como a cura adequada, a densidade e a homogeneização da mistura do solo com o cimento desempenham papéis importantes, conforme destacado por Murmu e Patel (2018) e corroborado por Estabragh et al. (2022).

A estabilização de solos é uma técnica amplamente difundida na construção civil, especialmente quando o solo não possui as propriedades necessárias em termos de resistência e durabilidade. Akinwumi et al. (2016) ressaltam que essa técnica visa melhorar as características do solo, tornando-o adequado para o uso pretendido. Essa melhoria pode ser alcançada por meio de diversas técnicas, agrupadas em categorias como mecânica, granulométrica e química, como detalhadamente discutido por Dulal et al. (2023).

O tijolo de solo-cimento tem como característica baixa porosidade e alta densidade devido à função do empacotamento dos grãos do solo após a compactação (Zhang et al., 2018). O tijolo solo-cimento possui baixo custo de energia na construção (Gandia et al., 2018), demanda menor quantidade de água, possui baixo custo de produção e facilidade de construção. Outra vantagem do tijolo de solo-cimento é a opção de empregá-lo como alvenaria aparente, dispensando processos tradicionais como chapisco, emboço, reboco, massa e pintura, exigindo apenas impermeabilização (Kasinikota e Tripura, 2021, Jayasinghe, Fonseka e Abeygunawardhene, 2016).

De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), os tijolos e blocos devem apresentar alguns requisitos mínimos, conforme apresentano no quadro 1. Os ensaios comumente utilizados na fabricação dos tijolos de solo-cimento são os de resistência à compressão e o de absorção de água, conforme NBR 8492 (ABNT, 2012).

Quadro 1 – Características Técnicas

Classificação	Observações	
Tolerância dimensional	Largura, altura e comprimento	±1mm
Resistência à compressão	Valores médios Valores individuais	≥ 2,0 MPa ≥ 1,7 MPa
Absorção de água	Bloco e tijolo	≤ 20% para valores médios ≤ 22% para valores individuais

Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012).

A incorporação de resíduos de cerâmica vermelha nos tijolos de solo-cimento emerge como uma alternativa viável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Essa abordagem se destaca pela redução do consumo de matéria-prima, atenuando a necessidade de extração, ao mesmo tempo em que previne o descarte inadequado desses resíduos no meio ambiente. (Azevedo et al., 2019)

Tendo em vista o alto potencial do resíduo cerâmico descartado pela indústria ceramista, bem como sua alta disponibilidade no município de Campos dos Goytacazes, RJ / Brasil, esta pesquisa teve como objetivo geral produzir tijolo de solo-cimento incorporando resíduo cerâmico em diferentes porcentagens em substituição do solo e avaliar a influência da sua adição nas propriedades tecnológicas dos tijolos fabricados. Dessa forma, ao abordar este tema, busca-se compreender a melhor utilização de resíduos cerâmicos na confecção de tijolos de solo-cimento, melhorando as propriedades tecnológicas exigidas pelas normas com um material de baixo custo como opção construtiva.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

A pesquisa utilizou solo e resíduo cerâmico doado pela Cerâmica Sardinha, em Campos dos Goytacazes – RJ. O solo foi transportado para o campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), onde foi triturado, seco, peneirado e ensacado. O resíduo cerâmico foi quebrado com martelo e cominuído em moinho de bolas, até atingir a granulometria desejada. Foi utilizado cimento CP V – ARI, da marca Holcin, cujas propriedades são recomendadas pela ABCP para composições de solo-cimento, por atender às especificações físicas e químicas propostas pela NBR 5733 (ABNT, 1991). A escolha do tipo de cimento se deve à capacidade de atingir alta resistência nos primeiros dias de aplicação. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. A água utilizada para confecção dos tijolos foi fornecida pela concessionária local, Águas do Paraíba.

2.2 MÉTODOS

A metodologia da pesquisa consistiu em três etapas que seguiram as indicações normativas brasileiras da ABNT. Na primeira, foi realizada a caracterização física e mineralógica dos materiais, solo e resíduo cerâmico. Em seguida, foram determinadas as composições dos tijolos bem como os

procedimentos de moldagem e cura. Por fim, os ensaios tecnológicos foram executados e analisados, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

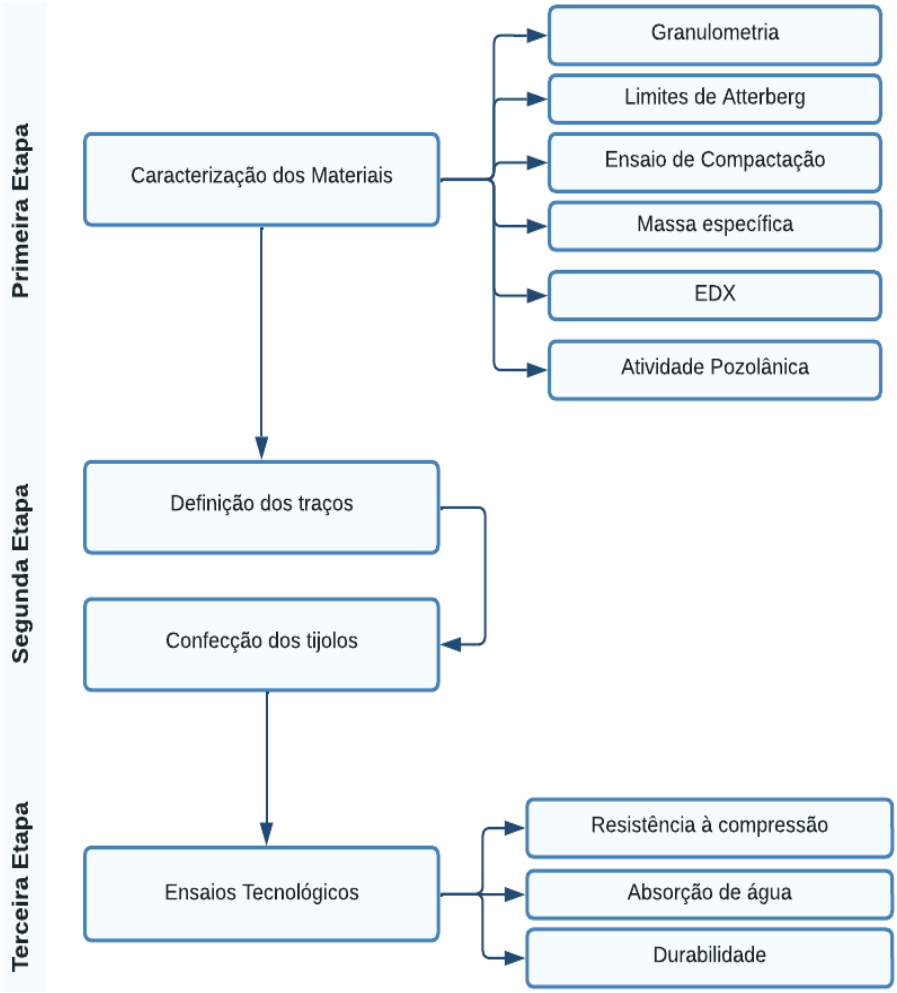


Figura 1 – Metodologia de pesquisa

2.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Na presente pesquisa, foram estudadas 04 formulações diferentes, sendo a primeira utilizada como referência, enquanto nas demais foi realizada a substituição parcial do solo por resíduo cerâmico, conforme demonstrado no quadro 2. O quadro apresenta também os quantitativos de corpos de prova utilizados para a avaliação de cada uma das propriedades tecnológicas avaliadas na presente pesquisa, com indicativo também das normas brasileiras de referência utilizadas para a realização dos respectivos ensaios.

Quadro 2 – Composição e Delineamento Experimental

Massa (%)				Compressão (NBR 8492)		Absorção (NBR 8492)		Durabilidade (NBR 13554)	
Id	Cimento	Solo	Resíduo cerâmico	N.° tijolos	Idades	N.° tijolos	Idades	N.° tijolos	Idades
Tr	10%	90%	-	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7

T1	10%	80%	10%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
T2	10%	70%	20%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
T3	10%	60%	30%	7	7 e 28	3	7 e 28	3	7
Total				56		24		12	
				92					
Legenda: Tr é o traço de referência, T1 possui 10% de resíduo cerâmico em substituição ao solo. T2 possui 20% de resíduo cerâmico em substituição ao solo e T3 possui 30% de resíduo cerâmico em substituição ao solo.									

2.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os tijolos foram moldados em concordância com a NBR 10833 (ABNT, 2012). Foram produzidos 92 tijolos no total e as misturas foram realizadas com a ajuda de um misturador. Eles foram conformados com uma prensa hidráulica, Modelo 7000 Turbo II da marca Ecomáquinas, que produz dois tijolos por prensagem e tem capacidade de compactação de aproximadamente 15 toneladas (Figura 2). Os tijolos possuem dimensões de 30 cm x 15 cm (comprimento e largura) e a altura pode variar entre 7± 1 cm. Possuem 2 furos com 5 cm de diâmetro cada e área útil de 80%. Após a confecção, os tijolos foram transportados para a UENF e armazenados em uma câmara úmida, com auxílio de um borrifador durante 7 dias.

Figura 2 - Prensa Hidráulica 7000 Turbo

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizada a Análise de Variância a fim de conferir a diferença existente significativa entre os resultados obtidos. As diferenças estatísticas foram comprovadas por meio da realização do teste de comparação de médias, pelo método de Tukey ($p<0,05$). Utilizou-se o delineamento experimental DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado) para as variáveis analisadas: resistência à compressão e absorção de água (7 e 28 dias de cura), 7 tijolos para cada traço para o ensaio de resistência, e 3 tijolos para cada traço no ensaio de absorção a água. Já para a durabilidade, foram utilizadas três repetições para cada tratamento para todos os traços, 0, 10%, 20% e 30%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo coletado e analisado apresentou em sua composição as seguintes frações: 37% de areia, 34% de silte e 29% de argila, atendendo assim as prescrições da NBR 10833 (ABNT, 2012), onde o solo deve ser 100% passante na peneira 4,8 mm (nº 4) e 10% a 50% passante na peneira 0,075 mm (nº 200). No entanto, não atende as recomendações da Associação Brasileira de Cimento Pórtiland (ABCP, 2000), que recomenda uma distribuição granulométrica com teor de argila entre 10 e 20%, fração silte de 10 a 20% e fração areia entre 50 e 70% para fabricação de tijolos de solo-cimento. Sendo assim, o solo sofreu correção granulométrica, seguindo os parâmetros de Silva (2021) para atingir a curva teórica ideal. O quadro 3 apresenta os valores de granulometria obtidos após a correção para as misturas de solo com areia e o resíduo cerâmico.

Quadro 3 - Granulometria dos traços definidos

Traço	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Tr	54,2	16,0	29,8
T1	56,5	24,1	19,4
T2	59,1	25,9	16
T3	68,6	19,3	12,1

Os resultados da avaliação da massa específica aparente seca e da umidade ótima, conforme quadro 4, indicaram que à medida que a quantidade de resíduo aumentou, houve um aumento na umidade ótima de compactação e uma diminuição na massa específica aparente. O resíduo cerâmico não possui propriedades plásticas, a adição de água durante o processo de compactação resultou em uma diminuição da massa específica.

Quadro 4 - Teor de umidade e densidade máxima

Composição	Massa específica aparente seca ($g.m^{-3}$)	Umidade (%)
Tr	1,74	16,5
T1	1,68	18,6
T2	1,59	19,1
T3	1,52	20,0

Na figura 3 são apresentadas as curvas de compactação das misturas, com a definição da umidade ótima.

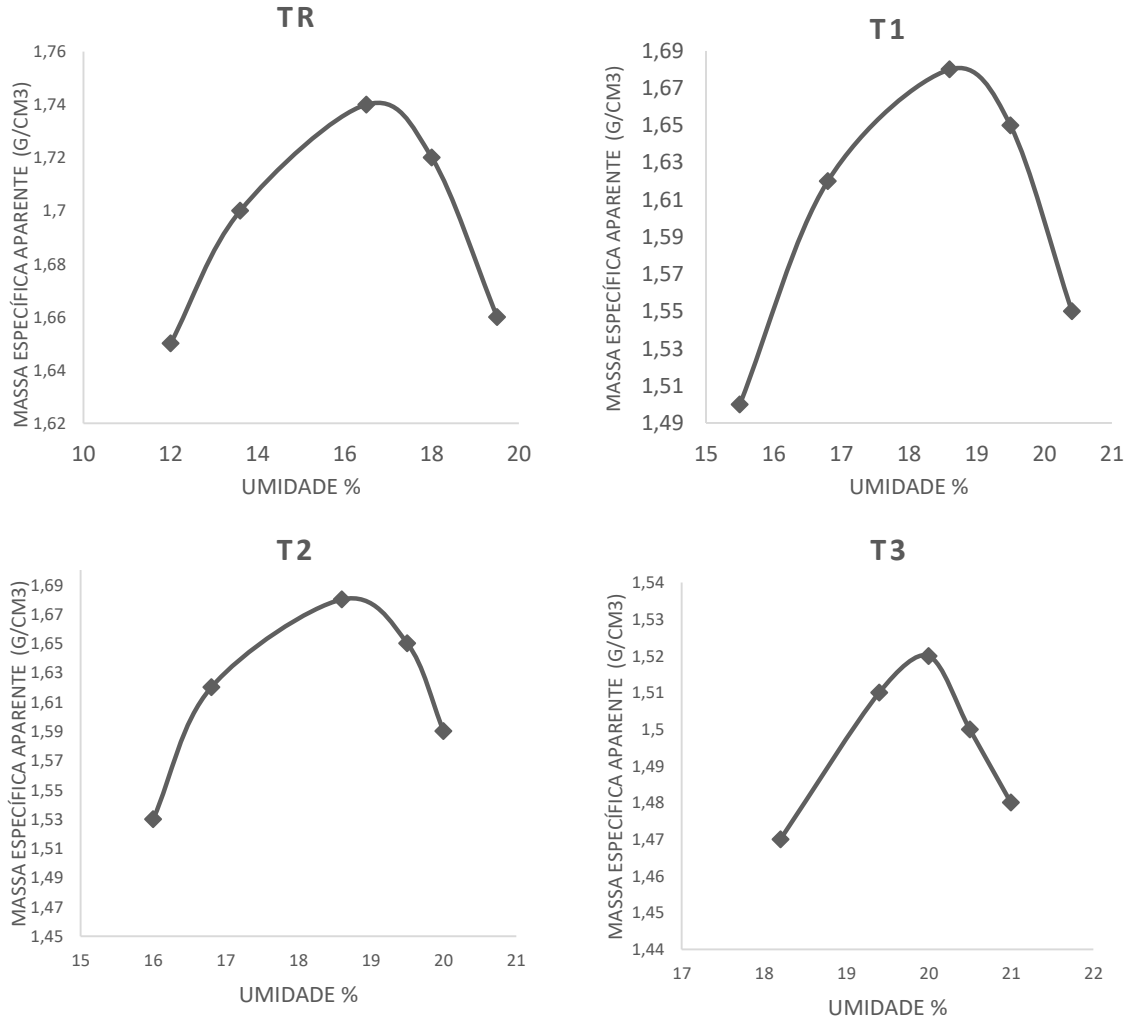


Figura 3 - Curvas de compactação das misturas

Através das curvas de compactação das misturas, é possível observar que ocorreu um aumento na umidade ótima de compactação e redução da densidade aparente máxima. Isso se deve à característica não plástica do chamote diferença entre os traços possui relação à substituição do chamote, a medida que o teor do resíduo aumenta, mais difícil fica de atingir a umidade ótima, ou seja,

No quadro 5 são apresentados os valores obtidos na avaliação das composições de solo utilizados na pesquisa, sendo verificada uma redução nos valores dos limites com o aumento do percentual de resíduo adicionado. Isso se deve ao fato do resíduo cerâmico ser um material não plástico.

Quadro 5 - Limites de Plasticidade e Liquidez

	LL	**LP**	**IP**
Solo	41,9%	20,1%	21,80%
Resíduo	N/P	N/P	N/P
T10	36,7%	19,3%	17,4%
T20	35,6%	18,4%	17,2%
T30	33,6%	18,1%	15,5%

Conforme estabelecido pela NBR 10833 (ABNT, 2012), o limite de liquidez deve ser igual ou inferior a 45% e o Índice de Plasticidade menor ou igual a 18%. Obteve-se para o solo um Limite de Liquidez igual a 31,5% e Índice de Plasticidade 13,2%. Os resultados obtidos atendem às recomendações da norma bem como de estudos apresentados por Murmu e Patel (2018) e Ferreira et al. (2018), os quais sugerem que o índice de plasticidade deve estar entre 15% e 25%.

A massa específica real dos grãos da amostra de solo foi determinada através da picnometria, o valor de 2,69 g/cm³ foi obtido. Já a massa específica do resíduo cerâmico foi de 2,72 g/cm³.

A composição química dos materiais utilizados é apresentada no quadro 6. Pode-se observar nos resultados obtidos que há elevado teor de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e baixo teor de óxidos fundentes (K_2O e Na_2O), o que pode caracterizá-los como material oriundo de argila caulinítica. Já o teor de Fe_2O_3 lhes confere a cor avermelhada (Vieira et al., 2006). O autor também afirma que a presença de caulinita sugere que a temperatura de queima não foi superior a 600° C.

Quadro 6 - Espectroscopia de raio-x

Composição (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	SO_3	CaO	MnO
Solo	47,423	33,216	10,172	1,906	5,888	1,938	1,105	0,127
Chamote	51,488	33,776	8,675	1,523	2,424	1,353	0,555	

O ensaio de atividade pozolânica foi realizado através do Método de Luxán no Laboratório de Engenharia Civil. Para que o material seja pozolânico, o resultado dever ser maior que 1,2 mS/cm; o valor obtido foi de 0,76 (mS/cm), sendo considerado de média pozolanicidade.

Outro ensaio para avaliação de atividade pozolânica realizada foi por meio do Método Chapelle modificado, realizado na UENF, que considera o material com baixa pozolanicidade quando o consumo é abaixo de 330mg CaO/g. O resíduo cerâmico apresentou um valor de 197,00 mg CaO/g na amostra, logo, pode-se concluir que se trata de um material sem ou baixa atividade pozolânica.

Os tijolos de solo-cimento com incorporação do resíduo cerâmico foram submetidos ao ensaio de resistência simples à compressão, conforme NBR 8492 (ABNT, 2012). Os resultados obtidos são apresentados no quadro 7 e na figura 4. É possível observar que todos os tijolos atendem à norma supracitada, que preconiza o mínimo de 1,7 MPa individual e média de 2 MPa. Já a NBR 13553 (ABNT, 2012) estabelece o mínimo de 1 MPa para materiais utilizados na construção de paredes de solo-cimento sem funcionalidade estrutural. Após análise, pode observar que as composições apresentaram valores médios acima das normas relacionadas, assim como aumentaram a resistência do sétimo para o vigésimo oitavo dia. É possível observar que aos 28 dias de cura, todos os traços aumentaram sua resistência. O T2 obteve um ganho de 11,46% aos 28 dias em relação à cura de sete dias.

Quadro 7 - Resistência à compressão Simples

Composição	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Tr	2,25 (±0,32)	2,70 (±0,24)
T1	1,90 (±0,22)	2,25 (±0,38)
T2	2,18 (±0,36)	2,43 (±0,29)
T3	1,87 (±0,21)	1,99 (±0,29)

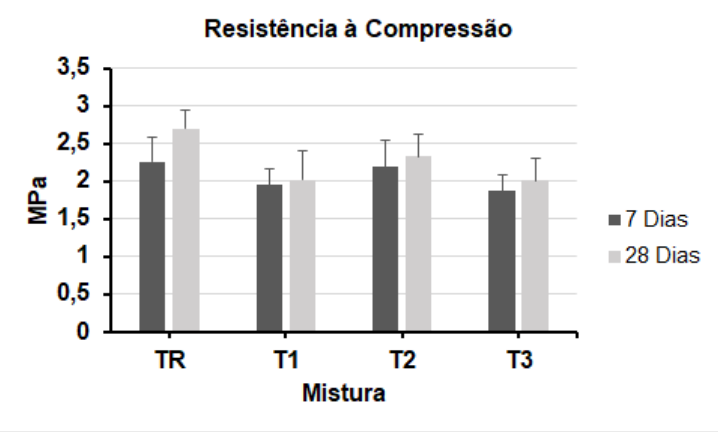


Figura 4 - Valores médios do ensaio de resistência à compressão

A composição T2 com 20% de substituição de solo por resíduo cerâmico apresentou a maior média para 7 e 28 dias em comparação com os demais traços com substituição de solo por resíduo cerâmico. O aumento da resistência nesse traço pode ser explicado pelo efeito do empacotamento das partículas. É possível observar o ganho de resistência em relação ao tempo de cura para todas as misturas, conforme análise ANOVA (quadros 8 e 9).

Quadro 8 - Anova para resistência aos 7 dias de cura

FV	GL	SQ	QM	$F_{Tabelado}$	$F_{calculado}$	Teste
Tratamentos	3	0,7222	0,2407	F (3,24) = 2,916	0,0549	Insignificante
Resíduo	24	1,981	0,08256	-	-	-
Total	27	2,704	-	-	-	-

Para Amaral (2016), Llajaruna (2016) e Junior (2011), a resistência mecânica está intrinsicamente ligada à absorção de água, relacionando que quanto maior a resistência mecânica, menor é a absorção de água.

Quadro 9 - Anova para resistência aos 28 dias de cura

FV	GL	SQ	QM	$F_{Tabelado}$	$F_{calculado}$	Teste
Tratamentos	3	2,225	0,7418	F (3,24) = 7,985	0,0007	Significante
Resíduo	24	2,230	0,09290	-	-	-
Total	27	4,455	-	-	-	-

O ganho de resistência pode ser explicado por um melhor empacotamento da matriz, o que ocasiona uma redução da porosidade aberta do material devido ao efeito fíler do resíduo. A redução de resistência no T3 pode ser atribuída à desestabilização granulométrica da matriz.

O ensaio de absorção de água foi realizado para cada traço dos tijolos aos 7 e 28 dias. Os resultados de absorção de água não devem apresentar média dos valores maior que 20% e individuais superiores a 22%, de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012). É possível observar na figura 5 e no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que todos os traços atendem à norma referida.

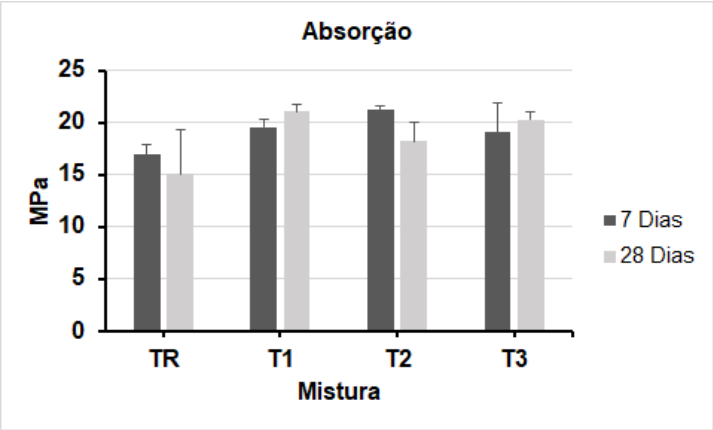


Figura 5 - Valores médios de absorção de água de todos os traços aos 7 e 28 dias

Quadro 10 – Absorção de Água

Composição	Cura	
	7 dias	28 dias
Tr	17,73% (±1,01)	17,32% (±4,27)
T1	19,11% (±0,78)	19,16% (±0,78)
T2	19,85% (±0,36)	19,69% (±0,28)
T3	18,72% (±0,21)	18,66%(±0,29)

O tempo de cura apresenta influência nos parâmetros de absorção, os tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico apresentaram maior absorção aos traços T1 e T2 aos 28 dias. A partir dos resultados demonstrados acima, observa-se que a incorporação do resíduo cerâmico aumenta a absorção de água, excetuando T2, que apresentou uma redução na absorção.

Reddy e Latta (2014) observaram um aumento na absorção de água quando substituíram um solo com pó de pedra arenoso por um pó de pedra com fração maior de silte.

O ensaio de durabilidade modificado por ciclos de molhagem e secagem foi executado em doze ciclos após os sete dias de cura (Figura 6).

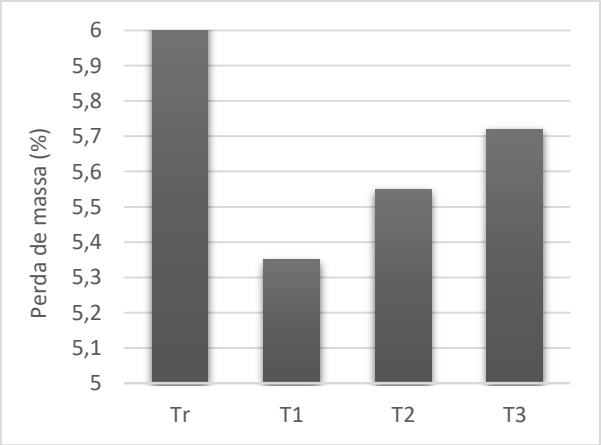


Figura 6 - Valores - Durabilidade

Todos os traços apresentaram valores de perda de massa abaixo de 10%, de acordo com o prescrito na NBR 13554 (ABNT, 2012). Para Silva et al. (2014), baixos valores de perda de massa podem estar relacionados a uma boa compactação, proporcionando a estabilização mecânica e a estabilização química, esta última devido às reações cimentícias.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais desta pesquisa, pode-se concluir que o solo utilizado para os tijolos de solo-cimento atendeu aos parâmetros necessários. Quimicamente, o solo era composto principalmente por sílica, alumina e hematita, enquanto fisicamente foi classificado como arenoso. O resíduo cerâmico, por sua vez, revelou uma composição química com predominância de sílica e uma quantidade considerável de óxido de cálcio, óxido de potássio, hematita e alumina. Fisicamente, apresentou um alto teor de silte.

Em relação à umidade e à energia de compactação, o traço de referência mostrou uma maior umidade ótima e densidade aparente. Quando incorporado ao solo-cimento, os tijolos alcançaram média de resistência à compressão compatível com as normas, excedendo o mínimo sugerido pela NBR 13553 (ABNT, 2012), para alvenarias sem fins estruturais. O T2 destacou-se com médias superiores aos demais, tanto aos 7 quanto aos 28 dias.

Todos os tijolos fabricados apresentaram absorção de água abaixo do limite estabelecido pela NBR 8491 (ABNT, 2012), além de atenderem aos critérios de durabilidade das normas vigentes. A utilização do tijolo de solo-cimento com incorporação do resíduo cerâmico oferece vantagens econômicas e ambientais, visto que o resíduo pode ser empregado como matéria-prima alternativa de baixo.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. Guia básico de utilização do cimento Portland. BT-106, 7. ed., São Paulo: 2002. 28p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. NBR 8492 - Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. NBR 10833 - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. NBR 13553 - Materiais para emprego em parede monolítica de solo- cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. NBR 13554 – Solo-Cimento –Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

Akinwumi, I. I., Ojuri, O. O., Edem, D., & Ogbiye, A. S. (2016). Sawdust stabilization of lateritic clay as a landfill liner to retain heavy metals. In Geo-chicago 2016 (pp. 478–487).

Amaral, M. C. (2016) Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento. Tese (Doutorado em Engenharia e

Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Azevedo, A. R. G., Marvila, T. M., Júnior Fernandes, W., Alexandre, J., Xavier, G. C., Zanelato, E. B., Cerqueira, N. A., Pedroti, L. G., & Mendes, B. C. (2019). Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. Journal of Building Engineering, 23, 334–340. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.02.012

Dulal, P., Maharjan, S., Timalsina, M. P., Maharjan, Y., Giri, A., & Tamang, A. (2023). Engineering properties of cement-stabilized compressed earth bricks. Journal of Building Engineering, 77, 107453. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107453

Estabragh, A. R., Jahani, A., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2022). Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. International Journal of Pavement Engineering, 23(2), 160–170.

Ferreira, D., Luso, E., & Cruz, M. (2018). Blocos ecológicos de solo-cimento com incorporação de resíduos. REHABEND 2018-CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT.

Gandia, R. M., Campos, A. T., Corrêa, A. A. R., & Gomes, F. C. (2018). Energy costs comparison of masonry made from different materials. Theoretical and Applied Engineering, 2(1).

Jayasinghe, C., Fonseka, W. M. C. D. J., & Abeygunawardhene, Y. M. (2016). Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. Construction and Building Materials, 102, 471–477. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.136

JÚNIOR, D. S. N. (2016) Produção de blocos prensados e de encaixe com pó de pedra do beneficiamento de rochas calcárias. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2021). Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. Construction and Building Materials, 280, 122520. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520

LLAJARUNA, M. A. V. (2016) Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de mármore e resíduo de construção. Dissertação (Engenharia civil) Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 75p

Murmu, A. L., & Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. Construction and Building Materials, 165, 112–125.

Sena, R. J., Laursen, A., & Silva, J. S. da. (2017). Avaliação mecânica de tijolo maciço solo-cimento contendo resíduo de PET. Veredas FAVIP: Revista Eletrônica de Ciências e Cultura.

Vieira, C. M. F., & Monteiro, S. N. (2006). Effect of the Particle Size of the Grog on the Properties and Microstructure of Bricks. Materials Science Forum, 530–531, 438–443. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.530-531.438.

Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. Construction and Building Materials, 188, 1101–1118.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS COLANTES INCORPORADAS COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

MARILUCIA DOS SANTOS SILVA[1]; JONAS ALEXANDRE[1]; NIANDER AGUIAR CERQUEIRA[1]; AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO[1]; EUZÉBIO BERNABÉ ZANELATO[2]

[1]Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes – RJ - CEP: 28013-602, niander@uenf.br

[2]Instituto Federal Fluminense (IFF), Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, RJ - CEP: 28030-130.

RESUMO

As argamassas colantes são materiais de construção constituídos a partir da mistura de cimento Portland, agregado miúdo e aditivos químicos, que misturados com água, formam uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas ou pedras de revestimento. São classificados ainda por sua aplicabilidade em argamassas do tipo ACI, ACII ou ACIII. Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da produção de argamassas colantes com resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais, este trabalho foi desenvolvido considerando a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos do beneficiamento das rochas ornamentais produzidas pela empresa Santa Alice Granitos, localizada no estado do Espírito Santo. O traço utilizado para confecção das argamassas colantes foi 1:2 e as proporções de substituição em massa do agregado miúdo pelo resíduo, foram realizadas nas porções de 0%, 10%, 20% e 30%. As principais propriedades que foram analisadas no estado fresco foram a densidade de massa, o teor de ar incorporado, a retenção de água e o deslizamento. Os resultados obtidos com o programa experimental, indicaram uma redução gradual no percentual de ar incorporado e um aumento na densidade de massa das argamassas com o incremento de finos as misturas.

Palavras-chave: Argamassa colante, agregado miúdo, resíduo de rocha ornamental

1. INTRODUÇÃO

As argamassas possuem diversas aplicabilidades no setor de construção civil, podendo ser confeccionadas no local de aplicação ou adquiridas pré-doseadas. É fundamental a escolha da argamassa mais adequada para cada situação específica, devido à necessidade de compatibilização com outros elementos construtivos (Travincas *et al*. 2023).

As argamassas utilizadas para assentamento de placas cerâmicas ou pedras de revestimento, são denominadas argamassas colantes, materiais de construção constituídos a partir da mistura de aglomerantes hidráulicos, agregados minerais e aditivos que possibilitam quando preparada em obra com adição exclusiva de água, a formação de uma massa viscosa, plástica e aderente. Para sua aplicação é necessário a utilização de desempenadeiras denteadas, e sua aplicação ocorre em uma camada relativamente fina quando comparada as argamassas convencionais (Fiorito, 2010.; Modler *et al*. 2021; ABNT NBR 14081, 2012).

As argamassas colantes são normalizadas no Brasil por meio da NBR 14081-1 (ABNT, 2012) e classificadas por sua aplicabilidade na construção civil em argamassas do tipo AC I, AC II e AC III. Tendo como características principais das argamassas colantes o tempo em aberto, resistência à aderência e deslizamento.

Com o processo de verticalização acelerado nos grandes centros urbanos demanda do setor da construção civil novas metodologias que sejam capazes reduzir prazos de execução, custo de implantação, sem perder a qualidade do ativo construído. Diante desse cenário, a utilização de revestimentos cerâmicos nas fachadas das edificações se tornou uma alternativa viável tecnicamente e economicamente o que ocasionou um aumento na demanda de argamassas colantes para suprir as necessidades do mercado em pleno desenvolvimento. Vale ressaltar que os revestimentos cerâmicos ou pedras de revestimento são utilizados tanto pelo efeito estético quanto pela durabilidade e resistência. No entanto, é fundamental buscar novas tecnologias e metodologias construtivas que sejam capazes de proporcionar um maior ganho de resistência, uma vez que, as fachadas das edificações sofrem diversas solicitações físicas e mecânicas causadas pelas variações de temperatura durante o dia, decorrentes da insolação, do vento e das chuvas (Ribeiro *et al*. 2023).

Em decorrência das solicitações físicas, mecânicas, metodologia de aplicação e especificidade do material ligante, diversas patologias podem surgir nas fachadas das edificações ocasionando problemas estéticos e de segurança em virtude do desprendimento de placas cerâmicas.

Com isso, a explorar novas tecnologias para serem empregadas no setor de construção civil, visando melhorar as propriedades do material utilizado, proporcionando maior durabilidade e contribuindo para desenvolvimento sustentável se fazem necessário. Uma vez que, esse mesmo ramo da indústria é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos sólidos que não possuem uma atividade prática definida, como por exemplo os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais e que apresentam características físicas e químicas propícias a ser empregado na produção de argamassas e concretos.

2. DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do programa experimental, foi escolhido o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018).

Os aditivos químicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa foram o éter de celulose (HEC) e o polivinil álcool (PVA). Ambos os materiais foram utilizados com o objetivo de melhorar o desempenho das argamassas colantes no estado fresco e endurecido.

O agregado miúdo utilizado para o desenvolvimento das argamassas foi a areia natural e lavada do Rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes – RJ e passada na peneira #16 (1,18 mm), sendo caracterizada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022b) como areia média.

O resíduo de rocha ornamental utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi proveniente da empresa Santa Alice Granitos, localizada no município de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo.

2.2 COMPOSIÇÃO

A composição ou traço utilizado para a confecção das argamassas colantes foi de 1:2 em massa de cimento e agregado, com uma relação água/cimento fixa para todos os teores de substituição de 0,9. A escolha do traço se deu por ser o usualmente aplicado para produção de argamassas colantes, corroborando também com o trabalho desenvolvido por Azevedo *et al*. (2018). Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram avaliados os efeitos da substituição parcial da areia pelo resíduo do beneficamente de rochas ornamentais. O estudo experimental foi realizado com as proporções de substituição em massa do agregado miúdo nas porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%. O percentual de aditivos químicos PVA e HEC utilizado na confecção das argamassas foi de 2,5% em relação a massa do cimento de cada aditivo, para cada teor de substituição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios para determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas colantes foram realizados seguindo os procedimentos indicados na NBR 13278 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado são apresentados na Figura 1.

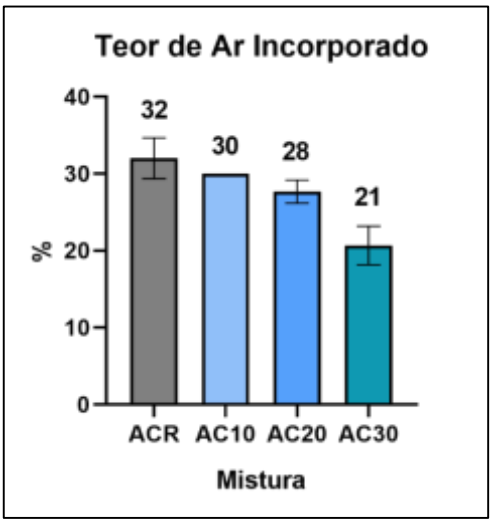


Figura 1: Resultados do ensaio de teor de ar incorporado

É possível observar que ocorreu uma redução gradual no percentual de teor de ar incorporado das misturas após o incremento de resíduo de rochas ornamentais. A ACR apresenta um teor de ar incorporado de 32% em contrapartida as AC20 e AC30 apresentam um teor de ar incorporado de

28% e 21% respectivamente. Esse comportamento das misturas pode ser explicado pelo incremento de percentual de finos as misturas. Fato que tende a corroborar com o comportamento já esperados para essas argamassas, e vale destacar que a AC30 foi a que representou o menor teor de ar incorporado entre as misturas ensaiadas.

A seguir são apresentados na Figura 2 os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa.

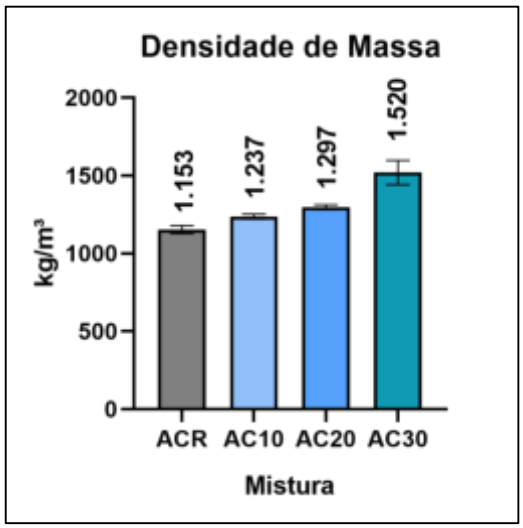


Figura 2: Resultados do ensio de densidade de massa

Os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa mostram que ocorreu um gradual aumento no valor da densidade de massa entre a ACR e as AC10, AC20 e AC30. Foi possível observar que AC30 apresentou a maior densidade de massa, com 1.520 kg/m³ em contrapartida, foi o traço que apresentou o menor índice de teor de ar incorporado.

Após a análise dos resultados obtidos, foi possível observar que existe uma correlação entre os resultados obtidos para ambos os ensaios das argamassas colantes estudadas. Os resultados das propriedades analisadas se devem ao fato de que com o incremento de material de granulometria mais fina, os espaços vazios antes existentes são preenchidos por esse material e consequente ocorre um aumento na densidade de massa das misturas.

O teor de ar incorporado das argamassas é uma propriedade importante que está inteiramente ligada as areias residuais, as taxas de substituição e da capacidade de ligação em relação à quantidade de finos presentes (Kherraf *et al.*, 2022).

De fato, o comportamento apresentado nos resultados desse experimento indica que a adição de material de granulometria fina, é capaz de preencher os espaços vazios presentes nas argamassas. Correlacionado com os resultados do ensaio de densidade de massa, onde as argamassas obtiveram um ganho de densidade de massa com o incremento do percentual de resíduo incorporado a mistura ensaiada.

O ensaio de retenção de água foi realizado seguindo a metodologia presente na NBR 13277 (2016). Os resultados obtidos após a execução do ensaio estão disponíveis na Figura 3.

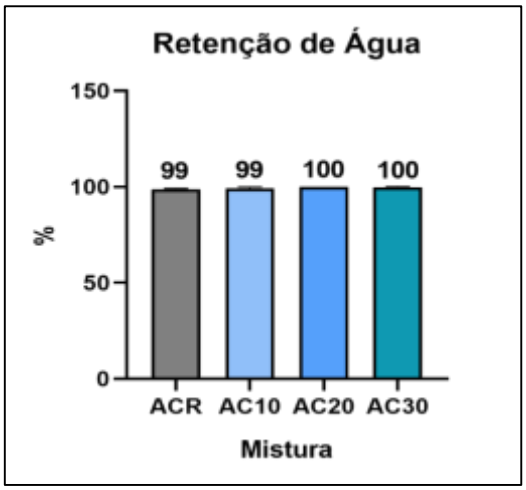


Figura 3: Resultados do ensaio de retenção de água

Os resultados obtidos indicam que não ocorreram mudanças significativas nessa propriedade. Foi possível observar que os menores valores de retenção de água foram obtidos na ACR e na AC10, no entanto, os valores de retenção de água para as AC20 e AC30 se mantiveram constantes, sofrendo apenas um leve aumento quando comparado a ACR e AC10. Sendo assim, podemos identificar que as argamassas AC20 e AC30 são as que reterão maior quantidade de água.

Tal comportamento pode ser explicado, pela incorporação de finos na argamassa, consequentemente com maior área superficial, fazendo com que a mistura retenha maior quantidade de água.

Botelho *et al*. (2023) ressaltam em sua pesquisa que partículas menores possuem uma área superficial específica maior. Isso resulta em um sistema de poros mais fino, resultando em maior absorção e menor permeabilidade.

O ensaio de deslizamento foi realizado seguindo os procedimentos indicados na NBR 14081-5 (ABNT, 2012). Os resultados obtidos com a execução do ensaio estão indicados na Figura 4.

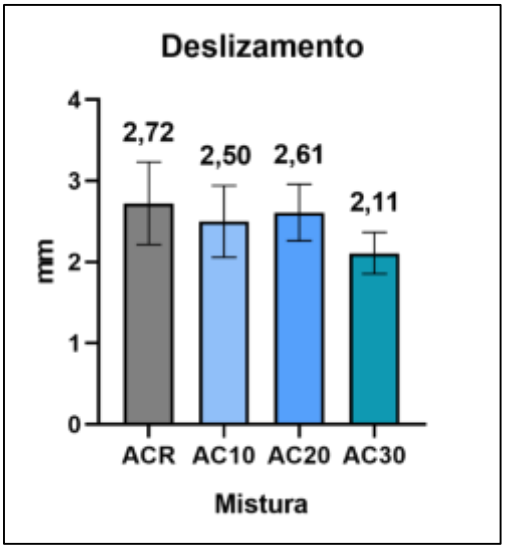


Figura 4: Resultados do ensaio de deslizamento

Os resultados obtidos com o ensaio de deslizamento indicam que nenhuma das argamassas ensaiadas conseguiu alcançar o nível exigido pela NBR 14081-4 (2012), que estabelece que o deslizamento deve ser inferior ou igual a 2 mm. No entanto, a argamassa AC30 foi a que apresentou o menor deslizamento quanto comparada às outras argamassas, com um deslocamento médio de 2,11 mm (77,86% do valor obtido para a argamassa de referência), valor considerado próximo aos parâmetros exigidos pela norma. Um ponto importante observado foi que a ACR foi a que apresentou o maior deslizamento, com 2,71 mm e que após o incremento de resíduos as misturas ocorreu uma redução considerável no valor desse deslizamento.

4. CONCLUSÕES

O material desempenhou eficazmente sua função como agregado miúdo na produção de argamassas colantes. A adição do resíduo de rochas ornamentais gradualmente reduziu o teor de ar incorporado na mistura.

Aumentar a proporção de substituição do agregado miúdo pelo resíduo diminuiu o deslizamento das argamassas testadas. Embora as argamassas não tenham atingido o deslizamento máximo permitido de 2 mm conforme a norma, aquela com 30% de substituição alcançou 2,11 mm, próximo ao valor exigido.

Houve uma correlação entre os resultados dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado. Em geral, as argamassas contendo 30% de resíduo de rocha ornamental apresentaram resultados satisfatórios ao término da pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 14081-1: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 14081-4: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação a resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 14081-5: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 5: Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 17054: Determinação da composição Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Téncicas (ABNT). NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2016.

Azevedo, A. R. G., França, B. R., Alexandre, J., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., Xavier, G. C, (2018) Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil

construction, Journal of Building Engineering. 342–348. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.026.

Botelho, L. C. G., Xavier, G. C., Paes, A. L. C., Azevedo, A. R. G. (2023) Lime replacement by finely ground clay from the north fluminense region of RJ in mortar for coating walls and ceilings, Journal of Materials Research and Technology Open access, 5105-5114. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.058.

Fiorito, A. J. S. I. Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução. 2. ed. São Paulo: PINI, 2010. 232p.

Kherraf, L., Hebhoub, H., Abdelouahed, A., Boughamssa, W. (2022) Comparative study on the performance of sand-based mortars from marble, floor tile and cinder block waste. Journal of Building Engineering, 103433. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103433.

Modler, L. E. A., Mahamad, G., Lubeck, A. (2021) Hardening process of polymeric adhesive mortars: Approach by phase angle analysis from oscillatory rheometry. Construction and Building Materials, 121521. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121521.

Ribeiro, R. P., Sichieri, E. P., Alves, D. T., Xavier, G. C., Azevedo, A. G., Monteiro, S. N. (2023) Adherence of Brazilian dimension stones by mortar adhesion: influence of temperature. Journal of Materials Research and Technology, 8547-8557. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.042.

Travincas, R., Torres, I., Flores-Colen, I., Francisco, M., Bellei. (2023) The influence of the substrate type on the performance of an industrial cement mortar for general use. Journal of Building Engineering, 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106784.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO SOB COMPRESSÃO E FLEXÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA DE TIJOLOS CERÂMICOS REFORÇADA COM ARGAMASSA COM FIBRA DE JUTA

Lidianne do Nascimento Farias[a]; Paulo Roberto Lopes Lima[ab]; Romildo Dias Toledo Filho[a]

[a]NUMATS, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: lidianne.farias@coc.ufrj.br

[b]PPGECEA, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, e-mail: prllima@uefs.br

[a]NUMATS, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: toledo@coc.ufrj.br

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo estudar a influência de fibras de juta como reforço de prismas de alvenaria. Para este fim, foi desenvolvido um programa experimental baseado na avaliação da influência de argamassas fibrosas sobre a resistência à compressão e resistência à flexão de prismas de alvenaria construídos com unidades de alvenaria de tijolos cerâmicos maciços. Foram construídos 16 prismas de alvenaria, e para revestimento dos provetes utilizou-se uma argamassa com teores de fibras de juta entre 0%, 2% e 4% em volume, em um comprimento de fibra de 40 mm. Os resultados mostraram que os prismas com reforço da argamassa fibrosa obtiveram um aumento considerável na resistência, principalmente quando se diz respeito ao ensaio de flexão de quatro pontos realizado. Prismas com 2% de fibras de juta na sua composição chegaram em um aumento de até 38% na flexão, enquanto as argamassas fibrosas com 4% em volume de fibra obtiveram um incremento na tensão de flexão em torno de 69%, com relação aos prismas sem reforço. Esse avanço na flexão reflete no aprimoramento da capacidade de absorção de energia das amostras reforçadas, que alcançou um consumo de energia entre 5 e 6 vezes maior que as amostras sem reforço. No entanto, com relação à resistência à compressão, este ensaio pode não ser o melhor método para avaliação de prismas de alvenaria, mas os resultados revelaram diferentes modos de ruptura entre a alvenaria sem reforço e reforçada, o que pode indicar uma potencial contribuição da fibra na forma de ruptura dos provetes reforçados. Portanto, argamassas fibrosas devem ser avaliadas como um possível reforço de alvenarias em situações de risco.

Palavras-chave: Fibras vegetais, Argamassas reforçadas com fibras, Compósitos, Reforço de alvenarias.

1 INTRODUÇÃO

As construções antigas dependem de alvenaria para resistir às forças atuantes, mas são altamente suscetíveis à fissuração devido à ação de forças dinâmicas, retração por secagem ou deformação das fundações de suporte. Além disso, a alvenaria experimenta uma redução na resistência do material devido à perda gradual de durabilidade causada pelo intemperismo ao longo dos anos. Isso impulsiona a adaptação de edifícios históricos como forma de prolongar a sua vida útil (Vicente et al. 2018).

A restauração da capacidade de suporte de carga de uma estrutura pode ser alcançada com a aplicação de uma camada de argamassa reforçada com tecido (ART), técnica que tem sido amplamente adotada devido à sua boa compatibilidade física e aderência com diferentes substratos de alvenaria. Essa propriedade reduz o risco de delaminação, permitindo que o ART supere uma das principais limitações do uso do polímero reforçado com fibras (PRF), outra técnica comumente aplicada em armaduras de alvenaria (Soleymani et al. 2023; Torres et al. 2021). No entanto, o sistema PRF requer cuidados adicionais para garantir que o tecido esteja perfeitamente posicionado sobre toda a superfície, sem rugas ou dobras, o que possibilita o uso de parafusos e pinos de ancoragem ou a utilização de mão de obra adicional para posicionamento manual do tecido durante a aplicação.

O uso de argamassa reforçada com fibras curtas pode ser um processo alternativo para retrofit de alvenarias, onde o material de reforço é aplicado diretamente na parede usando técnicas tradicionais de reboco. Além da facilidade de aplicação, a distribuição de fibras curtas em várias direções permite o controle de microfissuras em múltiplas direções. Sevil et al. (2011) demonstraram a eficiência do uso de argamassas curtas reforçadas com fibras de aço para aumentar a resistência e a dureza em paredes ocas de tijolos.

Além da busca por soluções mais otimizadas para retrofit, uma necessidade na indústria da construção civil é a implementação de soluções mais sustentáveis para reforço de alvenaria. Dentro deste contexto, vários pesquisadores têm avaliado a substituição do reforço de fibras fabricadas por fibras vegetais. Foram avaliados fios e tecidos de sisal (de Carvalho Bello et al. 2019), linho (Cevallos et al. 2015), juta (Madhavi et al. 2021) e cânhamo (Menna et al. 2015). Os resultados indicam que o uso de tecidos vegetais pode melhorar a resistência, a deformabilidade e o comportamento de compressão diagonal quando comparados a paredes não reforçadas. O potencial de utilização de compósitos reforçados com fibras vegetais curtas como reforço para alvenaria foi identificado por Broeren et al. (2017) com base em resultados mecânicos de compósitos reforçados com fibras de sisal. De fato, a introdução de fibras vegetais curtas em compósitos cimentícios promove um aumento da resistência à flexão e tenacidade, possibilitando sua aplicação em elementos estruturais construtivos (Vailati et al. 2021; Lima et al. 2018).

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho mecânico da alvenaria cerâmica reforçada com argamassa reforçada com fibras de juta. Para garantir a durabilidade do sistema de reforço, as fibras de juta foram submetidas ao tratamento alcalino com hidróxido de cálcio. Argamassas reforçadas com teores de fibra de juta de 2% e 4%, com comprimento de 40 mm, foram produzidas e aplicadas em corpos de prova de tijolos cerâmicos maciços, estes submetidos aos ensaios de compressão, de acordo com a ASTM C1314-16 (2023), e flexão de alvenarias, com base na ASTM E518-15 (2021).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 FIBRAS DE JUTA

Para reduzir a absorção de água da fibra de juta e melhorar a interface fibra-matriz, foi realizado um tratamento alcalino nas fibras seguindo o método de Ferreira et al. (2015); as fibras foram imersas em solução de $Ca(OH)_2$ a 0.73% a uma temperatura controlada de 23°C por 50 minutos. Posteriormente, as fibras secas foram expostas ao ar em câmara de fluxo forçado de ar a 40°C por 72 horas. Como o objetivo deste trabalho é utilizar fibras dispersas aleatoriamente na matriz, as fibras foram cortadas com lâmina metálica nos comprimentos de 40 mm (Figura 1). As fibras de juta utilizadas no estudo apresentaram uma resistência à tração média de 250.78 ± 57.99 MPa e 30.29 ± 9.21 GPa quanto ao módulo de elasticidade, após serem tratadas em meio alcalino.

Figura 1 – Fibras de juta cortadas em 40 mm

2.2 ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE JUTA

A matriz de argamassa foi produzida com uma relação mistura/areia de 1:2 em massa e uma relação água/aglomerantes de 0.60. Foram produzidas argamassas de referência e argamassas reforçadas com teores de juta de 2% e 4%, em massa, com as proporções entre os componentes apresentadas na Tabela 1. A mistura é composta por cimento Portland (massa específica: 3.05 g/cm³), metacaulim (massa específica: 2.71 g/cm³) e cinza volante (CV, massa específica: 2.15 g/cm³), que foram utilizados em proporções de 50%, 30% e 20%, respectivamente. Aditivos químicos foram incorporados para garantia da homogeneidade da mistura, mesmo com maior teor de fibras: i) Aditivo superplastificante (SP), ii) Agente modificador de viscosidade (VMA). A areia utilizada foi a fração passante da peneira #600 mícrons, com uma massa específica de 2.67 g/cm³.

Tabela 1 – Proporção de misturas (kg/m³)

ID	Cimento	CV	Metacaulim	Areia	Água	SP	Fibra	VMA
J0_REF	291.25	116.50	174.75	1165.01	349.50	5.24	-	-
J2_40	288.67	115.46	173.19	1154.66	346.39	15.39	11.54	1.04
J4_40	285.20	114.08	171.12	1140.81	342.24	28.52	22.82	1.25

O comportamento mecânico sob compressão foi determinado utilizando-se corpos de prova cilíndricos (50 mm x 100 mm) para cada mistura, após 28 dias, utilizando-se uma máquina de ensaios Shimadzu com capacidade de 1000 kN, equipada com célula de carga de 100 kN e velocidade de ensaio de 0.3 mm/min. Os deslocamentos foram medidos utilizando-se dois LVDTs fixados na região central do espécime. Também foi realizado o ensaio de flexão de quatro pontos em corpos de prova de 400 mm x 80 mm x 14 mm, com vão livre de 300 mm e distância entre as cargas de 100 mm. Utilizou-se uma máquina de ensaio Shimadzu com capacidade de 100 kN e velocidade de teste de 0.3 mm/min.

2.3 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS PRISMAS DE ALVENARIA

Para avaliar o efeito da aplicação da argamassa reforçada com fibras em paredes de tijolos maciços (Figura 2), foram produzidos dois tipos de corpos de prova prismáticos: para o ensaio de compressão, os prismas consistiram de cinco tijolos com dimensões finais de 190 x 300 x 130 mm, como mostra a Figura 2c, e para o ensaio de flexão, os prismas foram confeccionados com seis tijolos com dimensões finais de 190 x 400 x 130 mm, como mostra a Figura 2d. Uma camada de 20 mm de argamassa foi aplicada em cada face da amostra. Também foram produzidas amostras sem aplicação de camada de revestimento (SR) e amostras com argamassa de referência sem fibras (J0_REF). Ao total são produzidos 8 prismas de alvenaria.

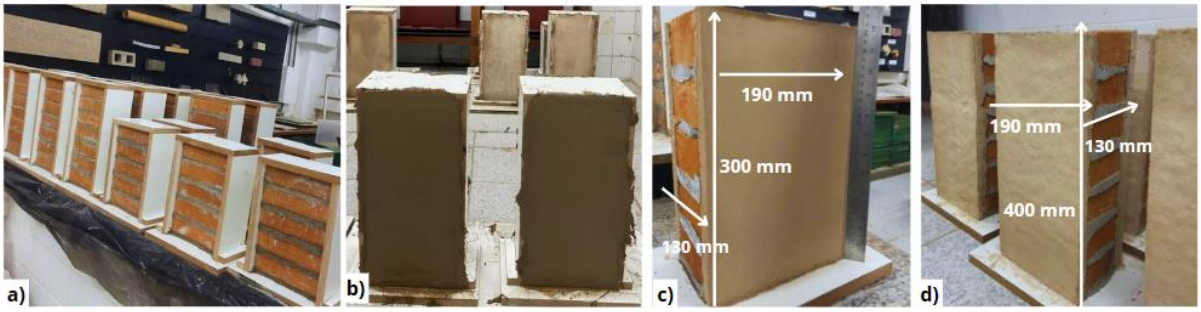


Figura 2 – Produção dos prismas de alvenaria. a) colocação de tijolos, b) aplicação do revestimento, c) dimensões do prisma para ensaio de compressão, d) dimensões do prisma para ensaio de flexão

Para a confecção dos prismas, foram utilizados tijolos cerâmicos maciços com dimensões de 190 mm (comprimento) x 50 mm (altura) x 90 mm (largura), com resistência média à compressão avaliada em 8.12 MPa ± 1.31 MPa. As juntas entre os tijolos foram preenchidas com argamassa composta de cimento: cal: areia: água na proporção de 1:0.5:2, em massa, que apresentou resistência à compressão média de 6.40 ± 0.40 MPa aos 28 dias.

O ensaio de compressão axial foi realizado de acordo com a norma ASTM C1314-16 (2023). Utilizou-se uma máquina de ensaios Shimadzu com capacidade de 1000 kN, equipada com célula de carga de 200 kN, cuja velocidade de teste foi de 0.3 mm/min. O deslocamento vertical foi medido por dois LVDTs posicionados no centro da amostra, com comprimento de 100 mm. O ensaio de flexão do prisma foi realizado de acordo com a norma ASTM E518/E518M-15 (2021), utilizando-se uma configuração de 4 pontos. O vão entre os apoios foi de 360 mm e a distância entre as cargas foi de 120 mm. Foi utilizada uma máquina de ensaios Shimadzu com capacidade de carga de 100 kN, com velocidade de teste de 0.3 mm/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE JUTA

A Tabela 2 apresenta os resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, juntamente com os resultados da primeira tensão de fissuração (σ_f) e da tensão máxima pós-fissuração (σ_u) obtidos no ensaio de flexão das argamassas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das argamassas

ID	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	σ_f (MPa)	σ_u (MPa)
J0_REF	19.36 ± 0.23	20.99 ± 3.37	3.14 ± 0.06	-
J2_40	14.01 ± 0.24	12.58 ± 0.29	2.97 ± 0.08	1.83 ± 0.46
J4_40	12.94 ± 0.61	13.02 ± 2.49	2.34 ± 0.24	2.25 ± 0.24

A adição de fibras vegetais às misturas leva à diminuição da resistência à compressão, o que é atribuído ao aumento da porosidade das misturas. Existe uma correlação inversa bem estabelecida entre a resistência mecânica e a presença de vazios em materiais sólidos. Isso ocorre porque os poros tendem a concentrar tensões e atuam como iniciadores de fissuras que se propagam dentro do espécime. Para a adição de 2% e 4% de fibras de juta, houve reduções entre 28%-33% na resistência à compressão, respectivamente, em relação às argamassas de referência (sem fibras). Quanto ao módulo de elasticidade, reduções na faixa de 38-40% foram observadas para as mesmas misturas. Uma tendência semelhante foi observada por Shi et al. (2020) e Majumder et al. (2023).

Com relação ao comportamento das argamassas sob carga em flexão, a presença de fibras inibe a rápida propagação da fissura e evita a falha súbita da amostra. Entretanto, devido ao efeito da fibra no aumento da porosidade, a adição de fibras resulta em uma redução máxima de 25% na resistência à flexão do reforço em relação à argamassa de referência. Com o aumento da taxa de deslocamento, as tensões são transferidas entre as faces da fissura através da fibra e, após uma queda inicial de resistência, há um aumento da tensão pós-fissura até um valor limite além do qual as fibras são gradualmente arrancadas da matriz em um processo de arrancamento.

3.2 AVALIAÇÃO DOS PRISMAS DE ALVENARIA

3.2.1 Prismas sob carga de compressão axial

A Tabela 3 apresenta os resultados médios dos prismas sob compressão para todas as amostras, bem como o desvio padrão de cada um. O módulo de elasticidade dos espécimes foi calculado em relação as curvas tensão-deformação.

Observa-se que a aplicação do revestimento resultou em aumento da capacidade de suporte de carga dos prismas, com incrementos na tensão máxima variando de 18.43% para prismas com camada J2_40 a 53.41% para prismas com camada J4_40, em relação ao prisma não revestido.

As curvas carga-deslocamento dos prismas de alvenaria sob compressão são apresentadas na Figura 3. Foram avaliados prismas sem camada de revestimento, com camada de argamassa referência e com camadas de argamassa reforçadas com fibras. Após uma acomodação inicial, o comportamento mecânico é caracterizado por uma relação de carga-deslocamento aproximadamente linear até a emergência das primeiras fissuras verticais, para valores de tensão de aproximadamente 50-85% da resistência total à compressão. Após o aparecimento das fissuras, o comportamento torna-se não

linear com aumento da carga até o valor máximo do pico, seguido de perda gradual da rigidez até a ruptura.

Tabela 3 – Resultados médios obtidos a partir do ensaio de compressão axial dos prismas

Amostra	Tensão compressiva (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
SR	**6.89**	**948.03**
(DP)	(1.04)	(433.03)
J0_REF	**8.94**	**7252.92**
(DP)	(0.27)	(115.76)
J2_40	**8.16**	**6821.90**
(DP)	(0.02)	(183.27)
J4_40	**10.57**	**8823.52**
(DP)	(1.64)	(558.51)

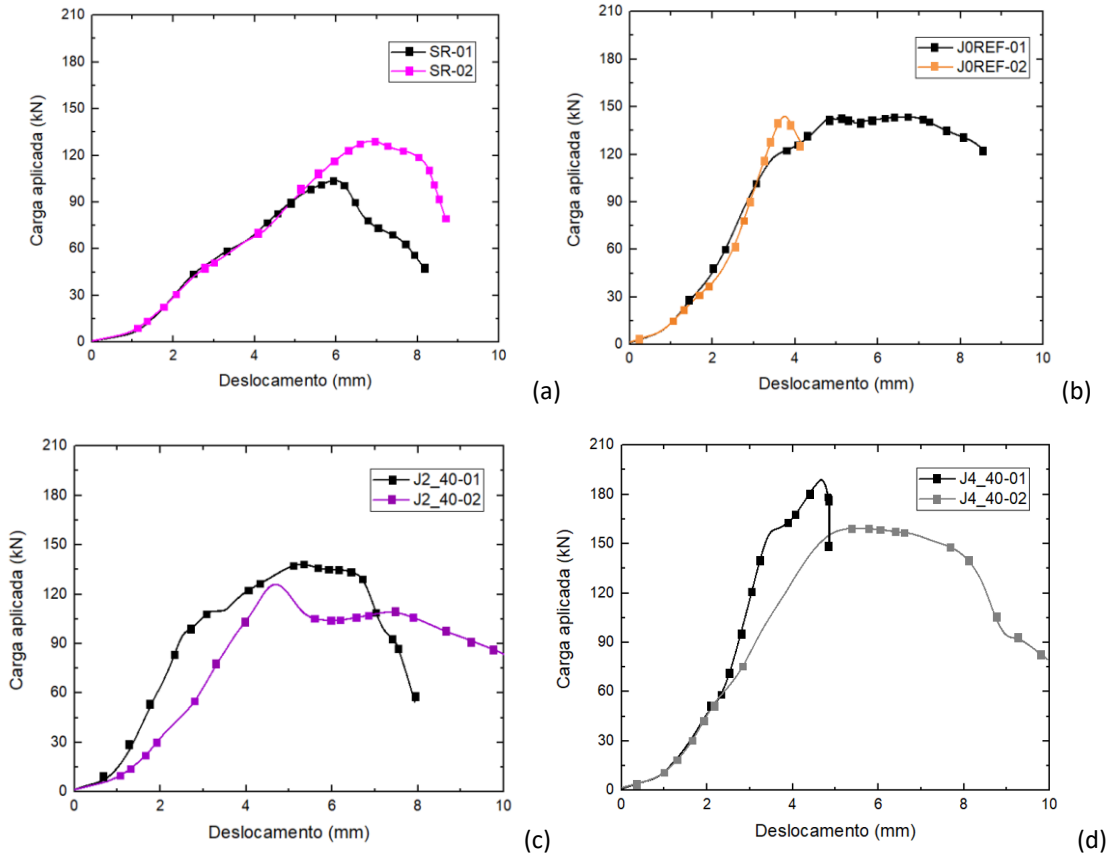


Figura 3 – Comportamento dos prismas de alvenaria sob compressão. a) SR, b) não revestido, c) reforçado com 2% de fibras, d) reforçado com 4% de fibras

Para o prisma não revestido, foram observados dois tipos de ruptura: fissuração entre o tijolo e as juntas horizontais de argamassa seguida de ruptura global do tijolo (Figura 4a). Esses modos de falha

são classificados pela ASTM C1314 (2023) como quebra semicônica e quebra de cisalhamento. Prismas de tijolos cerâmicos não revestidos normalmente exibem falha de fissuração vertical tanto para alvenaria de tijolo maciço (Song et al. 2021) quanto para alvenaria de tijolo oco (Yu e Park, 2021). Nos prismas reforçados com argamassa de referência, a falha ocorre devido ao descolamento do revestimento, resultando em fratura frágil (Figura 4b). O aumento do teor e do comprimento da fibra levou a um incremento na compressão dos prismas, resultando em uma mudança no modo de falha, como ilustrado na Figura 4c.

Figura 4 – Modos de ruptura dos prismas sob compressão. a) prisma sem revestimento, b) prisma revestido com argamassa sem fibras, c) prisma com revestimento fibroso

3.2.2 Prismas sob carga de flexão de quatro pontos

As Figuras 5a e 5b ilustram as curvas tensão-deflexão tanto para o prisma não revestido quanto para o prisma reforçado com argamassa de referência, sem fibras. Em ambos os casos, os prismas inicialmente apresentaram comportamento elástico linear até atingir sua carga máxima, seguido de ruptura quebradiça súbita.

O comportamento mecânico sob flexão dos prismas revestidos com argamassas reforçadas com fibras de juta é apresentado nas Figuras 5c e 5d. As curvas tensão-deflexão exibem um segmento linear até que a primeira fissura apareça na camada inferior da armadura. Para prismas reforçados com 2% de fibras, a primeira fissura marca a tensão máxima, enquanto prismas contendo 4% de fibra apresentam um segmento não linear na curva após a fissura inicial, com tensão aumentando até atingir o máximo. Prismas contendo 2% de fibras de juta tiveram um aumento de flexão de até 38%, enquanto argamassas fibrosas com 4% de fibra, em volume, experimentaram um aumento de aproximadamente 69% na tensão de flexão, em comparação aos prismas revestidos sem fibras.

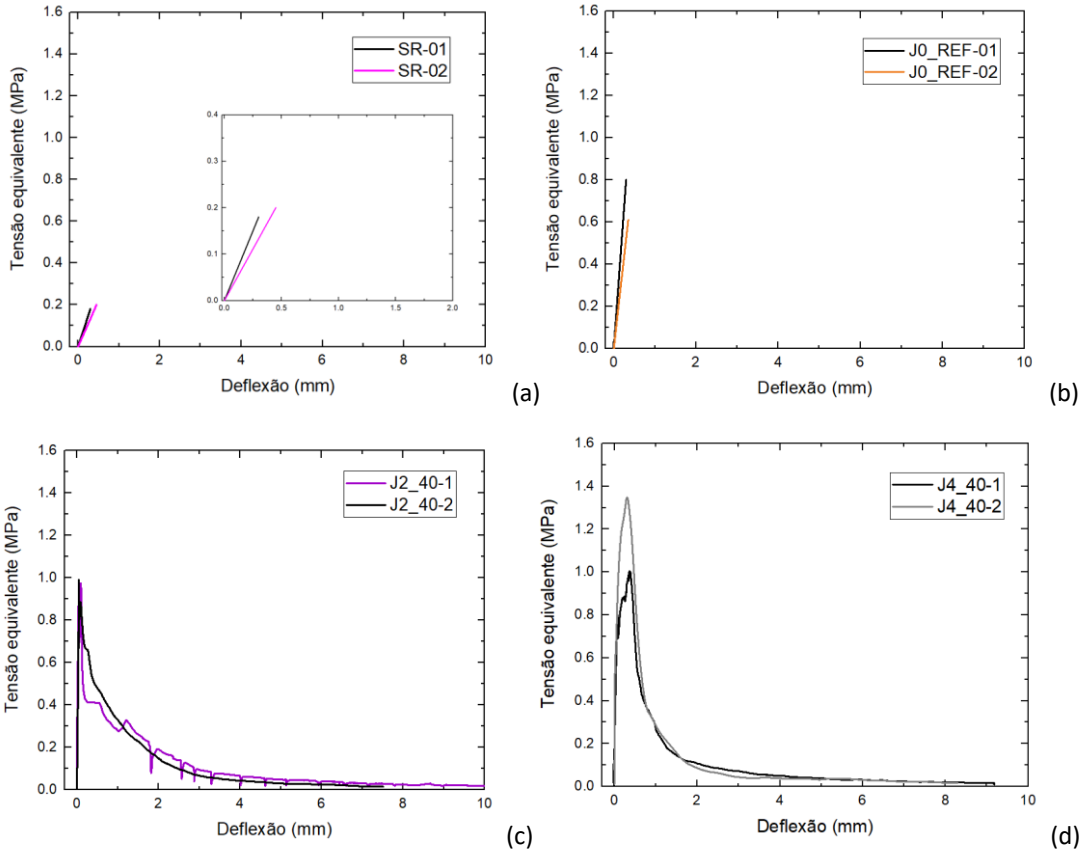


Figura 5 – Comportamento dos prismas de alvenaria sob compressão, a) SR, b) não revestido, c) reforçado com 2% de fibras, d) reforçado com 4% de fibras

Ao contrário dos prismas não reforçados, os prismas reforçados com fibras apresentam comportamento dúctil após a fissuração, mantendo a tensão residual antes de eventual ruptura, que ocorre em deflexões mais elevadas. A Tabela 4 apresenta os resultados médios a partir do ensaio.

Tabela 4 – Resultados médios obtidos a partir do ensaio de flexão dos prismas

Amostra	Carga de pico Pmax (kN)	Tensão equivalente de pico (MPa)	Δ (mm)	Tenacidade (N.mm)	Modo de ruptura
SR	**0.82**	**0.19**	**0.004**	**0.04**	Ruptura no tijolo
(DP)	(0.049)	(0.01)	(0.004)	(0.004)	-
J0_REF	**6.30**	**0.71**	**0.002**	**0.19**	Ruptura do revestimento
(DP)	(1.18)	(0.13)	(0.003)	(0.042)	-
J2_40	**8.75**	**0.98**	**0.008**	**1.03**	Fissuras à flexão
(DP)	(0.11)	(0.01)	(0.001)	(0.07)	-
J4_40	**10.64**	**1.20**	**0.009**	**1.11**	Fissuras à flexão
(DP)	(2.38)	(0.26)	(0.001)	(0.064)	

O prisma não revestido experimentou um pico de tensão de 0.19 MPa. Ao adicionar o revestimento de referência, o pico de tensão subiu para 0.71 MPa, indicando um aumento de quase quatro vezes na resistência à flexão. Este aumento substancial da força é atribuído ao modo de falha do prisma. No cenário inicial, a falha ocorre devido à perda de aderência entre o tijolo e a junta de argamassa, conforme ilustrado na Figura 6a. Em prismas sem camada de revestimento, a ruptura à flexão tende a se propagar por toda a junta de argamassa (Caldeira et al. 2020). Há um aumento de resistência ao aplicar 1 ou 2 camadas de revestimento como resultado da distribuição de tensões internas (Yu e Park, 2021).

Em prismas reforçados, as cargas de flexão levam inicialmente a um aumento da tensão de tração da argamassa. Somente após essa tensão atingir a resistência à tração da armadura é que uma fissura aparece e se propaga para a interface revestimento-tijolo, ativando as tensões adesivas. O aprimoramento da absorção de energia em 5 e 6 vezes justifica estes resultados. A Figura 6b ilustra o modo de ruptura típico de prismas revestidos com fibras.

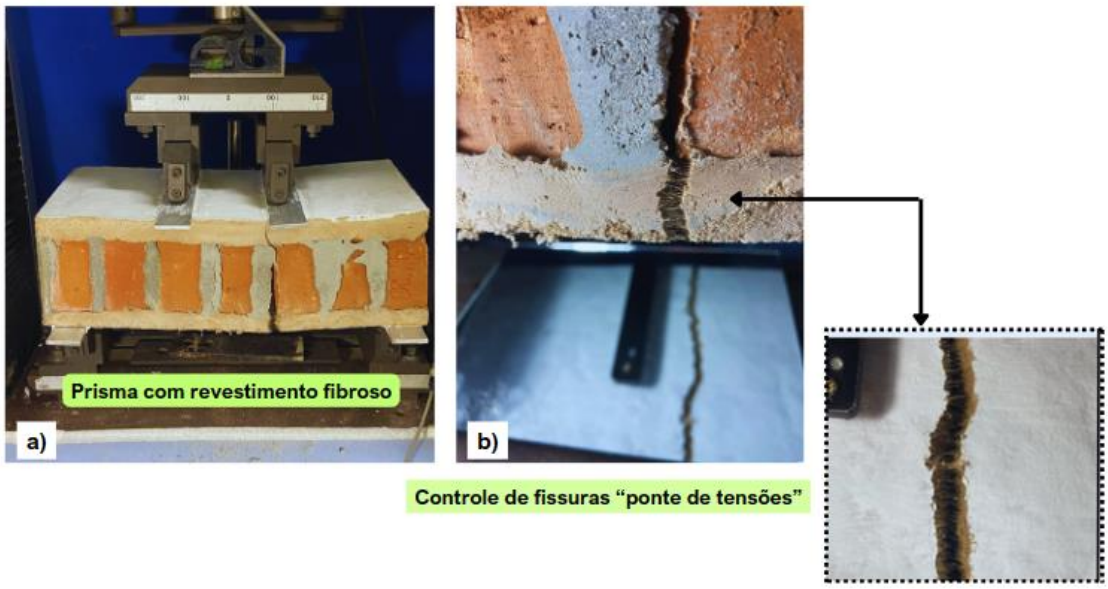


Figura 6 – Comportamento dos prismas de alvenaria revestidos com argamassas reforçadas com fibras sob flexão. a) setup de ensaio, b) fissuração do corpo de prova

4 CONCLUSÕES

A avaliação da argamassa reforçada com teores de fibra de juta de 2% e 4% permitiu concluir que a adição de fibras provoca uma redução de até 33% na resistência à compressão, respectivamente, em relação às argamassas de referência. Em relação ao módulo de elasticidade, reduções de até 40% foram observadas para as mesmas misturas. Entretanto, sob carga em flexão, a presença de fibras permitiu aumento da deformação última, modificando o modo de ruptura da argamassa.

O comportamento mecânico dos prismas sob compressão foi modificado com a aplicação de revestimento com o uso de argamassa reforçada, resultando em um aumento na capacidade de suporte de carga e rigidez dos prismas. Enquanto o modo de ruptura dos prismas não reforçados é caracterizado pelo surgimento de fissuras verticais, a adição de argamassa reforçada resulta no surgimento de novos modos de ruptura devido ao controle de trincas na camada de revestimento.

Sob carregamento fora do plano, os prismas de referência exibiram inicialmente falha frágil caracterizada pela perda de aderência entre a junta tijolo e argamassa. No entanto, a adição da argamassa reforçada com fibras permite a manutenção da tensão residual após a fissuração do revestimento, levando ao aumento da resistência à flexão, entre 38%-69%. Incrementos na tenacidade, entre 5 e 6 vezes, em relação aos prismas com argamassa referência. E aumentos na tenacidade, entre 26 e 27 vezes, em relação aos prismas sem qualquer tipo de revestimento.

O presente estudo é limitado quanto aos tamanhos de amostras de alvenaria para os ensaios de compressão axial e flexão, devido às máquinas de ensaios utilizadas. Pesquisas futuras podem avaliar argamassas reforçadas com fibras de juta em simulações reais de paredes de alvenaria.

REFERÊNCIAS

ASTM C1314-16. (2023). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms.

ASTM E518/E518M-15. (2021). Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry.

Broeren, M. L. M., Dellaert, S. N. C., Cok, B., Patel, M. K., Worrell, E., Shen, L. (2017). Life Cycle Assessment of Sisal Fibre – Exploring How Local Practices Can Influence Environmental Performance. J Clean Prod, 149:818–827. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.073

Caldeira, F. E., Nalon, G. H., Oliveira, D. S., Pedroti, L. G., Ribeiro, J. C. L., Ferreira, F. A., Carvalho, J. M. F. de. (2020). Influence of Joint Thickness and Strength of Mortars on the Compressive Behavior of Prisms Made of Normal and High-Strength Concrete Blocks. Constr Build Mater, 234. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117419

Cevallos, O. A., Olivito, R. S., Codispoti, R., Ombres, L. (2015). Flax and Polyparaphenylene Benzobisoxazole Cementitious Composites for the Strengthening of Masonry Elements Subjected to Eccentric Loading. Compos B Eng, 71:82–95. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.055

de Carvalho Bello, C. B., Boem, I., Cecchi, A., Gattesco, N., Oliveira, D. V. (2019). Experimental Tests for the Characterization of Sisal Fiber Reinforced Cementitious Matrix for Strengthening Masonry Structures. Constr Build Mater, 219, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.168

Ferreira, S. R., Silva, F. de A., Lima, P. R. L., Toledo Filho, R. D. (2015). Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. Constr. Build. Mater, 101, 730–740. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120

Lima, P. R. L., Barros, J. A. O., Roque, A. B., Fontes, C. M. A., Lima, J. M. F. (2018). Short Sisal Fiber Reinforced Recycled Concrete Block for One-Way Precast Concrete Slabs. Constr. Build. Mater., 187:620–634. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.184

Madhavi, K., Vinay, G. N., Renuka Devi, M. V., Basutkar, S. M. (2021). Shear Behavior of Brick Masonry Strengthened with Jute Fiber Reinforced Composite. In Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd, 46, 4746–4751. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.307

Menna, C., Asprone, D., Durante, M., Zinno, A., Balsamo, A., Prota, A. (2015). Structural Behaviour of Masonry Panels Strengthened with an Innovative Hemp Fibre Composite Grid. Constr. Build. Mater., 100, 111–121. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.051

Majumder, A., Stochino, F., Frattolillo, A., Valdes, M., Mancusi, G., Martinelli, E. (2023). Jute Fiber-Reinforced Mortars: Mechanical Response and Thermal Performance. J Build Eng, 66. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105888

Sevil, T., Baran, M., Bilir, T., Canbay, E. (2011). Use of Steel Fiber Reinforced Mortar for Seismic Strengthening. Constr Build Mater, 25 (2), 892–899. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.096

Shi, X., Park, P., Rew, Y., Huang, K., Sim, C. (2020). Constitutive Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete under Uniaxial Compression and Tension. Constr Build Mater, 233. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316

Soleymani, A., Jahangir, H., Nehdi, M. L. (2023). Damage Detection and Monitoring in Heritage Masonry Structures: Systematic Review. Constr Build Mater, Elsevier Ltd September 15, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132402

Song, H., Liu, J., He, K., Ahmad, W. A. (2021). Comprehensive Overview of Jute Fiber Reinforced Cementitious Composites. Case Studies in Constr Mater, 15. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00724

Torres, B., Ivorra, S., Javier Baeza, F., Estevan, L., Varona, B. (2020). Textile reinforced mortars (TRM) for repairing and retrofitting masonry walls subjected to in-plane cyclic loads. An experimental approach. Eng Struc 2020, 231. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111742.

Vailati, M., Mercuri, M., Angiolilli, M., Gregori, A. (2021). Natural-Fibrous Lime-Based Mortar for the Rapid Retrofitting of Heritage Masonry Buildings. Fibers, 9 (11). https://doi.org/10.3390/fib9110068

Vicente, R., Lagomarsino, S., Ferreira, T. M., Cattari, S., Mendes da Silva, J. A. R. (2018). Cultural Heritage Monuments and Historical Buildings: Conservation Works and Structural Retrofitting, 25–57. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5858-5_2

Yu, J. H., Park, J. H. (2021). Compressive and Diagonal Tension Strengths of Masonry Prisms Strengthened with Amorphous Steel Fiber-Reinforced Mortar Overlay. Applied Sciences (Switzerland), 11 (13). https://doi.org/10.3390/app11135974

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Influência da granulometria e do teor de sílica amorfa das Cinzas de casca de arroz (CCAs) no consumo de $Ca(OH)_2$

Divino Gabriel Lima Pinheiro [1,2], João Henrique da Silva Rêgo [2]

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Formosa – 73813816, Formosa, GO
e-mail: divino.pinheiro@ifg.edu.br
[2] Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade de Brasília, Brasília, DF
e-mail: jhenriquerego@unb.br

RESUMO

A cinza da casca de arroz, quando produzida com processo de queima controlada e finamente moída, apresenta alto teor de sílica amorfa sendo classificada como pozolana altamente reativa. Quando é gerada sem queima controlada, é chamada de CCA residual e tem como característica um menor teor de sílica amorfa. Alguns pesquisadores já investigaram a influência da granulometria na atividade pozolânica de CCAs com alto (>75%) e baixo (<25%) teor de sílica amorfa. Contudo, não existem trabalhos que avaliam o efeito da granulometria no consumo de $Ca(OH)_2$ de CCAs com valores intermediários (entre 25% e 75%) de sílica amorfa. Neste artigo foram utilizadas CCAs com teores alto, intermediário e baixo de sílica amorfa. As três CCAs geradas, foram moídas originando, cada uma delas, seis amostras diferentes de acordo com o tempo de moagem. Foram executados ensaios relacionados a finura, caracterização física e consumo de $Ca(OH)_2$. Foi observado que a CCA com teor intermediário de sílica amorfa apresentou um aumento substancial do consumo de hidróxido de cálcio com a diminuição do tamanho da partícula. Desta forma a CCA com teor intermediário de sílica amorfa apresenta-se como material cimentício suplementar (MCS) altamente reativo.

Palavras-chave: Cinzas de Casca de Arroz (CCA), pozolanas, sílica amorfa.

1 INTRODUÇÃO

A casca de arroz é um dos subprodutos do beneficiamento do arroz e a cinza da casca de arroz (CCA) é o produto da queima da casca de arroz. É conhecida a potencialidade da utilização da CCA como pozolana altamente reativa como adição ao cimento Portland. A atividade pozolânica é a capacidade de um material silico-aluminoso, quando finamente moído, de reagir com o hidróxido de cálcio para formar um composto aglomerante. Assim as CCAs são cada vez mais utilizadas em escala global como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) pelas vantagens que sua utilização traz nos aspectos técnico, econômico, ambiental e energético (Capelo et al., 2023).

A substituição parcial da CCA ao cimento ajuda a reduzir as emissões de CO_2 pela indústria do cimento e reduz a necessidade de matéria-prima (calcário e argila) para produção do clinquer. Também pode reduzir o custo dos produtos finais e proporcionar uma utilização final para resíduos industriais, contribuindo para práticas de desenvolvimento sustentável. (ISAIA et al., 2010.)

Para que a CCA seja considerada uma pozolana altamente reativa, com propriedades similares à sílica ativa, o processo de queima da casca precisa ser controlado. É dessa forma que a CCA apresenta alto teor de sílica no estado amorfo e, portanto, se torna mais reativa. Mas, geralmente nas indústrias de beneficiamento de arroz, a casca de arroz é utilizada como combustível sem nenhum controle de queima. A CCA gerada por este processo é chamada de CCA residual e apresenta normalmente menor teor de sílica amorfa e menor reatividade que a CCA com processo de queima controlado.

Alguns pesquisadores como Nageswari (2023), Memon (2020), Bonifácio (2022),Isberto (2019), Khaliq (2019), Rêgo (2001, 2004, 2014, 2015), Isaia (2003), Duart (2008), Bezerra et al. (2011), Cordeiro et al. (2006, 2009, 2011), Kielling et al. (2009), Benassi (2015), Aprianti et al. (2015), Fernandes et al. (2016), Liu, Chen, Yang (2016), Mor, Chhoden, Ravindra (2016), Jamil et al. (2016), Huang et al. (2017), Abbas, Kazmi, Munir (2017), Hoppe Filho(2017), Siddika, Adbullah, Alil (2018), Sensale, Viacava (2018) nos últimos anos, têm demonstrado a importância de se estudar a CCA residual como MCS ao cimento, quer seja pela seu grande volume de produção e consequentemente geração de problemas ambientais, conforme mostrado na Figura 1, quer pelo seu potencial de atuação como material pozolânico ao cimento.

Figura 1 - Descarte da CCA Residual no leito de rio (Rêgo,2001)

A CCA residual geralmente apresenta menor teor de sílica amorfa do que a CCA produzida com processo de queima controlado, mas diversos autores têm demonstrado o potencial da utilização da CCA com baixo teor de sílica amorfa como MCS ao cimento Portland.

De fato, observa-se na literatura, que mesmo CCAs com baixo teor de sílica amorfa (< 25%) quando finamente moídas, apresentam um aumento da sua reatividade. Por isso entender a relação entre o teor de sílica amorfa, o tamanho da partícula e o consumo de $Ca(OH)_2$ das CCAs é de fundamental importância. Rêgo et al. (2014 e 2015) estudaram CCAs com alto e baixo teor de sílica amorfa, porém sem controle de temperatura. Contudo, não existem trabalhos com valores intermediários (entre 25% e 75%) de sílica amorfa para investigar e avaliar o efeito da granulometria no consumo de $Ca(OH)_2$. Neste artigo foram investigadas CCAs com alto, intermediário e baixo teores de sílica amorfa com diferentes granulometrias em relação ao consumo de $Ca(OH)_2$.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia contempla a obtenção das CCAs com diferentes teores de sílica amorfa e a caracterização dessas CCAs submetidas a diferentes tempos de moagem.

2.1 OBTENÇÃO DAS CCAS COM DIFERENTES TEORES DE SÍLICA AMORFA

Este estudo empregou casca de arroz da região de Formosa-GO, Brasil, obtida do beneficiamento local. Sete temperaturas de calcinação foram selecionadas, variando de 500ºC a 1100ºC, conforme definido pelos requisitos estabelecidos. Segundo Cordeiro et al. (2011), a CCA mostra maior quantidade de material amorfo em temperaturas abaixo de 800ºC. O objetivo foi obter três amostras de CCA com diferentes teores de sílica amorfa: alto teor de sílica amorfa (AA - >75%), intermediário (IA – entre 75% e 25%) e baixo (BA - <25%), em conformidade com a norma ABNT NBR 12653:2015.

As amostras foram calcinadas em um forno tipo Mufla, onde foram aquecidas a uma taxa de 20ºC a cada cinco minutos até alcançarem a temperatura desejada, mantidas nessa temperatura por duas horas e deixadas para resfriar naturalmente até a temperatura ambiente, resultando em aproximadamente 20g de CCA.

As amostras foram preparadas para o ensaio de Difração de raios X, homogeneizadas e reduzidas em granulometria para tamanho inferior a 0,074 mm. O equipamento utilizado foi o Geigeflex T / Max RIGAKU, operando a 40 KV e 20 mA, com varredura de 2º a 70º a uma velocidade de 5º por minuto. O ensaio de perda ao fogo seguiu a norma ABNT NM 18:2012, determinando a quantidade de material orgânico na amostra.

2.2 SELEÇÃO DAS CCAS

Levando-se em consideração a quantidade de perda ao fogo de cada amostra e o teor de sílica amorfa nas CCAs, chegou-se a três CCAs com diferentes teores de sílica amorfa:

a) CCA AA - Alto teor de sílica amorfa (> 75%), calcinada a 600°C;

b) CCA IA - Teor intermediário de sílica amorfa (entre 25% e 75%) calcinada a 900°C;

c) CCA BA - Baixo teor de sílica amorfa (< 25%) calcinada a 1100°C.

Para determinar o teor de sílica amorfa nas CCAs AA, IA e BA foi utilizado o método de quantificação quimica de Payá et al. (2001).

2.2.1 Moagem das CCAs AA, AI e BA

Foram utilizados seis tempos de moagem para as 3 CCAs selecionadas que geraram 18 amostras. A moagem das amostras foi realizada em um moinho tipo panelas, utilizando dispositivos revestidos de tungstênio para evitar a contaminação da amostra. As amostras foram moídas em seis tempos de moagem: 5 segundos (5), 15 segundos (15), 30 segundos (30), 60 segundos (60), 180 segundos (180) e 300 segundos (300) e as amostras resultantes são designadas como demonstrado na Figura 2:

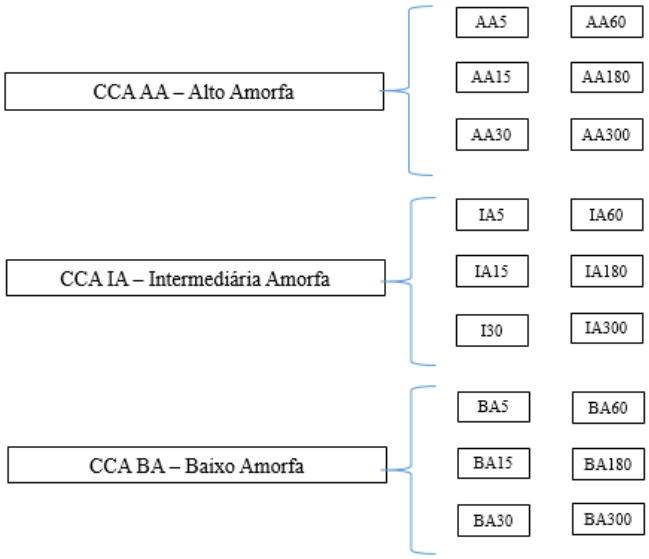


Figura 2 - Nomeclatura das CCAs estudadas

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CCAS ESTUDADAS

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios nas 18 amostras quanto à sua finura, caracterização fisica e consumo de $Ca(OH)_2$. Os ensaios estão descritos abaixo.

A granulometria a laser das CCAs foi realizada em um Granulômetro da Marca CILAS 1180 que permite determinar a distribuição granulométrica do material analisado com granulometria variando de 0,04µm até 2500µm e foi utilizado como meio dispersor água.

A massa específica real dos sólidos foi determinada por meio do equipamento de pentapicnômetro modelo Pentapyc 5200e da “Quantachrome Instruments”.

O espectrômetro utilizado para os ensaios de fluorescência de raios-x por energia dispersiva foi o FRX/EDX 720 da Shimadzu. Esse equipamento possui um tubo de ródio e executou as análises a vácuo.

O método de determinação do teor de Hidróxido de Cálcio Fixado – Método de Chapelle Modificado, é um ensaio acelerado, que indica a atividade pozolânica dos materiais. Este método é padronizado pela ABNT NBR 15895:2010 (Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado). O ensaio de determinação do teor de hidróxido de cálcio pelo método de Chapelle foi feito em todas as CCAs.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 OBTENÇÃO DAS CCAS COM DIFERENTES TEORES DE SÍLICA AMORFA

Os resultados da perda ao fogo, conforme determinado pela norma ABNT NB 18/2012, variaram de 10,6% para a CCA500 até 0,6% para a CCA1100. É importante notar que apenas a CCA500 excedeu o limite estabelecido pela norma, que é de 6%, indicando uma quantidade significativa de material orgânico presente nessa amostra.

A Tabela 1 mostra os teores de sílica amorfa, obtidos pelo método de Payá (2001), das amostras AA, BA e IA.

Tabela 1 – Teores de sílica amorfa para as amostras segundo Payá (2001).

Amostra	Amostra Alto Amorfa (AA)	Amostra Intermediária Amorfa (IA)	Amostra Baixo Amorfa (BA)
Teor de sílica amorfa (%)	76,9	35,6	12,0

Com base nesses resultados, as amostras foram categorizadas em alto teor de sílica amorfa (>75% - AA), teor intermediário (25%-75% - IA) e baixo teor (<25% - BA). Enquanto estudos anteriores investigaram amostras com alto e baixo teor, este artigo destaca as amostras com valores intermediários de sílica amorfa.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CCAS AA, IA E BA SUBMETIDAS A DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM

Após a seleção das CCAs, foram realizadas as moagens por diferentes tempos (5s, 15s, 30s, 60s, 180s e 300s) no moinho de panelas, totalizando 18 amostras. A seguir foram realizados ensaios de granulometria a laser, fluorescência de raios-x, massa específica e ensaios de consumo de $Ca(OH)_2$. As Tabelas 2, 3 e 4 demonstram os resultados obtidos para as CCAs AA, IA e BA, respectivamente, com diferentes granulometrias.

Tabela 2 – Resultado dos ensaios realizados com a amostra de CCA AA

CCA ALTO AMORFA (AA)							
Ensaio Realizado		AA 5	AA 15	AA 30	AA 60	AA 180	AA 300
Fluorescência de Raio-X	Si	82,88	82,12	82,16	82,40	82,39	81,42
	K	9,85	9,99	10,08	9,87	9,69	10,24
	Ca	2,65	2,93	2,77	2,79	2,73	3,32
	Al	1,57	1,78	1,81	1,82	1,80	1,91
Granulometria à Laser	Dm (µm)	27,67	15,39	11,38	9,60	7,62	6,94
Massa Específica (g/cm³)		2,45	2,24	2,24	2,20	2,20	2,21
Chapelle ($Ca(OH)_2$/g)		954	1.134	1.175	1.209	1.231	1.260

Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados com a amostra de CCA IA

CCA INTERMEDIÁRIA AMORFA (IA)							
Ensaio Realizado		IA 5	IA 15	IA 30	IA 60	IA 180	IA 300
Fluorescência de Raio-X	Si	84,120	83,980	84,160	84,020	84,340	84,120
	K	7,990	7,940	7,920	8,070	7,840	8,240
	Ca	2,65	2,74	2,68	2,70	2,57	2,97
	Al	1,97	1,93	2,01	1,97	2,03	1,55
Granulometria à Laser	Dm (µm)	19,63	8,69	8,08	7,02	6,04	5,78
Massa Específica (g/cm³)		2,67	2,59	2,8	2,85	2,51	2,42
Chapelle ($Ca(OH)_2$/g)		763	918	1003	1010	1129	1136

Tabela 4 – Resultados dos ensaios realizados com a amostra de CCA BA

CCA BAIXO AMORFA							
Ensaio Realizado		BA 5	BA 15	BA 30	BA 60	BA 180	BA 300
Fluorescência de Raio-X	Si	86,672	87,557	87,827	86,973	87,264	89,078
	K	6,038	5,659	5,630	5,707	5,994	4,534
	Ca	2,67	2,54	2,48	2,79	2,50	2,40
	Al	1,82	1,78	1,47	1,78	1,83	1,83
Granulometria à Laser	Dm (µm)	21,85	9,05	7,55	6,08	6,21	5,95
Massa Específica (g/cm³)		2,60	2,60	2,57	2,48	2,62	2,48
Chapelle ($Ca(OH)_2$/g)		347	398	401	524	655	759

A composição química é muito importante porque mostra a quantidade de sílica presente na amostra. A partir do ensaio de Fluorescência de Raio – X é possível verificar que todas as amostras ensaiadas apresentam teor de SiO_2 acima de 80 %. Este valor é referente à quantidade de sílica presente na amostra tanto no estado amorfo e/ou cristalino. É possível notar que a quantidade de SiO_2 aumenta conforme a temperatura de calcinação aumenta. A quantidade apresentada é uma relação percentual ao total da amostra, assim quando aumentada a temperatura de calcinação, os compostos orgânicos são volatizados e então a porcentagem de sílica passa a representar uma quantidade maior da amostra.

O óxido de potássio (K_2O), identificado como principal contaminante, é influenciado pelo tipo de solo e pelo uso de fertilizantes, conforme observado em estudos recentes de Silva et al. (2020). Suas concentrações variaram entre 9% e 10% para CCA AA, cerca de 8% para CCA IA e entre 4% e 6% para CCA BA. O potássio, um composto alcalino frequentemente encontrado em materiais à base de sílica, tem sido discutido em pesquisas recentes, como as de Souza et al. (2019).

A Figura 4 apresenta os valores do ensaio de Chapelle Modificado para as três CCAs analisadas em relação ao diâmetro do grão. Para a CCA AA com maior diâmetro médio entre as amostras analisadas (27,67µm) o consumo de hidróxido de cálcio foi de 954 mg $Ca(OH)_2$/g o que já a caracteriza como uma pozolana altamente reativa segundo a norma ABNT NBR 15894-1:2010 que estipula um valor de 750mg $Ca(OH)_2$/g para pozolanas altamente reativas. À medida que se diminui o diâmetro do grão da

CCA AA foi constatado um aumento no consumo de $Ca(OH)_2$, alcançando valores de 1.260 mg/g para à CCA com diâmetro médio de 6,24 µm.

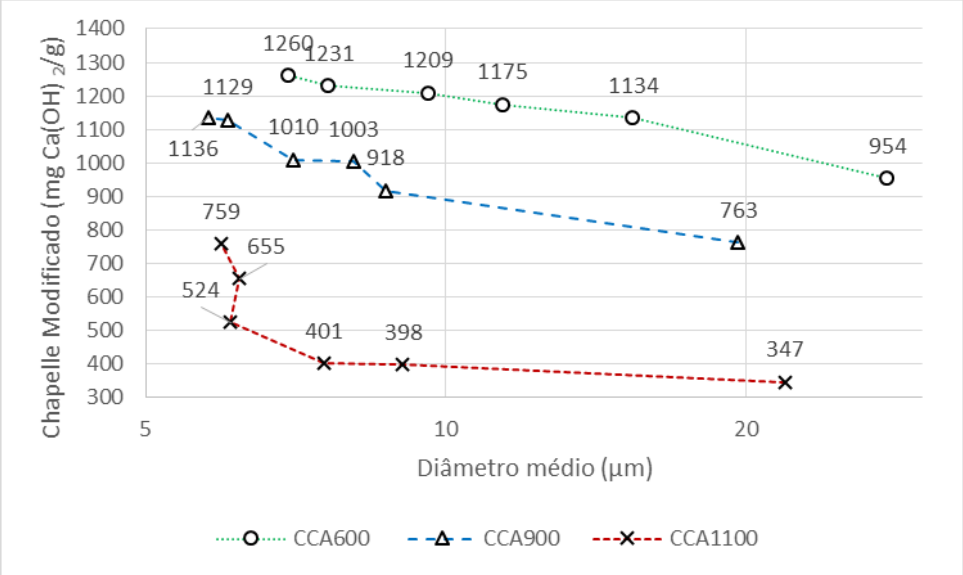


Figura 4 - – Relação entre o diâmetro médio do grão e o consumo de Hidróxido de Cálcio das CCAs AA, IA e BA.

O mesmo comportamento foi verificado nas CCAs IA e BA. A medida que se diminui o diâmetro médio do grão aumenta-se o consumo de Hidróxido de Cálcio. A CCA IA apresentou valores entre 763 e 1136 mg $Ca(OH)_2$/g com o diâmetro do grão respectivamente de 19,63 e 5,78 µm. Mesmo com apenas 35% de sílica amorfa a CCA IA já apresentou alto valor de consumo de $Ca(OH)_2$, inclusive para o maior diâmetro médio, podendo ser classificada como pozolana altamente reativa.

A CCA BA apresentou consumo de $Ca(OH)_2$ entre 347 e 759 mg $Ca(OH)_2$ /g com diâmetro médio, respectivamente, de 21,85 e 5,95 µm. No entanto a CCA BA somente apresentou consumo que a caracteriza como pozolana altamente reativa com granulometria muito reduzida, pois somente a amostra BA300 atende a norma.

A diminuição do tamanho da partícula tem maior influência no aumento do consumo de $Ca(OH)_2$ da CCA BA em relação às CCAs AA e CCA IA, principalmente quando o tamanho da partícula fica menor que 7 µm. Neste caso ocorreu um acréscimo de 412 mg $Ca(OH)_2$/g com a diminuição do diâmetro do grão. Na CCA IA também houve aumento no consumo de 373 mg Ca(OH)2/g, enquanto na CCA AA houve um acréscimo de 306 mg $Ca(OH)_2$/g. Esse comportamento já foi evidenciado por Cordeiro et al. (2011) e Rêgo et al. (2014). A diminuição dos picos de sílica, apresentados nos difratogramas de raios-X, à medida que diminui o tamanho das partículas, explica, em parte, este fenômeno. A moagem parece aumentar o teor de sílica amorfa em todas as CCAs, justificando o aumento do consumo de $Ca(OH)_2$ (Silva et al., 2020; Alves et al., 2021; Gomes et al., 2022)

A CCA IA, com 35% de teor de sílica amorfa, apresenta resultados compatíveis com uma pozolana altamente reativa à medida que ocorre o refinamento do diâmetro do grão (Oliveira et al., 2023). Seus resultados são muito próximos à CCA AA, com alto teor de sílica amorfa (77%), para o ensaio de Chapelle Modificado (Costa et al., 2021).

4 CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados do programa experimental desenvolvido e as análises feitas são apresentadas algumas conclusões que, em princípio, são válidas para os materiais e as condições experimentadas.

Durante a pesquisa foram produzidas três amostras de CCA com diferentes teores de sílica amorfa, por meio de queima controlada. A quantidade de sílica amorfa variou conforme a temperatura de calcinação. De acordo com os resultados obtidos nos métodos foram selecionadas: CCA600 como alto teor de sílica amorfa (CCA AA>75%), CCA900 como intermediário teor de sílica amorfa (25%<CCA IA<75%) e CCA1100 como baixo teor de sílica amorfa (CCA BA<25%).

Os resultados apresentados no ensaio de Chapelle Modificado, na maioria dos casos, classificaram as amostras como pozolanas altamente reativas.

Todas as amostras CCA AA foram caracterizadas como pozolanas altamente reativas, independente do diâmetro da partícula.

As amostras de CCA IA também apresentaram resultados como pozolanas altamente reativas e também é possível verificar que amostras aumentaram a reatividade com a moagem e consequente diminuição da granulometria.

Somente com o diâmetro médio bastante reduzido foi possível caracterizar a CCA BA como pozolana altamente reativa, somente a amostra BA 300 atendeu a norma brasileira. No entanto é importante ressaltar que nesta CCA houve importante aumento de consumo de hidróxido de cálcio a medida que se diminuiu o diâmetro médio do grão, ou seja, amostras que eram pouco reativas se tornaram altamente reativas a partir da redução do tamanho do grão.

Com base nos resultados obtidos, é crucial destacar o comportamento observado na CCA IA. Apesar do teor intermediário de sílica amorfa, de aproximadamente 35%, essa amostra revelou um aumento significativo no consumo de hidróxido de cálcio à medida que o tamanho do grão diminuiu. Esses achados reforçam a viabilidade da CCA IA como um material cimentício suplementar altamente reativo, especialmente considerando sua origem como resíduo nas beneficiadoras de arroz. Esta conclusão ressalta não apenas a importância do estudo das CCAs, mas também o potencial significativo desses resíduos como adição mineral em materiais de construção, contribuindo para práticas mais sustentáveis na indústria.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Safeer; KAZMI, Syed MS; MUNIR, Muhammad J. Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. Construction and Building Materials, v. 132, p. 61-70, 2017.

Almeida, L. P., Silva, R. M., & Santos, M. F. (2023). Effects of grinding time on the silica content of rice husk ash. Journal of Materials Science, 13(2), 78-85.

Alves, J. R., Pereira, L. C., & Costa, M. A. (2021). Influence of amorphous silica content on the reactivity of rice husk ash in cementitious systems. Journal of Sustainable Construction Materials, 11(4), 210-225.

APRIANTI, Evi et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes–A review. Cons-truction and Building Materials, v. 74, p. 176-187, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação de perda ao fogo. NM 18. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais Pozolânicos – Requisitos. NBR 12653. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado.NBR 15895. Rio de Janeiro, 2010.

BENASSI, L. et al. Comparison between rice husk ash grown in different regions for stabilizing fl y ash from a solid waste incinerator. Journal of Environmental Management, v. 159, p. 128–134, 2015.

BEZERRA, Izabelle MT et al. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. Re-vista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi, v. 15, n. 6, 2011.

BONIFACIO, Alysson Larsen; ARCHBOLD, Paul. The effect of calcination conditions on oat husk ash pozzolanic activity. Materials Today: Proceedings, v. 65, p. 622-628, 2022.

CAPELO, Alda Renata; MÁRMOL, Gonzalo; ROSSIGNOLO, João Adriano. Optimization of the rice husk ash production process for the manufacture of magnesium silicate hydrate cements. Journal of Cleaner Production, v. 425, p. 138891, 2023 .

CHEN, G. et al. Production of amorphous rice husk ash in a 500 kW fluidized bed combustor. Fuel, v. 144, p. 214–221, 2015.

CORDEIRO, G. C. et al. Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 5, p. 529–534, maio 2011.

CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. 2006. 445 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de janeiro, 2006.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. Materials and Structures, v. 42, n. 7, p. 983-992, 2009.

Costa, A. B., Almeida, L. P., & Pereira, M. F. (2021). Comparative study of reactivity between rice husk ash samples with different amorphous silica contents. Cement and Concrete Composites, 58(3), 125-133.

Costa, F. A., Oliveira, R. S., & Silva, M. A. (2023). Impact of partial substitution of cement with rice husk ash on CO2 emissions and sustainability in the cement industry. Journal of Cleaner Production, 321, 135678.

DAFICO, D. de A. Universidade Federal de Santa Catarina. Estudo da dosagem do concreto de alto de-sempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz. Florianópolis, 2001. 191 f. Tese de Dou-torado. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Santa Catarina.

FERNANDES, I. J. et al. Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy. Fuel, v. 165, p. 351–359, 2016.

FERNANDES, I. J. et al. Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy.Fuel, v. 165, p. 351–359, 2016.

Ferreira, A. B., Lima, C. D., & Oliveira, E. F. (2021). Influence of grain size on the amorphous silica content in rice husk ash. Materials Research Letters, 11(4), 210-217.

Gomes, R. S., Lima, F. A., & Santos, C. D. (2022). Influence of grain size on the reactivity of rice husk ash in cementitious materials. Construction and Building Materials, 312, 125678.

HOPPE FILHO, J. et al. Reactivity assessment of residual rice-husk ashes. Journal of Materials in Civil Engi-neering, v. 29, n. 6, p. 04017003, 2017.

HUANG, Huanghuang et al. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high perfor-mance concrete. Construction and Building Materials, v. 149, p. 621-628, 2017.

ISAIA, Geraldo C.; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. Cement and concrete composi-tes, v. 25, n. 1, p. 69-76, 2003.

ISAIA, Geraldo Cechella et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estru-tural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. CEP, v. 97119, p. 900, 2010.

ISBERTO, Carmela Denise et al. Optimized preparation of rice husk ash (RHA) as a supplementary cementitious material. GEOMATE Journal, v. 16, n. 57, p. 56-61, 2019.

JAMIL, M. et al. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. Cons-truction and Building Materials, v. 128, p. 185-198, 2016.

KHALIQ, Wasim; MUJEEB, Abdul. Effect of processed pozzolans on residual mechanical properties and macrostructure of high-strength concrete at elevated temperatures. Structural Concrete, v. 20, n. 1, p. 307-317, 2019.

Kieling, A.; Caetano, M. O.; Kulakoswki, M. P.; Kazmierczak, C. S. Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento. Ensaios Tecnológicos, v.5, p.157-170, 2009

LIU, Xinyu et al. A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash. Research on Chemical Intermediates, v. 42, n. 2, p. 893-913, 2016.

MEMON, Shazim Ali et al. Evaluating the effect of calcination and grinding of corn stalk ash on pozzolanic potential for sustainable cement-based materials. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2020, p. 1-13, 2020.

MOR, Suman; CHHODEN, Kalzang; RAVINDRA, Khaiwal. Application of agro-waste rice husk ash for the removal of phosphate from the wastewater. Journal of cleaner production, v. 129, p. 673-680, 2016.

Oliveira, F. M., Santos, R. S., & Lima, C. D. (2023). Influence of grain size refinement on the reactivity of rice husk ash in cementitious systems. Construction and Building Materials, 412, 235-242.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; MELLADO, A.; ORDOÑEZ, L. M. Determinationofamor-phous sílica in rice huskashby a rapidanalyticalmethod. Grupo de Investigaciónen Química de losMateria-les (GIQUIMA), Departamento de Ingeniería de laConstrucción, Universidad Politécnica de Valencia, Cami-node Vera s/n, Valencia 46071, Spain, 2001.

RÊGO, J. H. DA S. As Cinzas de Casca de Arroz (CCAs) amorfa e cristalina como MCS ao cimento-aspectos microestruturais da pasta. [s.l.] Universidade de Brasília, 2004.

RÊGO, J. H. DA S. Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de Arroz produzida sem controle de temperatura como MCS João Henrique da Silva Rêgo Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de Arroz produzida sem Controle de Temperatura como Adiç. [s.l: s.n.].

RÊGO, J. H. S. et al. Effect of Particle Size of Residual Rice-Husk Ash in Consumption of Ca(OH)2. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, n. 6, p. 04014178, jun. 2015b.

RÊGO, J. H. S. et al. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. v. 80, p. 56–68, 2015a.

SIDDIKA, A; ABDULLAH, A. M; ALIL, M. H. Study on concrete with rice husk ash. In Innovative Infrastructure Solutions. 3 1 -9. Springer New York. 2018.

Silva, A. B., Santos, M. F., & Oliveira, E. F. (2020). Effects of grain size on the consumption of Calcium Hydroxide in rice husk ash. Cement and Concrete Research, 48(3), 210-217.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MECÂNICA DE PASTAS DE CIMENTO TERNÁRIAS CONTENDO ARGILA CALCINADA E NANOSSILICA

Divino Gabriel Lima Pinheiro[a], João Henrique da Silva Rêgo[b], Moises Frias Rojas[c]

a. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa, Goiás, Brasil

b. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

c. Eduardo Torroja Institute (CSIC), Spanish National Research Council, 28033 Madrid, Spain

RESUMO

A pesquisa sobre novos MCSs (Materiais Cimentícios Suplementares) está em constante progresso, com o objetivo de melhorar as propriedades do cimento, reduzir seus custos operacionais e torná-lo mais sustentável. Um desses materiais é a argila calcinada, que reduz as emissões de CO_2 e o custo geral quando misturada com cimento. A nanossílica também é um MCS, altamente reativa. Embora os benefícios de ambos sejam bem estabelecidos, seu efeito combinado em uma mistura ternária com cimento ainda exige mais pesquisa. Portanto, o presente trabalho avalia essa mistura, com o objetivo de contribuir para a indústria de cimento e para a sustentabilidade ambiental. Foram estudadas quatro pastas de cimento: REF (100% de cimento Portland), REF2NS (substituição de 2% por nanossílica), AB (substituição de 25% por argila calcinada produzida no laboratório) e AB2NS (substituição por 2% de nanossílica e 23% de argila calcinada). A relação a/c (água/aglomerante) foi fixada em 0,40 e foram utilizados aditivos superplastificantes para manter a mesma trabalhabilidade. Foram realizados ensaios de resistência à compressão (fc), análise termogravimétrica (TGA) nas pastas e porosimetria pro intrusão de mercúrio (PIM). Os resultados mostram que o processo de calcinação das argilas cruas foi eficiente, com conversão de caulinita, e que tanto as pastas binárias quanto as ternárias apresentaram resistência à compressão igual ou superior à referência, demonstrando a viabilidade da argila calcinada para a substituição de clínquer em teores elevados. Notavelmente, a adição de nanossílica resultou em um aumento significativo na resistência inicial das pastas de cimento, destacando-se como um componente crucial para aprimorar o desempenho mecânico nos primeiros dias de cura.

Palavras-chave: Argila Calcinada, Nanossílica, MCS, Sustentabilidade, Cimentos com baixo CO_2

1 INTRODUÇÃO

Cimento Portland é um produto à base de clínquer. O clínquer é uma mistura de rochas carbonáticas e argila, que são moídas, homogeneizadas e submetidas à calcinação em altas temperaturas. Esse processo resulta em altas emissões de CO_2. A produção de 1.000 kg de cimento gera aproximadamente 600 kg de CO_2 e a produção mundial resulta em um total de 5%-8% das emissões de carbono do mundo. Além do CO_2, outros gases são liberados na produção de cimento, como dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e compostos contendo chumbo, todos os quais são poluentes. (Boakye & Khorami, 2023)

Uma solução viável para aplicações em larga escala é o uso de MCMs (Materiais Cimentícios Suplementares) misturados com clínquer. Isso é amplamente adotado desde a década de 1990, principalmente com escória e cinza volante. No entanto, a disponibilidade desses materiais é limitada e depende de outros processos industriais. Portanto, a aplicação de outros materiais, como argilas calcinadas e filer calcário, que estão amplamente disponíveis em todo o mundo, é um passo necessário na produção sustentável de cimento. No geral, a substituição de clínquer por MCMs reduz o consumo de energia na produção de cimento, bem como as emissões de CO_2. (Raghav et al., 2021; Scrivener, 2014; Snellings et al., 2023)

No Brasil, a relação clínquer/cimento caiu de 80% em 1990 para 68% em 2014, com previsão de atingir 59% até 2030, uma das menores globalmente. Isso reduziu as emissões de CO_2 de 0,56 para 0,48 toneladas por tonelada de cimento. A substituição de clínquer por MCMs é consolidada, mas é necessário desenvolver materiais globais, econômicos e eficientes, como a argila calcinada. Além disso, reduzir o volume de concreto nas construções e usar concretos de alta resistência, com MCMs reativos como sílica ativa e nanossílica, pode diminuir ainda mais as emissões, melhorando a sustentabilidade da construção. (Cement, 2021)

Os benefícios do uso de argila calcinada em cimentos mistos são estabelecidos na literatura. Muitos estudos mostram que o uso deste MCS aumenta a resistência à compressão (fc) em argamassas (Barbalho et al., 2020; Bediako et al., 2017; Moreira & Rego, 2020; Noor-ul-Amin, 2012). A composição química da argila bruta, temperatura de calcinação, finura do material e teor de substituição no cimento misto são influentes na resistência à compressão dos materiais utilizando cimentos mistos com argilas calcinadas. Portanto, o teor ideal de substituição depende da argila calcinada usada. (Lins, 2018; Tironi et al., 2014)

Zampieri (1989) estudou argilas com diferentes teores de caulinita, demonstrando que mesmo com impurezas, esses materiais têm reatividade potencial (Zampieri, 1989). As argilas brutas, amplamente disponíveis em todo o mundo, precisam ser extraídas, calcinadas e moídas para se tornarem argilas calcinadas. Esses processos são essenciais para transformar as argilas em um material reativo. As argilas cauliniticas são as mais adequadas para a produção de argilas calcinadas, apresentando o maior potencial de atividade pozolânica. (Gartner, 2004; Mehta & Monteiro, 2006; Scrivener et al., 2018)

Portanto, a reatividade das argilas calcinadas depende principalmente da estrutura cristalina da argila bruta. Uma caulinita desorganizada, quando submetida à calcinação e moagem adequadas, tem seu potencial pozolânico maximizado, permitindo maior substituição e mantendo o desempenho. Além do teor de caulinita, a temperatura de calcinação é crucial; temperaturas baixas não convertem caulinita em metacaulinita, enquanto temperaturas altas causam nova cristalização, ambas limitando a reatividade. Muitos estudos mostram que a substituição por MCSs aumenta a resistência à compressão (fc) devido à reação pozolânica que consome CH para produzir C-S-H adicional, o principal componente responsável pela fc (Cordeiro et al., 2008; Fernandez et al., 2011).

A incorporação de argilas calcinadas ao cimento não traz aceleração da resistência nas idades iniciais, o que representa um desafio significativo para o desempenho mecânico inicial. No entanto, a adição de nanossílica pode mitigar esse problema. Estudos indicam que a nanossílica, devido à sua alta reatividade, promove uma maior densificação da matriz cimentícia e acelera a hidratação do cimento, resultando em um aumento significativo da resistência à compressão nas idades iniciais das pastas de cimento. Dessa forma, a combinação de argilas calcinadas com nanossílica não só melhora a sustentabilidade do cimento, mas também assegura um desempenho mecânico robusto desde os primeiros dias de cura (Duarte & Silva, 2020).

A nanossílica é um MCS altamente reativo, que promove a redução da porosidade e permeabilidade, melhora a zona de transição intersticial, aumentando a densidade da matriz cimentícia e, finalmente, melhorando o fc, especialmente nas idades iniciais (Nunes et al., 2016). As nanopartículas de SiO2 têm alto potencial reativo, consumindo CH para formar C-S-H adicional pela reação pozolânica singth(Singh et al., 2013). A alta área superficial devido à nanoescala das partículas altera a cinética de hidratação do cimento, acelerando a reação (Land & Stephan, 2015). Ambos esses efeitos resultam em um aumento no fc nas idades iniciais (Lim et al., 2018).

Além disso, o uso de nanossílica afeta a interação entre o cimento e outros componentes, como aditivos superplastificantes, influenciando assim o comportamento reológico dos materiais cimentícios (García-Taengua et al., 2015; Li et al., 2017).

A combinação de dois MCS com cimento, criando uma mistura ternária, pode ser usada para promover benefícios de ambos os materiais na mistura. Dependendo dos materiais, um efeito sinérgico também pode ocorrer, melhorando ainda mais a mistura. A nanossílica já foi usada em misturas ternárias com sílica ativa e metacaulim ou argila calcinada (Andrade et al., 2019; Pinheiro et al., 2023; Sousa, 2019), produzindo resultados promissores.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os seguintes materiais foram utilizados neste trabalho:

- CPI (cimento Portland 100): Cimento Portland CPI 40, produzido apenas com clínquer e gesso e adquirido em sacos de 50 kg, comercializado pela Cimentos Poty, da Votorantim;
- NS: nanossílica coloidal dispersa em água com teor de sólidos de 30%, produzida pela AkzoNobel Brasil;
- AC: argila calcinada produzida em laboratório;
- Aditivo superplastificante Viscocrete 6900, fornecido pela SIKA.

A argila calcinada foi produzida usando argilas brutas de um depósito localizado no Distrito Federal. Esta argila bruta foi calcinada a 850 °C por 2 horas em um forno mufla. A temperatura de calcinação foi escolhida com base na literatura (Fernandez et al., 2011; Pinheiro et al., 2023). Após a calcinação, a argila foi resfriada à temperatura ambiente, até que o material atingisse aproximadamente 25 °C (Almenares et al., 2017; Pinheiro, 2016). Este material foi então moído, utilizando um equipamento de abrasão Los Angeles. O equipamento Los Angeles consiste em um cilindro de aço, fechado em ambas as extremidades, com diâmetro interno de 710 ± 5 mm e comprimento interno de 508 ± 5 mm. O cilindro gira a 30-33 rpm. A moagem foi realizada até que a argila calcinada apresentasse uma granulometria similar à do cimento. A carga de moagem consistia em 15 esferas de aço com 47 mm de

largura, pesando aproximadamente 420 g cada. O tempo de moagem foi de 4 horas. Os parâmetros de granulometria, obtidos por granulometria a laser, estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas do cimento CPI, argila calcinada, fíler sílicico e nanossílica

Propriedade do Material		CPI	AC	NS
Composição química (%)	SiO_2	19,82	57,65	90,61
	Al_2O_3	4,78	34,54	<LQ
	MgO	<LQ	0,26	0,1
	Fe_2O_3	3,13	3,21	0,11
	CaO	61,47	<LQ	0,02
	Na_2O	0,11	<LQ	2,03
	K_2O	0,33	1,1	0,03
	TiO_2	0,24	1,77	0,03
	P_2O_5	0,16	<LQ	<LQ
	MnO	<LQ	<LQ	<LQ
	SO_3	2,75	<LQ	-
	Outros	-	-	0,9
	Perda ao Fogo	1,47	0,74	6,19
Massa Específica (g/cm^3)		3,11	2,66	1,2*
Superfície Específica (m^2/g)		2,86	17,96	80*
Diâmetro médio da partícula (µm)		21,65	19,13	0,022

*Valores fornecidos pelo fabricante

Os resultados dos testes de caracterização dos materiais estão mostrados na Tabelas 1 . A composição química foi obtida com Fluorescência de Raios-X, realizada em um espectrômetro Bruker S8 Tiger equipado com tubo de Rh. A massa específica foi determinada com um picnômetro Penta. A distribuição do tamanho das partículas foi determinada por granulometria a laser, utilizando um Analisador de Tamanho de Partícula Cilas 1180, com precisão entre 0,04 e 2.500 µm e com álcool (99,8%) como meio dispersante. A área específica superficial foi calculada pelo método BET, utilizando o equipamento Nova Station A. Foi utilizado fluxo de nitrogênio, a temperatura foi mantida a 77,350 K e a análise durou 33 minutos.

A mineralogia da argila in natura antes da calcinação e da argila calcinada foi avaliada com padrões de difração de raios-X, mostrados na Figura 1. Um pico de quartzo pode ser detectado em ambos, e picos de caulinita são encontrados na argila in natura. Após a calcinação, esses picos de caulinita não são mais detectados, evidenciando que o material anterior perdeu sua estrutura cristalina e, portanto, não é mais detectável por difração de raios-X. A conversão da caulinita para uma forma amorfa (metacaulinita) é benéfica para a reatividade; portanto, esse resultado demonstra que o processo de calcinação adotado foi eficaz (Almenares et al., 2017).

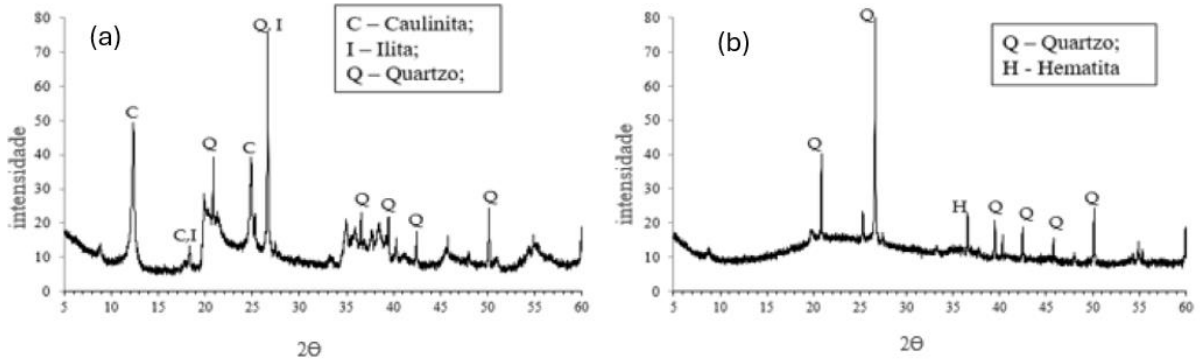


Figura 1 - (a) Difração de raio x amostra de argila in natura; (b) difração de raios x argila calcinada

2.2 COMPOSIÇÃO DA PASTA E PREPARAÇÃO

No presente trabalho, foram produzidas quatro pastas de cimento com diferentes cimentos mistos. A escolha seguiu critérios utilizados no trabalho de Pinheiro (2023). Uma pasta de cimento Portland comum (REF) foi utilizada como referência. Pastas binárias com 25% de argila calcinada e 2% de nanossílica foram usadas para avaliar seus efeitos individuais. Por fim, uma pasta ternária com 23% de AC e 2% de NS foi usada para estudar seu efeito combinado. A composição em massa das pastas é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição em massa das pastas estudadas

Mix	CPI (g)	AC (g)	NS (nanossílica)	Água (g)	SP (Superplastificante) (g)	Mini-Slump diâmetro (mm)
REF	1200	-	-	479,64	1,2	90
REF2NS	1176	-	80 (24)	421,12	9,6	92
AB	900	300	-	478,92	3,6	93
AB2NS	900	276	80 (24)	419,77	14,1	96

A mistura foi realizada em um misturador planetário, de acordo com a norma brasileira (ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019), com adaptações para misturar pastas. A relação a/b (água/aglomerante) foi fixada em 0,40 para todas as pastas, e a trabalhabilidade, medida pelo ensaio mini-slump (Kantro,1980) foi fixada em 94 ± 5 mm, considerada ideal para moldagem. Para alcançar a trabalhabilidade desejada, foi utilizado um aditivo superplastificante. Para manter a relação a/b em 0,40 , o teor de água da nanossílica coloidal e do aditivo superplastificante foram subtraídos da água adicionada à mistura.

Durante a moldagem, o teor de água presente na nanossílica e no aditivo superplastificante foi subtraído do teor de água adicionado diretamente à mistura, a fim de manter a mesma relação a/b. O procedimento de mistura ocorreu da seguinte forma: água, superplastificante e nanossílica foram adicionados primeiro ao recipiente, seguidos pelo cimento (já misturado). Os materiais foram então misturados por 60 s em rotação lenta, descansados por 90 s e misturados em rotação rápida por 90 s. A pasta foi então colocada em moldes cilíndricos de 5 × 10 cm, desmoldados após 24 horas e depois curados por imersão em água saturada de cal até a idade do ensaio.

2.3 ENSAIOS REALIZADOS

A determinação da resistência à compressão (fc) foi realizada aos 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação, seguindo os procedimentos prescritos pela ABNT NBR 7215:2019, utilizando 3 corpos de prova para cada idade. A fc final foi obtida como a média dos 3 resultados.

Análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em amostras de pasta de cimento, aos 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. As amostras foram obtidas a partir dos corpos de prova rompidos na fc. A hidratação foi interrompida por imersão em isopropanol por 24 horas e secagem a 40 °C por 6 horas (Scrivener, Karen L. ; Snellings, Ruben ; Lothenbach, 2018). Próximo à idade do ensaio, os fragmentos de pasta de cimento foram moídos usando um moinho de panela e almofariz de ágata.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada usando um Shimadzu DTG-60H, entre 25 e 600 °C, com rampa de aquecimento de 20 °C/min, fluxo de nitrogênio de 10 mL/min, utilizando cadinhos de alumínio de 70 µL. A massa da amostra foi aproximadamente 15 mg.

A porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) foi realizada utilizando um porosímetro Micromeritics, modelo 9320. O ângulo de contato foi de 130°; o mercúrio utilizado tinha uma tensão superficial de 0,485 N/m e massa específica de 13,5335 g/mL. O intervalo de pressão utilizado no teste foi entre 0,50 psi e 29.472,38 psi.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são demonstrados os resultados obtidos na pesquisa.

3.1 TEOR DE ADITIVO SUPERPLATIFICANTE X ÁREA SUPERFICIAL

No estado fresco, o parâmetro adotado para avaliar as pastas foi o mini-abatimento, indicando a trabalhabilidade (Kantro, 1980). Este parâmetro foi fixado e o teor de aditivo superplastificante nas pastas foi dosado para atingir a consistência desejada. Alguns estudos indicam que para uma relação a/agl constante, o aumento da área superficial total dos sólidos leva a diminuição da trabalhabilidade (Barbalho et al., 2020; Lins, 2018; Scrivener et al., 2004; Sousa & Rêgo, 2020, 2021; Xu et al., 2024). Este aumento foi constatado no presente trabalho, houve aumento de demanda nas pastas contendo argila calcinada e também nanossílica. Os dados de teor de superplastificante e área superficial total das pastas estão na

Tabela 3.

Tabela 3 - Teores de aditivo superplatificante e área superficial total das pastas

Traço	Ast (m²)	SP/CPI (%)	SP/SÓLIDOS (%)
REF	3432,0	0,10%	0,10%
REF2NS	5283,4	0,82%	0,80%
AB	5697,0	0,40%	0,30%
AB2NS	7724,8	1,60%	1,20%

3.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os valores de fc foram encontrados para todas as pastas, aos 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. Os resultados estão mostrados na Figura 2. Um índice de desempenho, comparando os resultados de fc das pastas REF em cada idade, também foi calculado e é apresentado com a média de fc na Tabela 4. Em todas as idades, a pasta REF2NS apresentou a fc mais alta, seguida pela pasta AB2NS, que exibiu uma tendência de crescimento de resistência similar. Ambas as pastas continham nanossílica, o que acelerou o desenvolvimento da resistência até os 7 dias de hidratação. Este efeito é esperado devido ao efeito de nucleação da nanossílica, que fornece locais adicionais para a formação de hidratos, e está bem estabelecido na literatura. No entanto, vale ressaltar que aos 28 dias, as pastas sem nanossílica alcançam valores de resistência mais próximos às pastas REF2NS e AB2NS.

As pastas com argila calcinada (AB e AB2NS) apresentaram desempenho mecânico similar aos seus equivalentes (REF e REF2NS) após 1 dia de hidratação. A diferença relativa entre eles nessas idades foi sempre inferior a 5%. Esse resultado mostra que mesmo com um alto teor de substituição, esta argila calcinada promoveu ganho de resistência suficiente para compensar o menor teor de clínquer, como resultado da reação pozolânica. Aos 1 dia, uma vez que a reação pozolânica não ocorre com frequência significativa em argilas calcinadas, a diferença entre as pastas com e sem argila calcinada é maior.

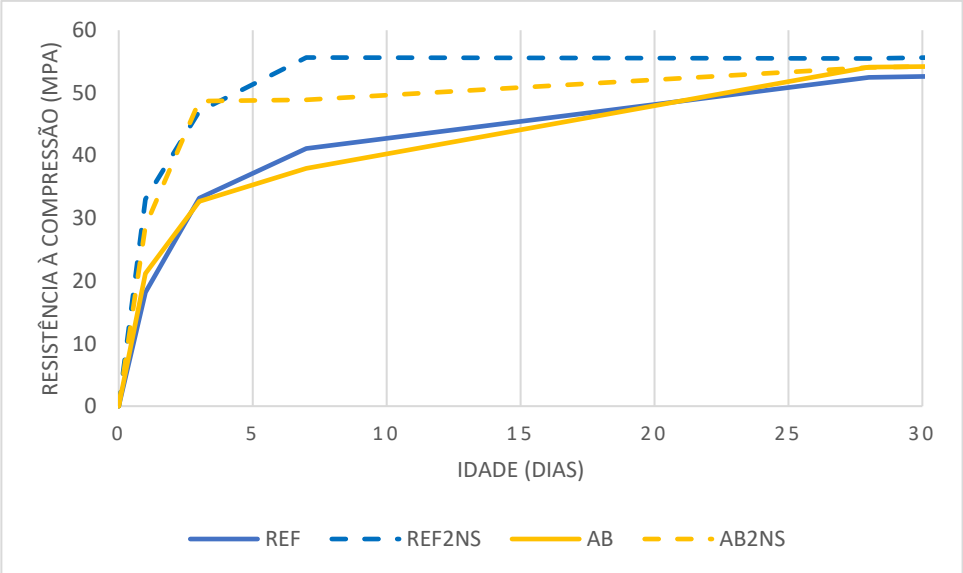


Figura 2 Resistência à compressão das pastas aos 1, 3, 7 e 28 dias

Tabela 4 Resistência e índice de desempenho das pastas com 1,3,7 e 28 dias de hidratação.

Tempo (dias)	REF		REF2NS		AC		AC2NS	
	fc (MPa)	índice de desempenho (%)	fc (MPa)	índice de desempenho (%)	fc (MPa)	índice de desempenho (%)	fc (MPa)	índice de desempenho (%)
1	19,06	100	31,69	166	17,28	91	25,49	134
3	33,24	100	44,93	135	33,12	100	43,81	132
7	34,63	100	52,04	150	36,5	105	51,21	148
28	52,5	100	56,94	108	53,87	103	54,6	104

Ao comparar a pasta REF2NS com a pasta REF, observa-se um aumento na resistência de 66%, 35%, 50% e 8% para 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação, respectivamente. Por outro lado, ao fazer a mesma comparação entre as pastas AB2NS e AB, as diferenças nessas idades são de 48%, 32%, 40% e 1%. Portanto, observa-se que a inclusão de 2% de nanosilica beneficiou a pasta REF em maior medida do que a mistura binária com argila calcinada.

3.3 TGA

A análise termogravimétrica (TGA) foi utilizada para determinar o teor de CH nas pastas hidratadas, a fim de compreender melhor o comportamento pozolânico. Para isso, a perda de peso devido à decomposição de CH foi identificada e medida. A Figura 4 mostra as curvas TG e DTG para a pasta OPC em 1 dia, exibindo um intervalo de perda de peso (410-460 °C), que foi semelhante para todas as pastas. Com os valores de perda de peso, o teor de CH nas amostras foi calculado usando estequiometria. Além disso, um índice de CH foi calculado para comparar todas as amostras com a mistura de OPC. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

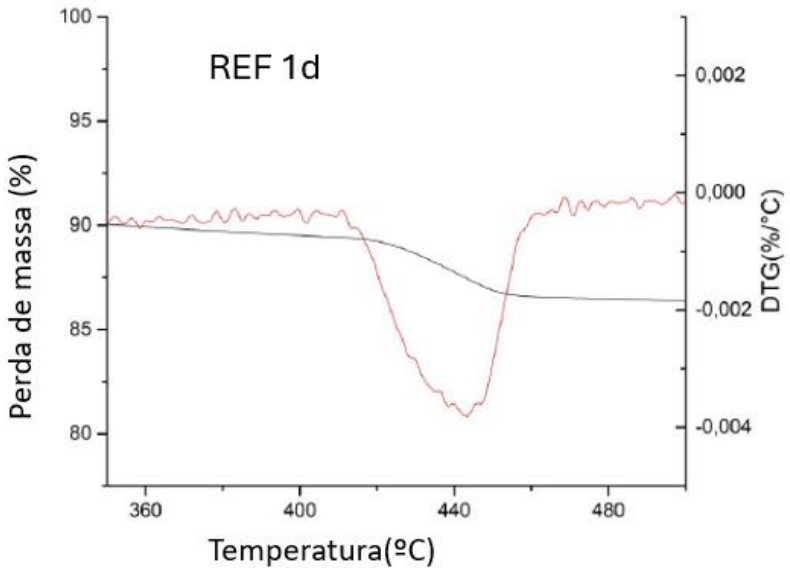


Figura 3 Curvas de TG e DTG na pasta REF com 1 dia de idade

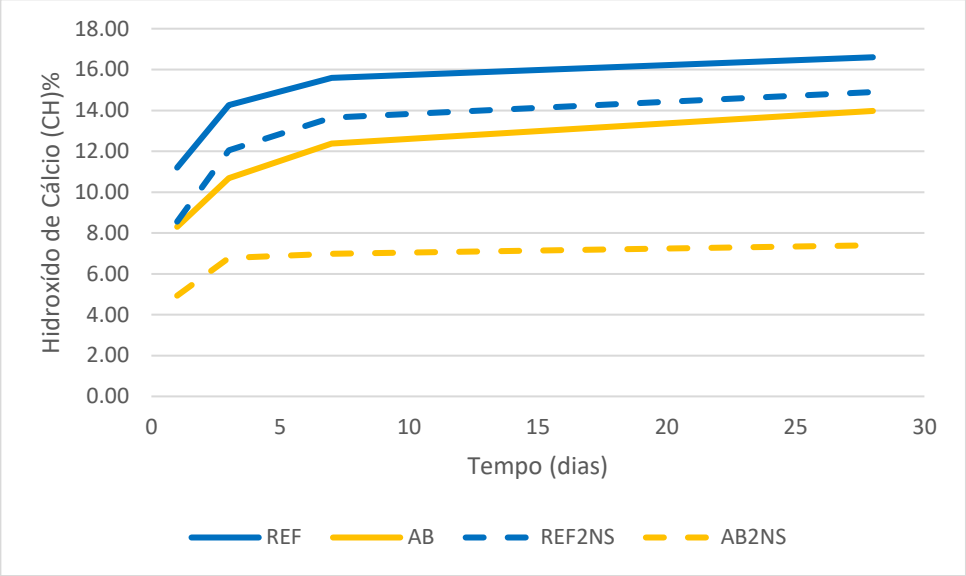


Figura 4 Teor de CH nas pastas ao longo do tempo

Como esprado, em todas as idades, o teor de CH foi maior para as pastas de OPC, aumentando constantemente à medida que a hidratação avançava. Nas pastas mistas, o menor teor de clínquer e a reação pozolânica são responsáveis por diminuir o teor global de CH. Na pasta 25CC, o índice de CH segue uma tendência decrescente, mostrando a progressão da reação pozolânica com o tempo. Por outro lado, a pasta 2NS mostra um aumento do índice de CH ao longo do tempo. Isso indica que o déficit no teor de CH em comparação com a pasta de OPC diminui, indicando que a reação pozolânica é mais proeminente nas idades iniciais com este material. A mistura ternária sempre apresentou o menor teor de CH, devido a uma combinação de baixo teor de clínquer e alta atividade pozolânica tanto nas idades iniciais quanto nas posteriores (Andrade et al., 2019; da Silva Andrade et al., 2018).

3.4 PIM

A Figura 5 demonstra que as amostras com adição de argila calcinada obtiveram maior diminuição do tamanho de poros, nota-se um refinamento dos poros quando observada a **Error! Reference source not found.**. Mesmo nas amostras que apresentam um aumento da porosidade é possível identificar um refinamento dos poros em comparação com a pasta de referência.

Nas Figuras 5 e 6, são apresentadas a porosidade total com distribuição do tamanho médio dos poros e a quantidade de volume intrudido nos poros capilares grandes ou macroporos (10.000nm – 50 nm), nos poros capilares médios ou mesoporos (50nm – 10 nm) e nos géis poros (<10nm).

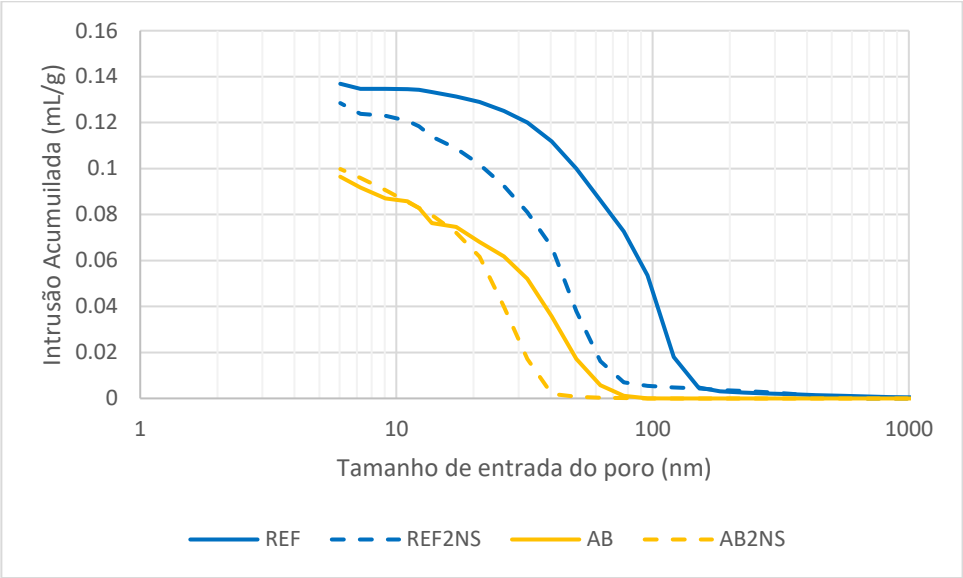


Figura 5 - Intrusão de mercúrio em relação ao tamanho do poro nas amostras com 28 dias de idade. Valor incremental.

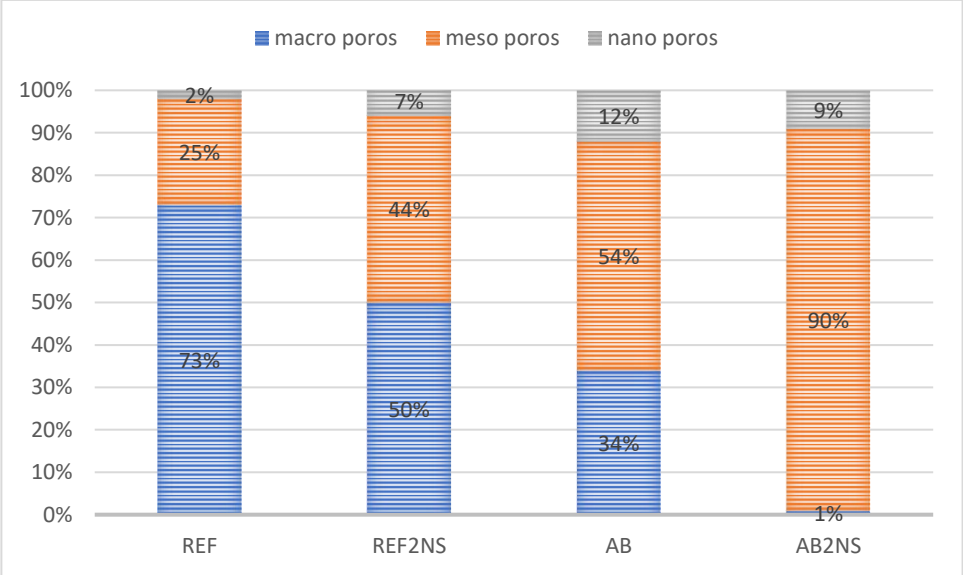


Figura 6- Distribuição dos poros das pastas aos 28 dias

As amostras apresentaram uma redução significativa no volume de macroporos em comparação com a amostra REF, destacando-se a pasta AB2NS, que registrou apenas 1% de macroporos. Esse fenômeno pode ser atribuído à atividade pozolânica, que resulta no tamponamento dos poros pela formação de C-A-S-H, e ao efeito de pontos de nucleação, tornando a reação de hidratação mais eficiente.

4 CONCLUSÕES

Das seguintes conclusões podem ser tiradas dos resultados experimentais:

- A pasta REF2NS mostrou consumo de CH pela reação pozolânica desde o primeiro dia de hidratação e acelerou a hidratação do clínquer, aumentando a resistência à compressão em

50% aos 7 dias. Além disso, apresentou o maior resultado de resistência à compressão aos 28 dias;

- A pasta AB revelou um consumo de hidróxido de cálcio (CH) devido à reação pozolânica, sendo mais evidente em idades posteriores. Os resultados de resistência à compressão superaram as da pasta REF após apenas 3 dias, evidenciando sua eficácia. Esse desempenho robusto destaca a viabilidade dessa formulação como uma opção promissora, especialmente para substituição em alto teor de clínquer, atingindo até 25%. Esses achados não só ressaltam a capacidade em oferecer propriedades mecânicas superiores, mas também indicam sua relevância para promover a sustentabilidade na indústria cimenteira.
- Na pasta AB2NS, embora o consumo de CH tenha sido aumentado, indicando que a reação pozolânica ocorre com mais frequência nessa mistura, os resultados de resistência à compressão indicaram um efeito sinérgico.

Com base na observação do efeito combinado da adição de nanossílica (NS) e argila calcinada (AC) nos cimentos, fica claro que os benefícios de ambas as adições podem ser complementares. Embora os cimentos com argila calcinada possam apresentar um menor ganho de resistência nas idades iniciais, a inclusão de nanossílica pode compensar essa deficiência, resultando em um desempenho global aprimorado. Portanto, a combinação desses aditivos representa uma estratégia promissora para otimizar as propriedades dos materiais cimentícios, oferecendo uma solução eficaz para os desafios enfrentados na indústria da construção.

REFERÊNCIAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *ABNT NBR 7215: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.* ABNT Rio de Janeiro.

Almenares, R. S., Vizcaíno, L. M., Damas, S., Mathieu, A., Alujas, A., & Martirena, F. (2017). Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. *Case Studies in Construction Materials*, *6*(March), 225–232. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.005

Andrade, S., Henrique, J., Cesar, P., Neiry, A., Lopes, D. M., & Frías, M. (2019). Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. *Construction and Building Materials*, *198*, 445–455. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.235

Barbalho, E. de A., Silva, E. F. da, & Rêgo, J. H. da S. (2020). Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *25*, e-12578.

Bediako, M., Purohit, S. S., & Kevern, J. T. (2017). Investigation into Ghanaian calcined clay as supplementary cementitious material. *ACI Materials Journal*, *114*(6), 889–896.

Boakye, K., & Khorami, M. (2023). Hydration, Reactivity and Durability Performance of Low-Grade Calcined Clay-Silica Fume Hybrid Mortar. *Applied Sciences*, *13*(21), 11906.

Cement, G. (2021). *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, *30*(5), 410–418.

da Silva Andrade, D., da Silva Rêgo, J. H., Cesar Morais, P., & Frías Rojas, M. (2018). Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosilica. *Construction and Building Materials*, *159*, 18–26. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.123

Fernandez, R., Martirena, F., & Scrivener, K. L. (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, *41*(1), 113–122.

García-Taengua, E., Sonebi, M., Hossain, K. M. A., Lachemi, M., & Khatib, J. (2015). Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, *81*, 120–129. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.009

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements. *Cement and Concrete Research*, *34*(9), 1489–1498.

Kantro, D. L. (1980). Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste-a miniature slump test. *Cement, Concret and Aggregates*, 95–102.

Land, G., & Stephan, D. (2015). Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, *57*, 64–67. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.003

Li, M., Zhu, X., Mukherjee, A., Huang, M., & Achal, V. (2017). Biomineralization in metakaolin modified cement mortar to improve its strength with lowered cement content. *Journal of Hazardous Materials*, *329*, 178–184. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.035

Lim, S., Lee, H. S., & Kawashima, S. (2018). Pore structure refinement of cement paste incorporating nanosilica: Study with dual beam scanning electron microscopy/focused ion beam (SEM/FIB). *Materials Characterization*, *145*(April), 323–328. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.045

Lins, D. N. (2018). *Análise da resistência à compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho*.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. *(No Title)*.

Moreira, C., & Rego, J. H. S. (2020). Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC 3. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *25*, e-12575.

Noor-ul-Amin, N.-A. (2012). *Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases.*

Nunes, C., Slížková, Z., Stefanidou, M., & Němeček, J. (2016). Microstructure of lime and lime-pozzolana pastes with nanosilica. *Cement and Concrete Research*, *83*, 152–163. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.004

Pinheiro, D. G. L. (2016). *AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA EM CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) COM DIFERENTES TEORES DE SÍLICA AMORFA*.

Pinheiro, D. G. L., Sousa, M. I. C., Pelisser, F., Terrades, A. M., & Frias, M. (2023). Physical and Chemical Effects in Blended Cement Pastes Elaborated with Calcined Clay and Nanosilica. *Materials*.

Raghav, M., Park, T., Yang, H.-M., Lee, S.-Y., Karthick, S., & Lee, H.-S. (2021). Review of the effects of supplementary cementitious materials and chemical additives on the physical, mechanical and durability properties of hydraulic concrete. *Materials*, *14*(23), 7270.

Scrivener, K. L. (2014). Options for the future of cement. *Indian Concr. J*, *88*(7), 11–21.

Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, *12*, 411–421.

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, *114*, 2–26.

Scrivener, Karen L. ; Snellings, Ruben ; Lothenbach, B. (2018). *A pratical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Crc Press.

Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, *47*, 1069–1077. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052

Snellings, R., Suraneni, P., & Skibsted, J. (2023). Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, *171*, 107199.

Sousa, M. I. C. (2019). Microestrutura de pastas de cimento ternárias com metacaulim e nanossílica. In *Departamento De Engenharia Florestal*. http://www.pgea.unb.br/~lasp/research/DEFESA_VALERIO_AYMORE_MARTINS_DM-500_2012.pdf

Sousa, M. I. C., & Rêgo, J. H. da S. (2020). Hidratação de pastas de cimento ternárias com metacaulim e nanossílica nas idades iniciais. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *25*(4). https://doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1165

Sousa, M. I. C., & Rêgo, J. H. da S. (2021). Effect of nanosilica/metakaolin ratio on the calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H) formed in ternary cement pastes. *Journal of Building Engineering*, *38*(June 2020). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102226

Tironi, A., Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2014). Kaolinitic calcined clays–Portland cement system: Hydration and properties. *Construction and Building Materials*, *64*, 215–221.

Xu, Z., Guo, Z., Li, S., Chen, G., Liu, C., Liu, C., Zhao, Y., & Gao, J. (2024). Effect of nano-SiO2 on rheology and early hydration of cement containing high volume slag. *Construction and Building Materials*, *411*, 134539.

Zampieri, V. A. (1989). Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas. *Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação Em Mineralogia e Petrologia. Dissertação de Mestrado.*, 212.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DURABILIDADE DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM LIGANTES RECUPERADOS A PARTIR DA FRAÇÃO CIMENTÍCIA DE RESÍDUOS DE BETÃO

Ricardo Cruz[a]; José Bogas[b]; Sofia Real[c], José Rodrigues[d]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

[c]Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, sreal@lnec.pt

[d]IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.frederico@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A estabilização química é essencial para garantir uma adequada durabilidade em ambiente externo dos blocos de terra comprimida (BTC). Embora o cimento Portland (CP) seja o estabilizante mais eficaz e utilizado, é incompatível com a natureza ecológica e sustentável desta técnica de construção. Como tal, é urgente procurar estabilizantes alternativos mais ecológicos, como o cimento reciclado (CR). Resumidamente este ligante resulta da termoativação de resíduos cimentícios recuperados de betão e argamassa. O objetivo é desenvolver soluções com materiais de baixa energia incorporada, como o CR e os resíduos de construção e demolição (RCD).

Assim, foi realizado um extenso trabalho experimental que teve por objetivo analisar a durabilidade de BTC produzidos com substituição parcial a total de CP por CR e solo por RCD. Consideraram-se várias composições, envolvendo diferentes tipos de estabilizante (CP42.5, CP32.5, CR proveniente de pasta de cimento (CRP) ou de betão (CRB)), teor de estabilizante (0, 4% e 8%), percentagens de substituição de CP por CR (0, 20, 50 e 100%), teor de RCD (0, 15 e 25%) e teor de humidade (seco, saturado, em equilíbrio com o ambiente laboratorial). O CRB foi obtido através do método de separação recentemente desenvolvido no Instituto Superior Técnico, alcançando purezas de cerca de 67% na fração cimentícia. Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água por imersão e capilaridade, permeabilidade ao vapor, erosão por gotejamento (*drip test)* e erosão acelerada (*spray test*). Para efeitos de comparação foram considerados BTC de referência não estabilizados (NE) ou com incorporação de apenas CP.

Os BTC estabilizados com CR demonstraram resultados muito promissores, especialmente na redução da suscetibilidade à água. O comportamento dos BTC foi afetado pelo teor de ligante, teor de água de mistura e método de compactação. Os BTC com CP apresentaram melhor desempenho mecânico e menor absorção do que os BTC com CR, dado terem atingido maior compacidade. Porém, a erosão acelerada e a permeabilidade ao vapor não foram significativamente afetadas pelo tipo de ligante. A incorporação de RCD, até 25%, conduziu a soluções de maior compacidade e, como tal, melhores características mecânicas e durabilidade. Assim, a substituição parcial de solo por RCD é viável, conduzindo a soluções mais sustentáveis. Em contacto com água, os NE desintegraram-se totalmente após poucos minutos de imersão e erodiram-se em toda a sua espessura nos ensaios de erosão acelerada. No entanto, a estabilização dos BTC com CR permitiu que os blocos não sofressem dano após imersão, que atingissem a classe máxima de resistência à erosão e que triplicassem a resistência à compressão. Assim, conclui-se que o CR é uma alternativa viável ao CP.

Palavras-chave: Bloco de terra comprimida; cimento reciclado; durabilidade; agregado reciclado; resistência à água

1 INTRODUÇÃO

A técnica de blocos de terra comprimida (BTC) explora a estabilização mecânica para melhorar o desempenho da construção em terra, com ressurgido interesse em edificações de reduzido porte (Sujatha & Selsia Devi, 2018). No entanto, devido à sua fraca resistência à água, é indispensável proceder à estabilização química para garantir condições adequadas de durabilidade em ambiente exterior (Walker, 1995). O cimento Portland (CP) é o estabilizante mais eficaz e utilizado nos BTC (Kamwa et al., 2022). Durante o processo de hidratação do cimento, forma-se C-S-H, que se dispersa e promove a desaglomeração e ligação das partículas de solo, formando uma matriz solo-cimento estável e coesa (Kouamé et al., 2021). Porém, o uso de CP aumenta significativamente a energia incorporada dos BTC, sendo incompatível com a natureza ecológica e sustentável da construção em terra. De facto, estima-se que por cada tonelada de clínquer produzido, sejam libertados mais de 800 kg de CO_2 (Bogas et al., 2019). Porém, os vários estabilizantes alternativos estudados não têm tido o sucesso pretendido, quer por razões de reduzida viabilidade prática quer pelo facto de comprometerem a estabilidade dos BTCs quando expostos à água. Por exemplo, Sekhar & Nayak (2018) observaram a desintegração completa de blocos estabilizados com escória granulada de alto-forno, quando submersos em água.

Uma outra preocupação mundial é o aumento dos resíduos de construção e demolição (RCD) e a sua posterior eliminação. Desta forma, a possibilidade de incorporar estes resíduos na construção em terra, sem prejudicar de forma significativa as suas propriedades, tornou-se também um tema de interesse. A utilização direta de RCD em substituição parcial da terra tem sido a forma mais simples e a única explorada na produção de BTC. Narayanaswamy et al. (2020) verificaram que a incorporação de até 50% RCD não afetou significativamente a resistência à compressão saturada e a absorção de água de BTCs estabilizados com CP e cal. Por sua vez, Bogas et al. (2019) observaram que BTCs estabilizados com CP ou CP e cal, e com até 15% RCD apresentaram adequado desempenho em termos de resistência mecânica, absorção por imersão e capilaridade e erosão à água. Mais recentemente, tem sido também explorada a reutilização de resíduos de materiais de base cimentícia na produção de ligante reciclado, capaz de responder em simultâneo à necessidade de encontrar um ligante alternativo de mais baixo carbono e à reutilização efetiva dos RCD (Carriço et al., 2022). Basicamente, o cimento reciclado (CR) resulta da termoativação a baixa temperatura de resíduos cimentícios recuperados de resíduos de betão e argamassa, de modo a recuperar a capacidade de hidratação destes materiais (Bogas et al., 2020). Os mais recentes desenvolvimentos, mostram que é possível obter CR comparável a CP de baixa de resistência, mas associado a menos de 40% das emissões de CO_2 durante a produção (Sousa & Bogas, 2021) A utilização de CR proveniente de pasta cimentícia produzidas em laboratório (CRP) como estabilizante de BTC foi pela primeira vez explorada por Bogas et al. (2023), tendo-se verificado a sua adequabilidade na melhoria significativa do comportamento mecânico face a BTC não estabilizados. No entanto, a influência do CR na durabilidade dos BTC, e a sua incorporação simultânea com RCD em substituição parcial de solo não foi investigada.

O presente trabalho visa analisar a durabilidade de BTC estabilizados com CRP e CR recuperado de betão antigo (CRB), e com substituição parcial de solo por RCD. Para tal, o estudo envolve a consideração de vários tipos (CP de diferentes classes de resistência, CRP, CRB) e teores de estabilizante (0%, 4% ou 8%), percentagens de substituição de CP por CR (0, 20, 50 e 100%), teores de RCD (0, 15 e 25%) e teores de humidade. Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade, erosão por gotejamento, erosão acelerada e permeabilidade ao vapor de água.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foi utilizado um solo pouco argiloso proveniente de Alcochete (S), que foi ajustado com pó de argila resultante do processo de fabrico de telhas cerâmicas (TV). Este resíduo, sem aproveitamento atual, permite compensar a escassez de material argiloso do solo. A distribuição granulométrica foi realizada de acordo com a LNEC E-239 (1970) e o teor de argila foi determinado por adsorção de raios-X. Os limites de Atterberg foram obtidos conforme a NP-143 (1969), enquanto a massa volúmica e a matéria orgânica foram determinadas de acordo com a NP-83 (1970) e a ARS 1333 (2018), respetivamente. O teor ótimo de água foi estimado de acordo com a ASTM D698 (2021). A absorção de água foi avaliada segundo a EN 1097-6 (2003). O solo S e TV eram compostos por 10,7% e 42,2% de argila e 2,3% e 49,3% de silte, respetivamente, com 8 mm e 1 mm de dimensão máxima, respetivamente. O índice de plasticidade (IP) de S foi 8%, justificando a correção com TV que apresentou um limite de liquidez de 47% e um IP de 21%. A massa volúmica e a absorção de água foram de 2633 kg/m^3 e 1,4% para S, e 2630 kg/m^3 e 1% para TV. O teor ótimo de água de S foi de 12,8%. Por análise de difração de raios-X não se observou a presença de argilas expansivas. O RCD, com máxima dimensão de 8 mm, continha 45,3% de resíduos de betão, 27,9% de pedra natural e 16,4% cerâmicos (EN 933-11, 2011), composto por 26,2% de gravilha, 64,3% de areia e 9,5% de material fino (EN 933-1, 2012), para uma massa volúmica de 2300 kg/m^3 e absorção de água de 4,3% (EN 1097-6, 2003).

O CRB e o CRP foram obtidos a partir de betão e pasta de cimento com mais de 90 dias de idade, respetivamente, sendo produzidos com CEM I 42,5R e uma razão água/ligante (a/l) de 0,55. O processo de obtenção do CRP envolveu a britagem, moagem, peneiração e termoactivação da pasta de cimento. Para a obtenção do CRB, foi necessário realizar a separação prévia dos constituintes do betão, com base no método patenteado por Bogas et al. (2021). A partir de análises de termogravimetria aos resíduos de pasta de cimento e de betão de igual a/l verificou-se que o CRB apresentava um grau de pureza de 67%. A termoativação consistiu no aquecimento do material a uma taxa de 10°C/min até 650°C, onde se manteve por 3 horas. Foi ainda considerado um cimento CEM II B-L 32,5N (CP32,5), mais correntemente utilizado na construção. As propriedades dos ligantes encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos ligantes

Parâmetro	Norma	CP	CP32,5	CRP	CRB
Massa volúmica (g/cm^3)	LNEC E-64 (1979)	3,03		3,00	2,964
Superfície específica (cm^2/g)	EN 196-6 (2018)	4310		98123	78673
Resist. compressão aos 28 dias (MPa)	EN 12390-3 (2021)	56,3	≥32,5 e ≤52,5		
CaO livre (%)	EN 451-1 (2017)	2,7	18,5	17,90	
Consistência normal (a/l)	EN 196-3 (2016)	0,295		0,74	0,54
Tempo de presa inicial/final (min)	EN 196-3 (2016)	160/235	≥75	170/460	>720/<1440

2.2 PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS

Blocos com 295x140x90 mm foram produzidos utilizando uma prensa semiautomática com uma capacidade máxima de compactação de 5-6 MPa. Após a produção, os BTC foram cobertos com uma manga plástica durante 7 dias, seguido de cura ao ar em laboratório. Os BTC foram produzidos com vários tipos (CP, CP32.5, CRP, CRB) e teor de estabilizante (0, 4%, 8%), diferentes percentagens de substituição de CP por CRP (0, 20, 50, 100%) ou por CRB (20, 50%) e de terra por RCD (0, 15, 25%). A substituição de solo por RCD foi realizada de forma direta (8CP) ou mantendo a granulometria da mistura (8CP0RCD, 8CP15RCD, 8CP25RCD). O teor e a composição do ligante nas misturas com CRB foi ajustado de modo a ter em conta a contaminação do CRB por 33% de agregado. Para efeitos de

comparação, foram produzidos blocos não estabilizados (NE) e BTC com 8% CP de igual teor em água (TH) dos BTC com 8% CRP (8CPTH). As composições dos BTC apresentam-se na Tabela 2.

Os BTC foram caracterizados aos 28 dias em termos de massa volúmica no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, absorção por imersão, absorção por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, erosão por gotejamento (*drip test*) e erosão acelerada (*spray test*). A massa volúmica foi determinada em blocos em equilíbrio com o ambiente laboratorial (T=20±3ºC e HR=65±5%), segundo a EN 772-13 (2000). A resistência à compressão foi ensaiada numa prensa Controls, com uma capacidade até 3000 kN, segundo a EN 772-1 (2011) e NBR 8492 (2012), utilizando-se placas de contraplacado na base e no topo de meios blocos. Utilizou-se uma velocidade de 4 kN/s. Para determinar a resistência à compressão não confinada, independente da geometria do bloco, a resistência foi corrigida por um fator de 0,58 (HB-195, 2001). A absorção por imersão foi determinada de acordo com a especificação LNEC E-394 (1993) e a norma NBR 8492 (2012). A absorção de água por capilaridade foi realizada de acordo com as normas NTC 5324 (2004) e EN 772-11 (2011) em meio-blocos previamente secos a 70±5ºC. Os provetes foram ensaiados na direção perpendicular à de assentamento do bloco, sendo imersos numa lamina de 5 ± 1 mm. A permeabilidade ao vapor de água foi avaliada, segundo a ASTM E96 (1995) e EN 1015-19 (1998), em amostras em forma de disco previamente secas a 70±5ºC e utilizando $CaCl_2$ para criar um ambiente seco e promover a transmissão de vapor com um ambiente exterior. A permeabilidade ao vapor foi corrigida considerando a resistência da camada de ar entre a amostra e o $CaCl_2$ (ISO 12572, 2016). Os ensaios de erosão à água foram realizados de acordo com a norma NZS 4298 (1998) em provetes inteiros condicionados em laboratório.

Tabela 2 - Composição dos blocos produzidos

Composição	Ligante	Ligante (%)[a]	Água (%)[b]	RCD (%)[a]	TV (%)[c]	a/l
8CP	CEM I 42,5R	8	9	25	11	1,22
8CPTH	CEM I 42,5R	8	12	25	11	1,62
8CP0RCD	CEM I 42,5R	8	9	0	11	1,22
8CP15RCD	CEM I 42,5R	8	9	15	11	1,22
8CP25RCD	CEM I 42,5R	8	9	25	11	1,22
4CP	CEM I 42,5R	4	9	25	14	2,34
8CP32,5	CEM II B/L 32,5N	8	9	25	11	1,22
8CRP	CRP	8	12	25	11	1,62
4CRP	CRP	4	10	25	14	2,60
80CP20CRP	80%CP+20%CRP	8	9	25	11	1,22
50CP50RCP	50%CP+50%CRP	8	10	25	11	1,35
80CP20CRB	73%CP+27%CRB	8,8	9	25	11	1,11
50CP50CRB	40%CP+60%CRB	10	9	25	11	0,99
NE	-	0	9	25	18	-

[a] % em massa seca de S+TV; [b] % em massa seca de S+TV+RCD; [c] % de massa seca de S

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabela 3 e na Tabela 4 apresentam-se os valores médios de massa volúmica fresca (MV_f), porosidade total (P_T), massa volúmica no estado endurecido em ambiente laboratorial (MV_{lab}), resistência à compressão não confinada seca, saturada e em ambiente laboratorial ($f_{c,un,seca}$, $f_{c,un,sat}$, $f_{c,un,lab}$), absorção por imersão às 24h ($A_{i,24h}$), coeficiente de absorção capilar aos 10 minutos e entre 10 minutos e 6 horas ($C_{abs,10min}$ e $C_{abs,10min-6h,}$), permeabilidade ao vapor de água (P_{VP}), resistência à difusão do vapor de água (μ), taxa de erosão (PE/h) e profundidade de humidade (PH).

Tabela 3 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CP

Propriedades		8CP	8CPTH	8CP0RCD	8CP15RCD	8CP25RCD	4CP	8CP32,5
MV_f (kg/m³)		2160	2150	2170	2150	2160	2170	2160
P_T (%)		26,0	28,1	26,4	26,4	25,8	26,2	26,0
MV_{lab} (kg/m³)		2020	1990	2080	2040	2060	2010	2040
$f_{c,un,seca}$ (MPa)		10,9	10,9	-	-	-	-	-
$f_{c,un,sat}$ (MPa)		3,8	3,3	-	-	-	-	-
$f_{c,,un,lab}$ (MPa)		7,9	7,3	7,9	6,9	8,2	5,5	6,4
$A_{i,24h}$ (%)		10,1	11,9	8,7	9,7	10,2	10,2	10,3
$C_{abs,10min}$ (g/cm^2·min^{0,5})		11,6	19,0	7,4	10,1	10,5	17,1	11,0
$C_{abs,10min-6h}$ (g/cm^2·min^{0,5})		5,3	6,5	5,6	6,0	5,4	8,0	5,5
P_{VP} (x10^{-11} kg/s.m.Pa)		1,16	1,71	1,39	1,27	1,17	1,93	1,35
μ		16,9	11,5	14,2	15,6	16,8	10,2	14,6
PE/h (mm/h)	Drip test	0,0	0,0	-	-	-	-	-
PH (mm)		23,7	31,5	-	-	-	-	-
PE/h (mm/h)	Spray test	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PH (mm)		25,7	66,1	28,3	31,8	21,5	37,3	34,8

Tabela 4 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CR e BTC não estabilizados (NE)

Propriedades		8CRP	4CRP	80CP20CRP	50CP50CRP	80CP20CRB	50CP50CRB	NE
MV_f (kg/m³)		2100	2110	2140	2110	2120	2120	2190
P_T (%)		29,8	28,8	26,6	28,3	27,0	27,0	26,2
MV_{lab} (kg/m³)		1980	1960	2000	1960	2020	2010	2000
$f_{c,un,seca}$ (MPa)		7,0	-	10,8	10,6	8,3	8,2	4,3
$f_{c,un,sat}$ (MPa)		2,8	-	3,6	3,1	3,5	3,2	-
$f_{c,,un,lab}$ (MPa)		5,7	3,5	7,2	6,3	7,2	6,4	2,1
$A_{i,24h}$ (%)		12,2	11,1	10,3	10,6	10,3	10,7	-
$C_{abs,10min}$ (g/cm^2.min^{0,5})		16,1	20,9	10,0	11,5	11,4	15,2	-
$C_{abs,10min-6h}$ (g/cm^2·min^{0,5})		9,3	11,9	5,4	6,2	5,3	6,1	
P_{VP} (x10^{-11} kg/s.m.Pa)		1,62	1,95	1.27	1,23	-	-	2,82
μ		12,1	10,1	15,4	16,0	-	-	7,0
PE/h (mm/h)	Drip test	0,0	-	-	-	-	-	13,8
PH (mm)		39,4	-	-	-	-	-	76,7
PE/h (mm/h)	Spray test	<1,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	207,0
PH (mm)		31,0	90	20,6	28,0	27,9	35,7	-

3.1 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

A porosidade total dos BTCs no estado endurecido variou entre 25,8% e 29,8% (Tabela 3 e Tabela 4), estimada a partir da composição de MV_f e do nível de hidratação do estabilizante (Bogas et al., 2023). Como esperado, MV_f correlaciona-se com P_T (Figura 1), embora a correlação não seja elevada devido ao facto de MV_f considerar toda a água da mistura e P_T ser reduzida da água de hidratação. Daí o NE apresentar maior P_T para um dado MV_f. Os BTC com CR apresentaram menor MV_f e maior P_T do que os BTC com CP, devido à sua maior exigência de água e, como tal, maior a/l. Mesmo considerando composições com o mesmo a/l, P_T foi 6,5% superior nos BTC com CRP (8CRP vs 8CPTH). Logo, para idêntico teor em água, a compactação foi mais difícil nos BTC com CRP. MV_{lab} seguiu a mesma tendência de MV_f, sendo maior nos BTC com CP do que com CR. Porém, MV_{lab} depende também da secagem dos BTC e do grau de hidratação do ligante. Por esse motivo, os BTC não estabilizados tiveram a maior redução de MV_f para MV_{lab}. No entanto, a redução de massa volúmica foi semelhante nos BTC com CP ou CR de igual teor ligante, o que sugere que os BTC com CR atingiram níveis de hidratações semelhante aos BTC com CP. A estabilização com 4% de ligante resultou em MV_{lab} intermédias face aos BTC não estabilizados ou com 8% de ligante. A variação de P_T com o teor de ligante foi pouco significativa. Foi possível produzir os BTC com incorporação parcial de CRB com o mesmo teor de água dos BTC com CP, apresentando exigência de água e relação a/l efetiva semelhante. De facto, tendo em conta a contaminação de 33% agregado, a relação a/l indicada na Tabela 2 para os BTC com CRB

corresponde a um a/l equivalente de 1,22, igual à dos BTC com CP. Assim, P_T foi semelhante nestes BTC. Visto que a substituição de solo por RCD não alterou a granulometria, P_T foi pouco afetada. A maior porosidade dos RCD foi compensada por uma eventual melhoria na compacidade da mistura. A ligeira diminuição de MV_{lab} resulta dos RCD apresentarem menor massa volúmica do que o solo. Devido às semelhanças entre as curvas granulométricas do solo e do RCD, P_T foi semelhante em 8CP e 8CP25RCD.

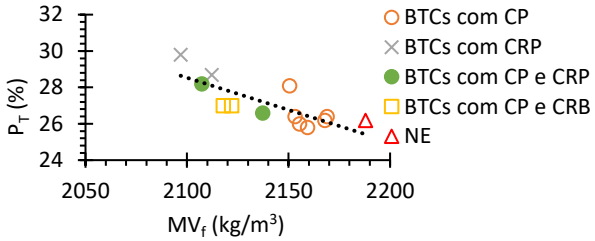


Figura 1 - Relação entre a massa volúmica fresca (MV_f) e a porosidade total (P_T)

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Apenas os BTC estabilizados mantiveram a sua integridade após imersão em água, atingindo $f_{c,sat}$ superiores ao mínimo de 1,5 MPa recomendado na ARS 1333 (2018). Por sua vez, a $f_{c,seco}$ variou entre 4,3 MPa e 10,9 MPa (Tabela 3 e Tabela 4), ultrapassando o mínimo de 3 MPa, recomendado pela mesma norma. A eficácia da estabilização dos BTCs está relacionada com o rácio $f_{c,un,sat}/f_{c,un,seco}$ (Riza et al., 2015). Este rácio foi de 0,29-0,42, com apenas o 8CPTH e o 50CP50CRP ligeiramente abaixo do limite recomendado para BTC com boa durabilidade em ambiente exterior (Heathcote, 1995). Salienta-se a redução de resistência ter sido idêntica a inferior nos BTC com CRP face aos BTC com CP, sugerindo que a eficiência destes estabilizantes foi semelhante.

A $f_{c,un,lab}$ variou entre 3,5 e 8,2 MPa nos BTC estabilizados, aumentando com o teor de ligante. A redução de $f_{c,un,lab}$ foi de 21% e 39% após se reduzir de 8% para 4% de CP e CRP, respetivamente. Ainda assim, mesmo com apenas 4% de ligante a resistência dos BTC com CP e CPR foi 2,6 e 1,7 vezes superior à dos BTC não estabilizados, respetivamente. A resistência foi menor nos BTC com CRP do que nos BTC com CP de igual teor de estabilizante, mesmo para igual a/l (27% superior no 8CPTH do que no 8CRP). Isto resulta de se ter atingido um maior P_T nos BTC com CRP. De facto, verifica-se uma boa relação entre P_T e $f_{c,un,lab}$ quando se tem em consideração diferentes teores de estabilizante (Figura 2), pois a resistência depende da capacidade ligante do estabilizante e da porosidade total. Salienta-se o facto desta relação ser independente do tipo de estabilizante, o que significa que o CP e o CR apresentam capacidade ligante e de hidratação semelhantes. Assim, conclui-se que caso seja possível garantir igual P_T, a resistência é idêntica nos BTC com CP e CRP. Os BTC não estabilizados ou com 4% ligante possuem menor capacidade de ligação para um dado P_T (Figura 2). Acrescente-se que os BTC com 8%CP32,5 tiveram um portamento próximo dos BTC com 4% estabilizante, indicando que o CRP foi mais eficiente do que o cimento menor classe de resistência.

A incorporação parcial de CRP ou CRB conduziu a resistências semelhantes, sendo intermédias da dos BTC com 100% CP ou CRP (Tabela 3 e Tabela 4). A perda de resistência foi inferior a 8 e 20% para 20 e 50% de CR, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4), e para igual a/l, a resistência foi idêntica no 8CPTH e nos BTC com 20% CR. Conclui-se que o CRB foi tão eficiente como o CRP e, consequentemente, o método de separação foi efetivo em produzir este ligante. A resistência não foi significativamente afetada pelo teor de RCD, mas foi ligeiramente superior para 25% RCD, associado a uma ligeira redução de P_T.

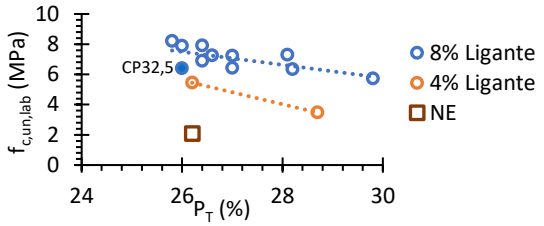


Figura 2 – Relação entre a porosidade total (P_T) e a resistência à compressão em ambiente laboratorial ($f_{c,un,lab}$)

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Os BTC NE desintegraram-se após poucos minutos de imersão, ao contrário dos BTC estabilizados, que se mantiveram intactos ao longo do ensaio, independentemente do tipo e teor de ligante. Todos os BTC estabilizados apresentaram $A_{i,24h}$ bastante inferior a 20%, conforme o recomendado na NBR 8491 (2012) para aplicações em ambientes húmidos. Segundo o ARS 1333 (2018), os BTC com 8% CP atingiram a classe mais baixa de absorção (8-10%) enquanto o 8CRP atingiu a classe mais alta (12-15%).

Apesar de $A_{i,24h}$ ter sido superior nos BTC com CRP do que com CP, esta foi pouco afetada pelo tipo e teor de ligante. A redução do teor de ligante nos BTC com CRP levou a uma diminuição de cerca de 10% na $A_{i,24h}$, enquanto para os BTC com CP foi idêntica (Tabela 3 e Tabela 4). Isto resulta de $A_{i,24h}$ depender mais da porosidade e interconectividade da microestrutura do que da capacidade ligante entre as partículas do solo. Porém, apesar do menor P_T, 8CPTH apresentou $A_{i,24h}$ semelhante a 8CRP. De facto, para igual porosidade, os BTC com CP tendem a apresentar maior absorção do que os BTC com CRP. Segundo Bogas et al. (2020), devido ao CR ser poroso, as pastas com este ligante exibem microestrutura bifásica, composta por porosidade interpartícula e intrapartícula. Como parte da água é absorvida no CR, existe uma redução do espaço interpartícula face às pastas com CP de igual a/l. Assim, para idêntica porosidade, a microestrutura fica mais refinada, diminuindo a interconectividade entre poros. Mais uma vez, os BTC com incorporação parcial de CRP e CRB em substituição de CP apresentaram igual desempenho (Tabela 3 e Tabela 4).

A substituição parcial de solo por RCD aumentou $A_{i,24h}$ (Tabela 3), que contraria a tendência de P_T. A imersão deverá ter permitido que a maior porosidade do RCD ficasse acessível à água, aumentando a absorção. Mais uma vez, as diferenças entre 8CP e 8CP25RCD não foram significativas (Tabela 3).

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Nas Figura 3 e na Figura 4 apresenta-se a evolução da absorção capilar até 72 horas. Pelo menos nas primeiras 6 horas, a absorção evoluiu de forma aproximadamente linear com a raiz do tempo. Depois, ocorreu uma saturação progressiva dos poros de maior conectividade e a participação progressiva dos poros menos acessíveis. Nos primeiros 10 minutos ocorreu uma absorção rápida.

Os blocos estabilizados com CR apresentaram maior absorção às 72 horas (Figura 3 e Figura 4) e maior $C_{abs,10min-6h}$ (Tabela 3 e Tabela 4), em parte devido ao maior P_T e a/l. No entanto, o aumento de $C_{abs,10min-6h}$ nos BTC com 4-8% CRP (48-75%) foi maior do que o verificado na imersão (6-16%), (3.3). Por outro lado, o $C_{abs,10min-6h}$ no 8CPTH foi 31% inferior ao do 8CRP de igual a/l, enquanto a absorção por imersão foi igual. Logo a maior taxa de absorção nos BTC com CRP não se justifica apenas pelo diferente P_T, dependendo também da distribuição da porosidade. Como discutido em 3.3, para a matriz de CR tem uma microestrutura mais refinada, associada a uma maior quantidade de poros de menor dimensão, que promovem maiores forças capilares. Como esperado, ocorreu um aumento de $C_{abs,10min-6h}$ com a redução do teor de ligante e com a utilização de CP32,5. A substituição progressiva de CP por CR aumentou a taxa de absorção, especialmente para teores acima de 50% (Tabela 3 e Tabela 4). Mais

uma vez, os BTC com CRP e CRB tiveram igual desempenho. Não se verificou uma tendência clara de evolução de $C_{abs,10min-6h}$ com a substituição parcial de solo por RCD. Este parâmetro seguiu a tendência observada na resistência à compressão, sendo mais afetado pela matriz em volta do RCD.

Todos os BTC apresentaram "muito baixa absorção" segundo a NTC 5324 (2004) ($C_{abs,10min}$ <20 g/cm^2.min$^{0.5}$).

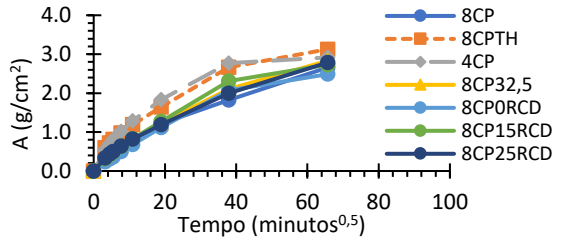


Figura 3 – Absorção capilar ao longo do tempo para BTCs com CP

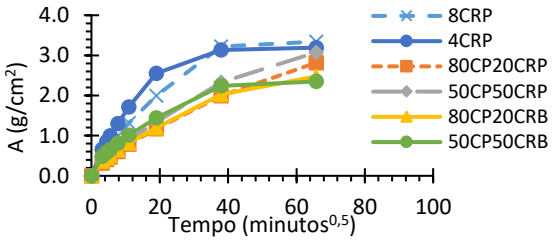


Figura 4 – Absorção capilar ao longo do tempo para BTCs com CR

3.5 EROSÃO POR GOTEJAMENTO (DRIP TEST)

Verifica-se uma elevada eficiência dos estabilizantes na redução da erosão por gotejamento, que simula a ação de chuva ligeira. De facto, não se verificou qualquer dano na superfície dos BTC estabilizados, independentemente do tipo de ligante. Em contrapartida, o BTC NE apresentou uma taxa de erosão de 13,8 mm/h. Segundo a NZS 4298 (1998), os BTC estabilizados inserem-se no índice 2 de erodibilidade (<5 mm erosão) e o NE insere-se no índice 3 (5-10 mm erosão).

Os BTC estabilizados diferiram apenas na penetração de humidade, tendo sido 66% e 25% superior nos BTC com CRP do que no 8CP e 8CPTH, respetivamente, seguindo a tendência dos ensaios de absorção. De facto, este parâmetro avalia apenas a absortividade do bloco sobre condições de baixa pressão, sugerindo que o seu comportamento foi semelhante ao identificado na absorção capilar. Segundo a NZS 4298 (1998), os BTC apresentam desempenho aceitável face à ação de gotejamento caso possuam PH inferior a 120 mm, o que é respeitado por todas composições, incluindo o NE.

3.6 EROSÃO ACELERADA (SPRAY TEST)

Apesar do *spray test* simular a ação de chuva intensa, verificou-se que, para 0,5 bar apenas os BTC NE sofreram erosão significativa. Assim, segundo a norma NZS 4298 (1998), todos os BTC estabilizados enquadram-se no índice de erodibilidade mais baixo (erosão <10 mm). Para permitir uma maior diferenciação, aumentou-se a pressão para 2,5 bar. Mesmo nestas condições a erosão foi desprezável. Apenas os blocos com 100% CRP apresentaram ligeira erosão superficial, inferior a 1mm/h nos BTC com 8%CRP e 1,8mm/h nos BTC com 4% CRP. Taxas de erosão inferiores a 1mm/h também foram reportadas por Cruz et al. (2022) em BTC com 10% CRP. A maior P_T e maior a/l dos BTC com CR terão reduzido a coesão entre partículas. De qualquer forma, mesmo nos BTC com 4% CRP a resistência à erosão da água foi muito superior à dos BTC NE, que para apenas 0,5 bar foram totalmente erodidos em menos de 30 minutos. Segundo a NZS 4298 (1998), o NE seria considerado "não aceite". Assim, fica demonstrado a importância da estabilização nos BTC, bem como a viabilidade do CR.

Tal como no *drip test*, apenas o PH permitiu distinguir o desempenho dos BTC. Dado que PH está relacionado com a absortividade e permeabilidade, esperava-se que os BTC com maior P_T apresentassem maior PH. Porém, a relação entre estes parâmetros foi fraca. Neste caso, PH também é afetado pela qualidade do ligante. Note-se que a entrada de água sob pressão está relacionada com a permeabilidade dos BTC. Assim, visto que esta propriedade é mais afetada pelo diâmetro critico dos

poros do que a absorção (Garboczi, 1995), torna-se mais relevante o refinamento e interconectividade da microestrutura. Desse modo, os BTC com menor teor de ligante ou com ligante de menor classe de resistência apresentaram maior PH (Tabela 3 e Tabela 4). Também os BTC com 8% CRP apresentaram PH semelhante ao 8CP e 2 vezes inferior ao do 8CPTH, o que confirma a possibilidade de maior refinamento da sua microestrutura. Inclusivamente, os BTC com até 20% CRP ou CRB apresentaram desempenho idêntico a superior ao do 8CP. Finalmente, a substituição parcial de solo por RCD resultou numa tendência de evolução do PH semelhante ao observado em 3.2.

3.7 PERMEABILIDADE AO VAPOR

A permeabilidade ao vapor, P_{VP}, e a resistência à difusão, μ, variaram entre 1,16-2,82x10^{-11} kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1} e 7,0-16,9, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4). Cagnon et al. (2014) reportam valores de μ entre 7 e 14 para BTC NE, tendendo a aumentar após estabilização. Note-se que na construção em terra é desejável que μ seja baixa, pois aumenta a capacidade higroscópica e de transmissão de vapor, e consequentemente, a capacidade reguladora da humidade (McGregor et al., 2014).

Como expectável, os BTC NE apresentaram a maior P_{VP} ,sendo aproximadamente 2,5 vezes e 1,7 vezes superior à de 8CP e 8CRP, respetivamente (Tabela 3 e Tabela 4). Entre os BTC estabilizados, o 4CP e o 4CRP apresentaram os valores mais elevados de P_{VP}, uma vez que estas composições estão associadas a porosidades mais grosseiras e de maior interconectividade. Em seguida, o 8CRP e o 8CPTH (de maior a/l) apresentaram maior permeabilidade, cerca de 40-47% superior à do 8CP (Tabela 3 e Tabela 4). A maior P_T justifica em parte os valores mais elevados de permeabilidade. No entanto, apesar de 8CPTH ter P_T 6% mais baixa, P_{VP} foi ligeiramente superior à de 8CRP com o mesmo a/l (Tabela 3 e Tabela 4). Isso sugere, mais uma vez, que, para o mesmo nível de porosidade, o CRP conduz a matrizes mais refinadas e menos interconectadas, reduzindo a permeabilidade. A substituição parcial de CP por CRP resultou em valores intermediários de permeabilidade face a 8CP e 8CRP. No entanto, até 50% de substituição, a permeabilidade sofreu alteração pouco significativa e foi sempre inferior à de 8CPTH (Tabela 3 e Tabela 4). Conclui-se que a substituição de CP por CRP tende a aumentar ligeiramente a resistência à difusão, para igual P_T. Porém, como a utilização de CRP conduz a maiores porosidades, o CRP e o CP deverão ter um impacto semelhante na capacidade de regularização de humidade. A P_{VP} diminuiu com o aumento do teor de RCD (Tabela 3). Neste caso, conforme discutido para as restantes propriedades, terá ocorrido uma densificação da matriz, aumentando a resistência à passagem de vapor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada a durabilidade de BTC estabilizados com diferentes teores de cimento reciclado (CR), recuperado de pasta (CRP) ou de betão (CRB), e adição de até 25% RCD em substituição de solo. A maior exigência de água do CR dificultou a compactação e reduziu a massa volúmica e compacidade dos BTC, afetando negativamente a resistência mecânica e absorção de água. No entanto, para uma mesma porosidade total, o CR permite atingir BTC de desempenho semelhante aos BTC com CP de idêntico a/l. O CR demonstrou capacidade ligante e de hidratação semelhante ao CP e superior à do CP32.5 de menor classe de resistência. A incorporação de CR foi ainda capaz de aumentar em 3 vezes a resistência à compressão dos BTC não estabilizados e permitir que estes não se desintegrassem na água. Os BTC estabilizados, mesmo para baixos teores de estabilizante, apresentaram elevada resistência à erosão, um dos principais mecanismos de deterioração das construções em terra, independentemente do tipo de ligante utilizado. Para igual porosidade total, a substituição de CP por CR tendeu a aumentar a resistência à difusão. Porém, devido à menor compacidade dos BTC com CR, a permeabilidade ao vapor de água não foi significativamente afetada.

Como tal, conclui-se que a estabilização dos BTC é fundamental para garantir a sua durabilidade à ação da água, com o CR a mostrar ser uma alternativa viável ao CP. Além disto, o CRB manifestou desempenho idêntico ao CRP nas propriedades analisadas, demonstrando-se a viabilidade do método de separação desenvolvido e a adequada eficiência da fração cimentícia recuperada. A substituição de solo por RCD não afetou negativamente a porosidade e compacidade global dos BTC, tendo reduzida influência na resistência e durabilidade dos BTC. Por fim, conclui-se ser viável a incorporação de pelo menos 25% RCD, melhorando ainda mais a natureza sustentável dos BTC.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS através do projeto UIDB/ 04625/2020, bem como a colaboração da SECIL, Vimajas, Força Aérea Portuguesa e Cobert pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo, no apoio à produção dos BTC. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

ARS 1333. (2018). *Compressed stabilized earth blocks — Requirements, production and construction, African Organization for Standardization (ARSO)*.

ASTM D698. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), American Society for Testing & Materials (ASTM)*.

ASTM E96. (1995). *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, American Society for Testing & Materials (ASTM)*.

Bogas, J. A., Carriço, A., & Pereira, M. F. C. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, *218*, 377–389. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.325

Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *138*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226

Bogas, J., Manuel, P., Ana, G., Ana, C., Susana, H., & Rui, S. (2021). *Process for separating the components of hardened concrete waste for producing recycled cement*. Portuguese Patent Office. PT116130A, 2021-08-24. European Patent Office. EP4112577A1,·2023-01-04.

Bogas, J., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, *79*, 107892. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107892

Bogas, J., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, *13*(4), 569–584. https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891

C. Sekhar, D., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, *166*, 531–536. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125

Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, *80*, 208–217. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024

Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, *333*, 127392. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127392

Cruz, R., Azevedo, B., Bogas, J. A., & Real, S. (2022). Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado. *Congresso Construção 2022*.

EN 196-3. (2016). *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 196-6. (2018). *Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 451-1. (2017). *Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-1. (2011). *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-11. (2011). *Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-13. (2000). *Methods of test for masonry units - Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone), European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 933-1. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 933-11. (2011). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 1015-19. (1998). *Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 1097-6. (2003). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, European Committee for Standardization (CEN)*.

Garboczi, E. (1995). Microstructure and transport properties of concrete. In J. Kropp & H. Hilsdorf (Eds.), *Performance Criteria for Concrete Durability (Rilem Report, No 12)* (1st ed., pp. 126–134). E & FN Spon.

HB-195. (2001). *The Australian earth building handbook*. Standards Australia.

Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Buildings Materials*, *Vol 9*(3), 185–189.

ISO 12572. (2016). *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method, International Organization for Standardization (ISO)*.

LNEC E-64. (1979). *Cimentos - Determinação da massa volúmica, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

LNEC E-239. (1970). *Solos - Análise Granulométrica por Peneiração Húmida, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

LNEC E-394. (1993). *Betões - Determinação Da Absorção de Água Por Imersão, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, *75*, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009

Narayanaswamy, A. H., Walker, P., Venkatarama Reddy, B. V., Heath, A., & Maskell, D. (2020). Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. *Construction and Building Materials*, *243*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118096

NBR 8491. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Requisitos, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*.

NBR 8492. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*.

Niamien Kouamé, A., Koffi Konan, L., & Irié Hervé Gouré Doubi, B. (2021). Microstructure and Mineralogy of Compressed Earth Bricks Incorporating Shea Butter Wastes Stabilized with Cement. *Advances in Materials*, *10*(4), 67. https://doi.org/10.11648/j.am.20211004.13

NP EN 12390-3. (2021). *Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes*.

NP-83. (1970). *Solos - Determinação da densidade das partículas, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

NP-143. (1969). *Solos - Determinação dos limites de consistência, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones*.

NZS 4298. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*.

Riza, F. V., & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability* (pp. 379–392). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00017-6

Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, *306*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277

Sujatha, E. R., & Selsia Devi, S. (2018). Reinforced soil blocks: Viable option for low cost building units. *Construction and Building Materials*, *189*, 1124–1133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.077

Tchouateu Kamwa, R. A., Tome, S., Chongouang, J., Eguekeng, I., Spieß, A., Fetzer, M. N. A., Elie, K., Janiak, C., & Etoh, M. A. (2022). Stabilization of compressed earth blocks (CEB) by pozzolana based phosphate geopolymer binder: Physico-mechanical and microstructural investigations. *Cleaner Materials*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100062

Walker, P. J. (1995). Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites*, *17*, 301–310.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E RETRAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM LIGANTES RECUPERADOS A PARTIR DA FRAÇÃO CIMENTÍCIA DE RESÍDUOS DE BETÃO

Ricardo Cruz[a]; José Bogas[b]; Martim Nabais[c], Sofia Real[d]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

[c]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, martimnabais@tecnico.ulisboa.pt

[d]Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, sreal@lnec.pt

RESUMO

A construção em Terra, mais concretamente os blocos de terra comprimida (BTC), ressurgiu nos últimos anos no sentido de atender à crescente preocupação ambiental por parte da sociedade. A estabilização dos BTC com cimento Portland (CP) é essencial para garantir o seu adequado desempenho a longo prazo, em especial na presença da água, porém é incompatível com a natureza ecológica e sustentável da construção em Terra. Como tal, tem existido um esforço de investigação relevante na procura de ligantes alternativos de baixo impacto ambiental para a estabilização química dos BTC. Neste sentido, no Instituto Superior Técnico (IST) tem sido explorada a utilização de cimento reciclado (CR) nos BTC. Para tal, foi realizada uma extensa campanha experimental que visou a produção e caracterização mecânica de BTC com diferentes teores e tipos de estabilizante, incluindo CR proveniente diretamente de pasta (CRP), CR a partir de resíduos de betão (CRB) e ainda CP, como referência. O CRB foi produzido tendo em conta um método recentemente desenvolvido e patenteado no IST. De modo a atingir soluções de maior eficiência foi ainda considerada a incorporação de até 25% de agregado reciclado resultante de resíduos de construção e demolição (RCD). Para efeitos de comparação foram também produzidos e caracterizados BTC não estabilizados (NE), permitindo avaliar a eficiência do CR como agente estabilizante. No total, foram avaliadas 14 composições diferentes, incluindo a variação de diferentes parâmetros: teor de ligante (5%, 8%), taxa de substituição de CP por CRP ou CRB (20%, 50% ou 100%), percentagem de agregado reciclado (0%, 15%, 25%), e teor de humidade (em equilíbrio com ambiente de laboratório, saturado, seco em estufa). Os blocos foram caracterizados em termos de massa volúmica no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, resistência á tração por flexão e compressão diametral, dureza superficial por esclerómetro pendular, módulo de elasticidade, retração por secagem e velocidade de propagação dos ultrassons.

Em geral, os BTC estabilizados com CP apresentaram melhor desempenho do que os BTC com CR. Isso justifica-se pela menor compacidade atingida pelos BTC com CR. Porém, para igual compacidade, os resultados indiciam que o CR pode ser tão eficiente na estabilização dos BTC como o CP. A retração foi ligeiramente inferior nos BTC com CR do que com CP. Acrescenta-se que face aos BTC NE, a estabilização dos BTC com CR conduziu a resistências mecânicas até mais de 2 vezes superiores. Assim, conclui-se que a adição de CR é eficaz na estabilização química dos BTC, resultando na produção de blocos mais eco-eficientes sem grande prejuízo no desempenho técnico destes materiais. O CRB, recuperado de betão, foi igualmente eficiente, quando comparado com o CRP, demonstrando a boa eficiência do método de separação adotado no presente trabalho. A substituição parcial de solo por RCD teve uma influência pouco significativa na resistência mecânica dos BTC.

Palavras-chave: Bloco de terra comprimida; cimento reciclado; caracterização mecânica; agregado reciclado; retração

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos ressurgiu o interesse na construção em terra, devido à necessidade de encontrar soluções mais sustentáveis do ponto de vista económico e ambiental. Das várias técnicas de construção em terra, destaca-se os blocos de terra comprimida (BTC), que beneficiam da estabilização mecânica para melhorar o seu desempenho mecânico e de durabilidade (Mansour et al., 2016). Ainda assim, devido à sua baixa resistência à água e elevada variação dimensional, também é essencial recorrer à estabilização química da terra, sendo o cimento Portland comum (CP) o ligante mais utilizado na estabilização dos BTC (Bogas et al., 2019). Porém, apesar dos seus benefícios, a estabilização com CP é criticada por aumentar significativamente a pegada ecológica e diminuir a reciclabilidade dos BTC (Keefe, 2005). Desse modo, tem sido explorada a aplicação de estabilizantes alternativos de baixo carbono, capazes de suprimir ou reduzir a utilização de CP. Neste contexto, recentemente tem sido explorado o desenvolvimento de cimento reciclado (CR) recuperado a partir de resíduos de material cimentício termoactivado a elevada temperatura (Bogas et al., 2022; Carriço et al., 2020). Num estudo realizado por Real et al. (2022) concluiu-se que, em comparação com o CP, a produção de CR pode conduzir a uma redução nas emissões de CO_2 superior a 70%, dado que não ocorre descarbonatação durante a sua termoactivação. Tem sido explorada, com sucesso, a incorporação de RC em materiais cimentícios, destacando-se a variação pouco significativa da resistência mecânica de betões com até 40% de substituição de CP por CR (Real et al., 2021). Apenas muito recentemente, foi explorado pela primeira vez a utilização de CR como estabilizante de BTC, confirmando-se a sua capacidade de reidratação e contribuição para a melhoria do comportamento mecânico dos BTC (Bogas et al., 2023). Neste estudo apenas foi utilizado CR diretamente obtido de pastas de cimento produzidas em laboratório (CRP). Por sua vez, a incorporação parcial de agregados reciclados pode melhorar a compacidade granular dos BTC, para além de aumentar a sua sustentabilidade. Malkanthi et al. (2021) modificaram a granulometria da mistura de solo com resíduos de construção e demolição (RCD), tendo por base a sua otimização à curva de referência de Fuller, o que permitiu aumentar a compacidade dos BTC.

No presente estudo pretende-se caracterizar pela primeira vez o desempenho mecânico de BTC estabilizados com cimento reciclado recuperado de resíduos de betão (CRB). Além disso, procedeu-se à substituição parcial de terra por RCD, melhorando ainda mais a natureza ecológica e sustentável da construção em Terra. Os BTC foram produzidos com vários tipos de ligantes (CP, CRP e CRB), variando o teor de ligante (5% ou 8%) e de RCD (0%, 15% e 25%). De modo a avaliar melhor a capacidade estabilizante do CR, foram também produzidos BTC não estabilizados. Os BTC foram caracterizados em termos das suas principais propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por flexão e por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons, esclerómetro pendular e retração por secagem.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

Para a produção dos blocos foram selecionados os seguintes materiais: solo proveniente de Montemor-o-Novo, RCD, cimento CEM I 42,5R, cimento CEM II B-L 32,5N, CRP e CRB. O solo foi caracterizado em termos de granulometria (LNEC E-239, 1970), limites de Atterberg (NP-143, 1969), massa volúmica (NP-83, 1970), teor ótimo de água (ASTM D698, 2021) e matéria orgânica (Cruz et al., 2022). O teor de argila no solo foi determinado através de ensaios de sedimentação (HB-195, 2001). O solo, com cerca de 8 mm de dimensão máxima, apresentava na sua composição cerca de 5,0% de gravilha, 69,8% de areia, 21% de silte e 4,2% de argila, para um teor de matéria orgânica de 1,5% e

uma massa volúmica de 2590 kg/m^3. O teor ótimo de água foi de 10,9% e os limites de liquidez e de plasticidade foram de 23,7% e 18,9%, respetivamente, correspondendo a um índice de plasticidade de 4,7%. Conforme a norma ASTM D2487-11 (2011), o solo foi classificado como SC-SM (*silty-clayey sand*). Por difração de raio-X verificou-se a presença de argila expansiva, dificultando a estabilização do solo. O RCD, também com dimensão máxima de 8 mm, era composto por resíduos de betão (40,3%), pedra natural (32,1%), cerâmicos (16,5%), e outros constituintes (EN 933-11, 2011), possuindo 32,9% de gravilha, 63% de areia e 4,1% de material fino (EN 933-1, 2012), aproximadamente 2300 kg/m^3 de massa volúmica e 4,8% de absorção de água (EN 1097-6, 2003).

O CRP e o CRB foram produzidos a partir de pasta de cimento e de betão, respetivamente, com uma razão água/ligante (a/l) de 0,55. Para ambos foi utilizado CEM I 42,5R. Após mais de 3 meses em ambiente de laboratório a pasta de cimento foi sujeita a britagem, moagem, peneiração e termoactivação. Para a obtenção do CRB, foi necessário realizar uma etapa prévia de separação dos constituintes do betão, de acordo com o método patenteado por Bogas et al. (2021). A partir de termogravimetria de resíduos de pasta de cimento e de betão de igual a/l verificou-se que o CRB apresentava um grau de pureza de 68%. A termoativação envolveu o aquecimento do material a uma taxa de 10°C/min até 650°C, mantendo-se nesta temperatura por 3 horas. Foi ainda considerado um cimento de baixa resistência (CP32,5), mais correntemente utilizado na construção. As propriedades dos ligantes encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos ligantes

Parâmetro	Norma	CP	CP32,5	CRP	CRB
Massa volúmica (g/cm^3)	LNEC E-64 (1979)	3,02		3,005	2,964
Superfície específica (cm^2/g)	EN 196-6 (2018)			156553	78673
Resist. à compressão aos 28 dias (MPa)	EN 196-1 (2016)	53,3	≥32,5		
CaO livre (%)	EN 451-1 (2017)	1,02	18,5	13,94	
Consistência normal (a/l)	EN 196-3 (2016)	0,295		0,74	0,54
Tempo de presa inicial/final (min)	EN 196-3 (2016)	190/310	≥75	290/384	>720/<1440

2.2 PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO DOS BLOCOS E MÉTODOS DE ENSAIO

Os BTC, com 220x105x70 mm, foram produzidos com recurso a uma prensa manual, com uma força de compactação de cerca de 150 kN. Selecionaram-se 14 composições, variando o tipo de ligante (CP, CP32,5, CRP e CRB), teor de ligante (5 e 8%) e de RCD (0, 15 e 25%). Para os blocos estabilizados com 8% de ligante, o CP também foi substituído por CRP em percentagens de 20 e 50%. Para compensar os 32% de contaminação por agregado, o teor de CRB foi aumentado para 12% (12CRB). Uma composição sem esta compensação também foi produzida (8CRB). Finalmente, foram ainda produzidos, para efeitos de comparação, blocos não estabilizados (NE) e BTC com 8% CRP com o mesmo teor de água dos BTC com 8% CP (8CRPTH). As composições apresentam-se na Tabela 2. A substituição parcial de solo por RCD foi realizada de forma direta. A percentagem de substituição de solo por RCD selecionada teve por base a comparação da curva granulométrica da mistura (solo+0-50%RCD) com a curva de referência de Fuller (Malkanthi et al., 2021). O menor valor da soma dos desvios quadrados entre estas curvas foi obtido para 25% RCD. Após a produção, os BTC foram cobertos com uma película plástica durante 7 dias, assegurando uma humidade relativa (HR) de, aproximadamente 100%, seguido de cura ao ar em laboratório (HR= 60 ± 5% HR e T= 22 ± 3ºC).

Os BTC foram caracterizados segundo a sua massa volúmica (EN 772-13, 2000), resistência à compressão (EN 772-1, 2011; NBR 8492, 2012), resistência à tração por flexão (EN 772-6, 2001), resistência à tração por compressão diametral (EN 12390-6, 2022), velocidade de propagação de ultrassons (EN 12504-4, 2021), módulo de elasticidade (LNEC E-397, 1993), índice esclerométrico (EN

12504-2, 2021) e retração (LNEC E-398, 1993). A massa volúmica foi medida no estado fresco, logo após a produção e compactação dos blocos, e no estado endurecido. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados com uma prensa hidráulica Tonipact, com capacidade de 3000 kN e células de carga de 400 kN. Para a resistência à compressão, uma placa de contraplacado foi colocada na base e no topo de cada bloco, e os blocos foram testados a uma velocidade constante de 4 kN/s em diferentes idades (3, 7 e 28 dias) e condições de humidade (seco, saturado e em ambiente de laboratório - AL). Para a determinação da resistência à compressão não confinada, os valores foram corrigidos por um fator de 0,6 (HB-195, 2001). A resistência à tração por flexão foi determinada com base no ensaio de flexão a três pontos a uma velocidade constante de 0,1 kN/s. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com a mesma velocidade, aos 28 dias. Ambos ensaios foram realizados na condição AL. A velocidade de propagação de ultrassons foi medida aos 28 dias em provetes com diferentes condições de humidade. Para o módulo de elasticidade, foi utilizada uma câmara de vídeo de alta precisão para quantificar o deslocamento entre pontos previamente marcados nos blocos, com uma separação inicial predeterminada. O teste foi realizado com recurso a uma prensa INSTROM com uma capacidade máxima de 250 kN e envolveu um mínimo de três ciclos de carga e descarga, aumentando incrementalmente a tensão em 0,5 MPa, até atingir um terço da resistência à compressão. O índice esclerométrico foi determinado aos 28 dias em provetes na condição AL. O ensaio de retração foi realizado com recurso a um medidor DEMEC Mitutoyo com precisão de 1 µm e envolveu a fixação de duas pastilhas metálicas, uma em cada extremidade do provete, espaçadas de 200 mm. A monitorização iniciou-se aos 3 dias de idade, expondo os provetes durante 55 dias em câmara condicionada (T= 21 ± 2ºC e HR= 65 ± 5%).

Tabela 2 - Composição dos blocos produzidos

Composição	Ligante	Ligante (%)[a]	Água (%)[b]	RCD (%)[c]	a/l
8CP	CEM I 42,5R	8	14	25	1,91
8CP15RCD	CEM I 42,5R	8	14	15	1,87
8CP0RCD	CEM I 42,5R	8	14	0	1,89
5CP	CEM I 42,5R	5	14	25	2,97
8CP32,5	CEM II B/L 32,5N	8	14	25	1,97
8CRP	CRP	8	20	25	2,72
8CRPTH	CRP	8	14	25	1,91
5CRP	CRP	5	20	25	4,13
80CP20CRP	50%CP+50%CRP	8	14	25	1,91
50CP50CRP	80%CP+20%CRP	8	14	25	1,91
8CRB	CRB	8	20	25	2,69
8CRB0RCD	CRB	8	20	0	2,70
12CRB	CRB	12	20	25	1,82
NE	-	0	12	25	-

[a] % em massa seca de solo; [b] % em massa seca de solo+RCD+ligante; [c] % de massa seca de solo+RCD

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados médios obtidos para cada composição encontram-se nas Tabelas 3 e 4, nomeadamente de massa volúmica fresca (MV_f), massa volúmica em ambiente laboratorial (MV_{lab}), massa volúmica seca (MV_{seco}), massa volúmica saturada (MV_{sat}), resistência à compressão não confinada aos 3-28 dias ($f_{c,un3d}$, $f_{c,un7d}$, $f_{c,un28d}$), resistência à tração por flexão e por compressão diametral (f_{ctr} e f_{ctsp}), módulo de elasticidade (E_c), velocidade de propagação de ultrassons para diferentes condições de humidade ($V_{US,lab}$, $V_{US,seco}$, $V_{US,sat}$), índice esclerométrico (IE) e retração aos 3 e 55 dias ($\varepsilon_{cst,3d}$ e $\varepsilon_{cst,55d}$).

Tabela 3 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CP e BTC não estabilizados (NE)

Propriedades	8CP	8CP15RCD	8CP0RCD	5CP	8CP32,5	NE
MV_f (kg/m^3)	2230	2210	2230	2220	2140	2100
P_T (%)	28,6	28,0	28,2	29,2	30,9	32,1
Mv_{lab} (kg/m^3)	2050	2030	2040	2010	1960	1940
Mv_{sat} (kg/m^3)	2160	-	-	2170	-	-
MV_{seco} (kg/m^3)	1910	-	-	1970	-	-
$f_{c,un3d,lab}$ (MPa)	2,71	3,46	2,51	2,00	-	0,24
$f_{c,un7d,lab}$ (MPa)	3,56	-	-	-	-	0,39
$f_{c,un28d,lab}$ (MPa)	5,44	6,03	5,65	3,93	4,11	1,26
$f_{c,un28d,seco}$ (MPa)	7,37	-	-	5,25	-	-
$f_{c,un28d,sat}$ (MPa)	3,74	-	-	2,36	-	-
f_{ctr} (MPa)	1,16	-	-	0,88	1,04	0,29
f_{ctsp}(MPa)	0,49	0,51	0,50	0,37	-	0,07
E_c (GPa)	3,60	-	3,62	2,79	-	0,78
$V_{US,lab}$ (m/s)	2304	2209	2076	1852	2085	1298
$V_{US,seco}$ (m/s)	1776	-	-	1429	-	-
$V_{US,sat}$ (m/s)	2494	-	-	1950	-	-
IE	32	33	36	19	-	16
$\varepsilon_{cst,3d}$ (x10^{-6} m/m)	426	-	589	579	-	1347
$\varepsilon_{cst,50d}$ (x10^{-6} m/m)	1705	-	2183	1916	-	3045

Tabela 4 – Valores médios das várias propriedades analisadas – BTC com CR

Propriedades	8CRP	8CRPTH	5CRP	80CP20CRP	50CP50CRP	8CRB	8CRB0RCD	12CRB
MV_f (kg/m^3)	2040	2070	2040	2190	2120	2100	2130	2080
P_T (%)	37,1	32,8	37,5	28,1	30,3	35,5	35,2	35,3
Mv_{lab} (kg/m^3)	1880	1970	1870	2030	2010	1930	1890	1920
Mv_{sat} (kg/m^3)	2060	2090	2040	-	-	-	-	2160
MV_{seco} (kg/m^3)	1770	1800	1740	-	-	-	-	
$f_{c,un3d,lab}$ (MPa)	0,42	1,33	0,36	-	-	0,62	0,36	0,71
$f_{c,un7d,lab}$ (MPa)	0,60	1,63	-	-	-	0,75	0,53	0,82
$f_{c,un28d,lab}$ (MPa)	1,81	3,32	1,09	6,28	5,07	1,42	1,41	1,87
$f_{c,un28d,seco}$ (MPa)	2,96	4,77	1,57	-	-	-	-	-
$f_{c,un28d,sat}$ (MPa)	0,97	1,51	0,42	-	-	-	-	-
f_{ctr} (MPa)	0,46	0,63	0,28	1,25	0,96	0,28	0,28	-
f_{ctsp}(MPa)	0,19	0,23	0,07	0,42	0,34	0,07	0,07	-
E_c (GPa)	-	2,50	1,38	4,55	-	-	-	-
$V_{US,lab}$ (m/s)	1509	1668	1200	2185	2041	1303	1239	1353
$V_{US,seco}$ (m/s)	949	1358	878	1776	-	1429	-	-
$V_{US,sat}$ (m/s)	1516	1767	1319	2494	-	1950	-	-
IE	14	30	10	42,5	34,5	12	11	20
$\varepsilon_{cst,3d}$ (x10^{-6} m/m)	-	553	600	463	443	-	-	-
$\varepsilon_{cst,50d}$ (x10^{-6} m/m)	-	1373	2093	1817	1598	-	-	-

3.1 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

A MV_f dos BTC variou entre 2040 e 2230 kg/m^3 (Tabelas 3 e 4). Para uma mesma pressão de compactação e teor de ligante, Cruz et al. (2022) obteve valores inferiores. Esta melhoria deve-se à otimização da compacidade granular, com aproximação da distribuição granulométrica das misturas à curva de referência de Fuller, e ao enquadramento no fuso granulométrico proposto na XP P 13-901 (2001). Com base na MV_f, foi possível estimar a porosidade total, P_T, dos BTCs, correspondendo à soma do volume de vazios e o volume de água não consumida durante as reações de hidratação dos ligantes.

Os valores de P_T variaram entre 28,0% e 37,1% (Tabelas 3 e 4), tendo sido superior nos BTC com CRP ou CRB, demonstrando a sua menor compacidade, que está relacionada com a maior exigência de água destes ligantes (Tabela 2). Mesmo no caso em que se forçou a produção de BTC com CRP de igual teor

em água (8CRPTH), verificou-se um aumento de 18% na P_T, o que resulta da maior dificuldade de aplicação e compactação das misturas. O ligeiro aumento de massa volúmica e diminuição de P_T nos BTC com CRB face aos BTC com CRP de igual teor de água, resulta da menor exigência de água e facilidade de aplicação do CRB. Confirma-se a obtenção de blocos de maior compacidade para uma substituição parcial de solo por RCD de 25%, sendo possível confirmar que a curva de Fuller reflete condições de maior compacidade. Na Figura 1 observa-se uma elevada correlação entre a MV_f e a P_T, quando se tem em consideração BTC produzidos com igual TH. Isso justifica-se pelo facto do TH apresentar maior impacto na MV_f do que na P_T. A relação foi independente do tipo de ligante. Em média, a MV_{sat} dos BTC estabilizados foi 16% superior à seca. Não foi possível determinar a massa volúmica saturada do NE, dado que perdeu a sua coesão em contacto com a água.

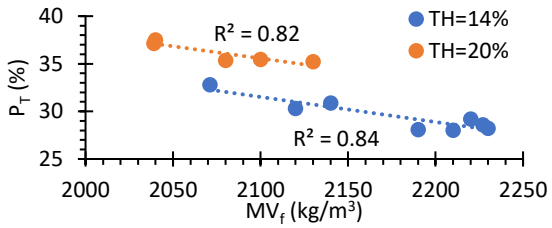


Figura 1 - Relação entre a porosidade total (P_T) e massa volúmica fresca (MV_f) para valores diferentes de TH

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se a resistência à compressão dos BTC de referência ao longo do tempo, em condição AL e a resistência aos 28 dias para diferentes condições de humidade, respetivamente.

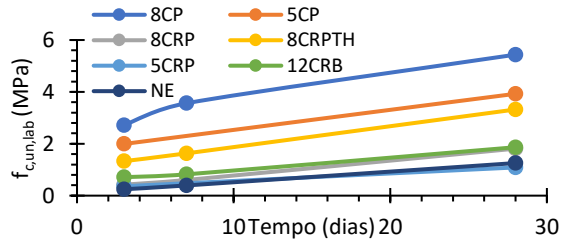


Figura 2 – Resistência à compressão em ambiente laboratorial ($f_{c,un,lab}$) ao longo do tempo

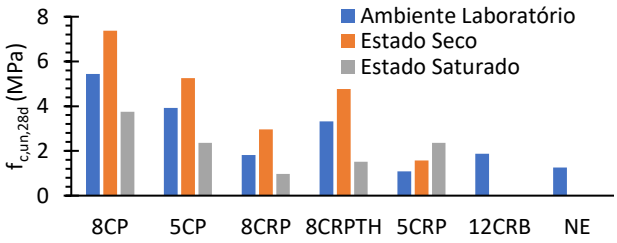


Figura 3 – Resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,un,28d}$) em diferentes condições de humidade

A $f_{c,un,28d,lab}$ foi até 5x superior nos BTC estabilizados do que no NE, tendo aumentado essa diferença com o teor de ligante. Seria esperada uma maior resistência inicial nos BTC com CR, resultante de 2 factores: presença de α'_H-C_2S, cuja reatividade ocorre predominantemente entre 1 e 3 dias; devido à natureza porosa do CR, parte da água da mistura é absorvida, reduzindo a distância entre partículas, o que conduz a uma microestrutura mais refinada nas idades iniciais (Bogas et al., 2022). Porém, verifica-se que os BTC CRP exibiram resistência inferior aos BTC CP aos 3 dias de idade, tendo-se inclusive, observado que, para um mesmo a/l, a perda relativa de resistência foi menor aos 28 dias (39%) do que aos 3 dias (51%) (Tabelas 3 e 4 e Figura 2). Isso justifica-se pela cura húmida dos BTC até 7 dias. De facto, os BTC CR apresentam uma maior sensibilidade às condições de humidade, verificando-se que a resistência seca aumentou cerca de 2 e 3 vezes face à saturada nos BTC com 8% CP e 8% CRP, respetivamente (Tabelas 3 e 4 e Figura 3). Isso sugere uma menor eficiência do CR na estabilização.

A resistência do BTC com CR foi 39% inferior à do BTC com CP de igual teor de água (8CRPTH). Isso resulta essencialmente da maior exigência de água do CR, conduzindo a BTC de menor compacidade (maior P_T, Tabela 4). A importância da compacidade é confirmada na Figura 4, onde se confirma uma correlação elevada entre P_T e a resistência mecânica, quando separada por teor de estabilizante. De

facto, a resistência não depende apenas da porosidade total, mas também da capacidade de ligação promovida pelo ligante. Neste caso, a relação foi independente do tipo de ligante, sugerindo-se que para igual compacidade, os BTC com CR podem atingir resistência similar aos BTC com CP. Assim, a resistência foi essencialmente afetada pelo P_T e teor de estabilizante.

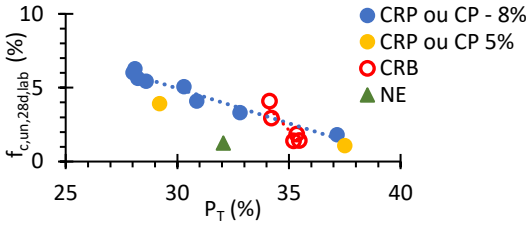


Figura 4 - Relação entre a porosidade total (P_T) e a resistência à compressão em ambiente laboratorial aos 28 dias ($f_{c,un,28d,lab}$)

Os BTC com CRB fogem à tendência de evolução de f_c em função de P_T, sugerindo uma perda de eficiência do ligante para 100% CRB, que se aproxima do comportamento observado para 5% ligante. De facto, para o mesmo a/l, a substituição de CRP por igual teor de CRB conduziu a uma redução de 22% na resistência aos 28 dias (Tabela 4). Ou seja, o CRB foi menos eficiente do que o CRP. Conforme discutido, o CRB contem cerca de 32% de agregado, resultando em BTC com apenas 5,4% de ligante, próximo de 5% estabilizante. Quando se aumentou o teor de ligante para compensar a contaminação (12CRB), a resistência foi idêntica à de 8CRP (Tabela 4), indicando que o CRB pode apresentar uma capacidade de reidratação semelhante à do CRP.

Em geral, a resistência à compressão diminuiu com a substituição progressiva de CP por CR, visto que aumentou a P_T, estando de acordo com a tendência da Figura 4. Porém, até uma substituição de 20% de CP por CRP, ocorreu um ligeiro aumento na f_c. Neste caso, e uma vez que P_T não foi significativamente alterada, a incorporação de CRP foi benéfica. Confirma-se a hipótese de se obterem resistências pelo menos semelhantes nos BTC com CRP, caso se atinja igual compacidade. Mesmo para 50% CRP, a redução de resistência nos BTC foi de apenas 7%. A resistência desta mistura foi 29% superior à 5CP, demonstrando a atividade do CRP. Por outro lado, a resistência do 8CRPTH foi 2,7 vezes superior à do NE, demonstrando a elevada capacidade de estabilização do CR, mesmo tendo em conta que P_T foi 8% inferior (Tabelas 3 e 4). Acrescente-se que a resistência foi apenas 19% inferior à do 8CP32,5, para uma compacidade 7% menor.

Por fim, a resistência à compressão foi pouco afectada pela substituição parcial de solo por RCD. Conclui-se que a substituição parcial de solo por RCD permite alcançar soluções mais sustentáveis sem comprometer o desempenho mecânico dos BTC.

3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

No HB-195 (2001) são recomendados valores mínimos de 0,35 MPa para f_{ctr}. Estes requisitos não foram cumpridos no NE e nos BTC 5CRP, 8CRB e 8CRB0RCD (Tabelas 3 e 4). Dado que a resistência à tração depende da porosidade e das características da matriz ligante, a influência do tipo de estabilizante e do teor de RCD segue a mesma tendência verificada na resistência à compressão. A f_{ctsp} e a f_{ctr} foram, aproximadamente, 54% e 47% inferiores nos BTC com CRP do que nos BTC com CP de igual a/l. Como discutido, isto deve-se essencialmente à menor compacidade. Ainda assim, f_{ctsp} e a f_{ctr} nos BTC com CRP foram 3,2 e 2,2 vezes superiores às do NE, demonstrando mais uma vez a boa eficiência do CR. Nos BTC com CRB, a resistência à tração foi 39% (fc_{tsp}) e 63% (fc_{tr}) inferior à do 8CRP e semelhante à do NE, embora para estes níveis de resistência, os ensaios tenham fraca precisão. A melhor capacidade ligante do CRB face à fração argilosa do NE, terá sido compensada pelo elevado aumento de P_T.

A f_{ctr} dos BTC foi 2,4-4,3 vezes superior à f_{ctsp}, dependendo da composição. Isso era esperado, visto que a tração na compressão diametral se aproxima mais do estado de tensão axial, enquanto fc_{tr} é sobrestimada (Bogas, 2011). A diferença foi maior nos BTC com CRB e no NE e foi idêntica nos BTC com CP e CRP. A mesma tendência foi observada por Bogas et al. (2019), com rácios f_{ctr}/f_{ctsp} de 2 para BTC com CP e 3,1 para NE.

3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade variou entre 0,78 GPa e 4,60 GPa (Tabelas 3 e 4), dependendo das condições de estabilização, o que salienta a sua importância nesta propriedade. Como expectável, o módulo de elasticidade aumentou com o teor de ligante e com a redução de P_T. Porém, o valor bastante superior de E_c nos BTC estabilizados face ao NE, salienta a maior importância da capacidade ligante face a P_T. Bogas et al. (2023), considerando um teor de 10% CP, obteve um valor médio de 2,8 GPa, cerca de 22% inferior ao obtido neste estudo para o BTC com 8% CP.

O módulo de elasticidade do 8CRPTH foi 31% inferior ao do 8CP, o que está de acordo com a sua maior P_T e menor f_c (Tabelas 3 e 4). Para além disto, a matriz cimentícia com CR está associada a menor rigidez, devido à natureza porosa e menor dureza deste ligante (Carriço et al., 2020). Ainda assim, o módulo de elasticidade do 8CRPTH foi 3,2 vezes superior ao do NE, confirmando a importância do CR na estabilização dos BTC. A substituição de 20% CP por CRP conduziu a um aumento de 26% no módulo de elasticidade (Tabelas 3 e 4). Mais uma vez, a substituição de solo até 25% RCD teve pouca influência no módulo de elasticidade (Tabela 3).

3.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

A V_{US} variou entre 878-2494 m/s, dependendo da composição e das condições de humidade (Tabelas 3 e 4). Em média, V_{US} foi cerca de 1,4 vezes maior no estado saturado do que no estado seco e apenas 5% maior do que na condição AL (Tabelas 3 e 4). Dado que V_{US} se relaciona com a raiz quadrada do quociente entre o módulo de elasticidade e a massa volúmica (Bogas et al., 2013), espera-se que os BTC de menor rigidez e maior P_T apresentem menor V_{US}. Assim, V_{US} decresceu com o teor de ligante e nos BTC com CRP e CRB, ou seja, foi capaz de distinguir BTC de diferente qualidade. Para um aumento de 18% em P_T, ocorreu uma redução de 28% na V_{US} e 39% na f_c, quando se substituiu 8% CP por 8% CRP, para um mesmo a/l (Tabelas 3 e 4)). Esta menor redução de V_{US} face a f_c seria esperada, pois V_{US} relaciona-se aproximadamente com a raiz quarta de f_c (Bogas et al., 2013).

A consideração de 12% CRB (12CRB) conduziu apenas a um ligeiro aumento de V_{US}, que é compatível com o aumento observado em f_c (3.2). V_{us} foi ligeiramente maior no 12CRB do que no NE, apesar da porosidade ter sido 10% superior, o que significa que se terá atingido uma melhor coesão entre partículas e uma maior rigidez após a incorporação de CRB. Ao contrário do observado em outras propriedades, V_{US} aumentou com a substituição parcial de solo por RCD (Tabela 3), mesmo tendo em conta variações pouco significativas de E_c e P_T (Tabela 3). Isso pode estar relacionado com o maior teor de água inicial nas misturas com RCD e com a sua maior lentidão de secagem. De facto, durante a cura em laboratório, os RCD têm capacidade de restituir parte da água de absorção para a matriz circundante atrasando a sua secagem e aumentando o teor em água dos BTC. Porém, nos BTC com CRB, o aumento de V_{US} foi pouco significativo com o aumento de RCD.

3.6 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO

Como esperado, o índice esclerométrico, que é uma medida da dureza superficial dos BTC, aumentou com o teor de estabilizante (Tabelas 3 e 4). Isto está de acordo com a maior coesão e rigidez destas

misturas. A exceção ocorreu nos BTC 8CRP, 5CRP e 8CRB, associados a maior porosidade. Ainda assim, seria esperado que estas misturas apresentassem maior IE do que NE, assim como não era esperado que os BTC com 50% CRP tivessem maior IE do que o 8CP. De facto, a dureza superficial é influenciada por outros factores como a dureza dos agregados junto à superfície e o teor de humidade da superfície na altura do ensaio. Isso justifica o aumento de IE com a redução do teor de RCD, que na superfície pode reduzir a resistência ao impacto devido à sua natureza porosa. Assim, este ensaio não foi adequado para distinguir BTC com pequenas diferenças de qualidade. Salienta-se o IE cerca de 2 vezes superior do 8CRPTH face a NE. Destaca-se ainda o IE 45% superior no 12CRB face 8CRP.

3.7 RETRAÇÃO

A Figura 5 mostra a evolução da retração ao longo do tempo. A maior taxa de retração ocorreu durante os primeiros dias, estabilizando-se após um mês de exposição. Dependendo da composição, entre 20 e 40% da retração final ocorreu nos primeiros 3 dias. As retrações finais variaram entre 1,4-2,2 mm/m nos BTCs estabilizados, atingindo 3 mm/m no NE. Estes valores excederam significativamente os limites estabelecidos pelas normas NZS 4298 (1998) e NTC 5324 (2004), que são 0,5 mm/h e 0,45 mm/h respetivamente, para construções em taipa e BTC estabilizados sujeitos a 50% HR e 33-45 ºC. Os valores elevados deverão estar relacionados com a presença de argilas expansivas no solo.

A elevada retração do NE, resultou essencialmente da variação dimensional ocorrida nas idades iniciais, atribuída à contração da fração argilosa do solo e à fraca restrição imposta pela matriz de rigidez 3-4 vezes inferior à dos BTC estabilizados (3.4). Por sua vez, e apesar da menor compacidade e menor rigidez, a menor retração aos 50 dias foi atingida no 8CRPTH, tendo sido cerca de 24% inferior à do 8CP de igual a/l. Isso poderá estar relacionado com o maior refinamento atingido na microestrutura das matrizes de RCP, desde as idades iniciais (Bogas et al., 2020). Neste caso, a absorção de água nas partículas porosas do RCP faz com que o espaço interpartícula diminua. Assim, por um lado aumenta a rigidez inicial da matriz e reduz a quantidade de água livre. Por outro lado, a ação capilar promovida pelos poros de menor dimensão tende a ser maior. Logo, para a mesma porosidade total, estas matrizes mais refinadas podem conduzir a maiores taxas de retração inicial (Carriço et al., 2022), conforme observado nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 5. Porém, conforme observado em BTC (Bogas et al., 2023), ou em betões (Real et al., 2021), esperava-se uma menor retração final nos BTC com CP.

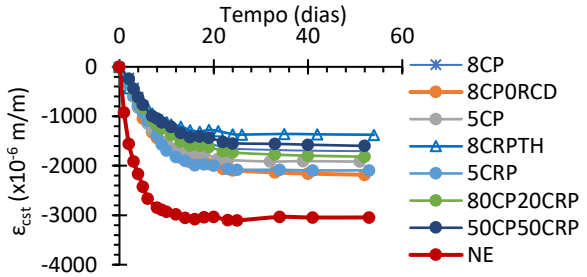


Figura 5 – Evolução da retração (ε) ao longo do tempo

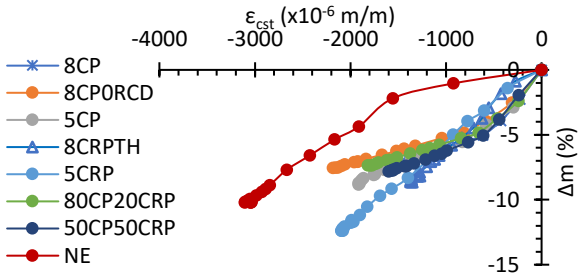


Figura 6 - Perda de massa (Δm) versos retração (ε_{cst})

Na Figura 6 verifica-se que a perda de massa foi superior no NE e nos BTC com CRP ou com menor teor de estabilizante, associados a maior P_T. O BTC 5CRP apresentou a maior perda de água. No caso do NE, a água encontra-se num estado livre não combinado, estando associados a maiores taxas e volumes de evaporação de água. Após um período inicial, a taxa de retração por variação de perda de massa aumentou nos BTC com CP, associados a menor P_T (Figura 6). O declive da curva começou por ser mais acentuado, associado à perda de água livre dos poros de maior dimensão, alterando depois para um menor declive, em que a perda de água promove uma maior retração (capilares mais refinados). Assim, num período inicial a retracção foi dominada pela contracção da fracção não estabilizada do solo,

sendo mais relevante nos BTC menos estabilizados. Depois, foi afectada pelo ligante, sendo mais efectiva nas misturas que desenvolveram microestrutura mais densa ao longo do tempo. A longo prazo, os BTC com 8%CRP possuem menores taxas de retração por variação de massa (Figura 6), estando de acordo com a formação de uma porosidade mais grosseira (maior P_T). Até 20% CRP, a retração foi ligeiramente superior à de 8CP, estando alinhado com f_c. Por sua vez, a retração para 50% CRP foi menor e mais próxima de 8CRPTH. Em suma, confirma-se que o CR foi eficaz na estabilização do solo e a variação dimensional foi menos relevante do que nos BTC com CP.

A substituição parcial de solo por RCD reduziu a retração a curto e a longo prazo (Tabela 3), possivelmente devido à capacidade do RCD de restituir parte da sua água de absorção para a matriz cimentícia, retardando a secagem. Além disto, parte do solo, constituído por argilas expansivas (2.1), é substituído por RCD de baixa retractilidade.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar pela primeira vez a utilização de cimento reciclado de betão na caracterização mecânica e retração de BTC. A substituição parcial de solo por RCD também foi analisada. Devido à elevada exigência de água do CR, os BTC apresentaram menor compacidade e menor massa volúmica, o que prejudicou a sua resistência mecânica. Porém, para igual compacidade, o CP pode ser substituído por CR, sem afectar a resistência mecânica dos BTC. Verifica-se que resistência é essencialmente afectada pela porosidade e teor de estabilizante. Por outro lado, face aos BTC NE, a incorporação de CRP aumentou até cerca de 3 vezes a resistência mecânica. Acrescente-se que até 20% CRP o desempenho foi melhorado face aos BTC com CP e até 50% CRP a redução de resistência mecânica foi pouco significativa. Os BTC estabilizados com CR foram ainda capazes de manter a sua integridade após saturação, ao contrário dos NE. Assim, demonstra-se a adequada capacidade de hidratação e estabilização do CR, sendo viável a sua utilização nos BTC. O módulo de elasticidade, a velocidade de ultrassons e o índice esclerométrico tendem a ser inferiores nos BTC com CR, devido à menor compacidade dos BTC e à natureza porosa do CR. Devido à natureza expansiva do solo foram observadas retrações elevadas. Porém, a estabilização do solo com CR conduziu a menores retrações a longo prazo. A incorporação de CRB, desde que se compense a contaminação do CR, mostrou ser tão efetiva como a utilização de CRP. Conclui-se que o CRB pode apresentar uma capacidade de reidratação semelhante à do CRP. Finalmente, a incorporação de até 25% de RCD teve pouca influência nas propriedades mecânicas dos BTC.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS através do projeto UIDB/ 04625/2020, bem como a colaboração da SECIL, Vimajas pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo, no apoio à produção dos BTC. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

ASTM D698. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), American Society for Testing & Materials (ASTM)*.

Bogas, J. (2011). *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida* [Tese de doutoramento em Engenharia Civil]. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *138*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226

Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, *53*(5), 962–972. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012

Bogas, J., Gomes, M., & Gomes, A. (2013). A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. In *Ultrasonics* (Vol. 53, pp. 962–972).

Bogas, J., Manuel, P., Ana, G., Ana, C., Susana, H., & Rui, S. (2021). *Process for separating the components of hardened concrete waste for producing recycled cement*. Portuguese Patent Office. PT116130A, 2021-08-24. European Patent Office. EP4112577A1,·2023-01-04.

Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, *127*. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405

Bogas, J., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, *79*, 107892. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107892

Bogas, J., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, *13*(4), 569–584. https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891

Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Thermoactivated cementitious materials – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 250). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873

Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, *333*, 127392. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127392

Cruz, R., Azevedo, B., Bogas, J. A., & Real, S. (2022). Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado. *Congresso Construção 2022*.

EN 196-1. (2016). *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 196-3. (2016). *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 196-6. (2018). *Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 451-1. (2017). *Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-1. (2011). *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-6. (2001). *Methods of test for masonry units - Part 6: Determination of bending tensile strength of aggregate concrete masonry units, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 772-13. (2000). *Methods of test for masonry units - Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone), European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 933-1. (2012). *ests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 933-11. (2011). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 1097-6. (2003). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 12390-6. (2022). *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 12504-2. (2021). *Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number, European Committee for Standardization (CEN)*.

EN 12504-4. (2021). *Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, European Committee for Standardization (CEN)*.

HB-195. (2001). *The Australian earth building handbook*. Standards Australia.

Keefe, L. (2005). *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation* (1st ed.). Routledge.

LNEC E-64. (1979). *Cimentos - Determinação da massa volúmica, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

LNEC E-239. (1970). *Solos - Análise Granulométrica por Peneiração Húmida, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

LNEC E-397. (1993). *Betões - Determinação do módulo de elasticidade em compressão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

LNEC E-398. (1993). *Betões - Determinação da retracção e da expansão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

Malkanthi, S. N., Wickramasinghe, W. G. S., & Perera, A. A. D. A. J. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. *Case Studies in Construction Materials*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717

Mansour, M. Ben, Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. Ben. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, *104*, 44–51. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024

NBR 8492. (2012). *Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio*.

NP-83. (1970). *Solos - Determinação da densidade das partículas, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

NP-143. (1969). *Solos - Determinação dos limites de consistência, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.

NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones*.

NZS 4298. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*.

Real, S., Bogas, J. A., Carriço, A., & Hu, S. (2021). Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(6). https://doi.org/10.3390/app11062454

Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. *Materials*, *15*(19). https://doi.org/10.3390/ma15196766

XP P 13-901. (2001). *Compressed Earth Blocks for Walls and Partitions. Definitions. Specifications. Test Methods. Delivery Acceptance Conditions, Association Française de Normalisation (AFNOR)*.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS COM CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO

Sofia Real[a]; José Bogas[b]; Ricardo Cruz[b]; Maria Glória Gomes[b]

[a]Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal; sreal@lnec.pt

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt; ricardojtcruz@tecnico.ulisboa.pt; maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A estabilização de blocos de terra comprimida (BTC) com cimento reciclado termoativado (CRP) tem como objetivo a melhoria do desempenho mecânico e de durabilidade da construção em terra, sem comprometer de forma significativa a sua natureza ecológica e a suas propriedades térmicas. Neste estudo, analisou-se o comportamento higroscópico de BTC estabilizados com CRP, tendo sido comparado com o de blocos de terra não estabilizados ou estabilizados com cimento Portland (CEM). Para tal, foram determinadas as curvas de adsorção-dessorção de BTC considerando diferentes tipos de solo, tipos e quantidades de incorporação de estabilizante, tendo sido relacionadas com a sua microestrutura que foi caracterizada com base em microporosimetria de intrusão de mercúrio e adsorção de nitrogénio.

A influência da estabilização nas propriedades higroscópicas dos BTC dependeu do tipo de solo. Dependendo do teor de argila, a estabilização pode aumentar ou reduzir a capacidade higroscópica dos BTC. O desempenho higroscópico dos BTC não foi afetado de forma relevante pela substituição parcial ou total de CEM por CRP. Assim, o CRP foi efetivo na estabilização dos BTC, tendo-se aproximado do comportamento mecânico e higroscópico dos BTC com CEM.

Palavras-chave: Blocos de terra comprimida; cimento reciclado termoativado; agregado reciclado; adsorção-dessorção; comportamento higroscópico; microestrutura

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
REPÚBLICA PORTUGUESA

1 INTRODUÇÃO

Os blocos de terra comprimida (BTC) são reconhecidos como bons controladores higroscópicos (Fabbri et al., 2022), para além de apresentarem impactos ambientais e energia incorporada reduzidos. A estabilização química introduziu melhorias significativas no seu desempenho mecânico e de durabilidade (Augarde, 2012; Rigassi, 1985), tendo trazido um interesse renovado neste material de construção. No entanto, esta estabilização é tipicamente atingida com recurso a cal hidráulica e cimento Portland (CEM), contribuindo para uma redução não só das propriedades higroscópicas, mas também da componente ecológica dos BTC. Saidi et al. (2018) reportaram a redução das capacidade de absorção de BTC com até 12% de estabilizante, tendo atribuído os resultados ao preenchimento da estrutura porosa por produtos de hidratação, enquanto Arrigoni et al. (2017) referiram o decréscimo da afinidade físico-química entre a água e a argila. De acordo com McGregor et al. (2014), a estabilização cimentícia resulta na redução da permeabilidade ao vapor e da capacidade de retenção de água dos BTC, enquanto o teor de argila conduz ao incremento desta capacidade, encontrando-se dependente do tipo da mesma.

Todavia, a estabilização com CEM está associada a níveis elevados de emissões de dióxido de carbono (CO_2) durante a sua produção (WBCSD and IEA, 2009), contribuindo para um BTC menos amigo de ambiente. Neste sentido, na procura por materiais de construção mais sustentáveis, a investigação tem sido direcionada para o desenvolvimento de alternativas eco-eficientes ao CEM, nomeadamente o cimento reciclado termoativado (CRP), que não só contribui para a redução das emissões de CO_2 e do consumo de recursos naturais, mas também para a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) (Real et al., 2022). De facto, o CRP tem sido utilizado com sucesso como ligante, em substituição total ou parcial do CEM, noutros materiais de construção, nomeadamente em argamassas (Carriço et al., 2022) e betões (Carriço et al., 2021; Real et al., 2021). No entanto, o seu desempenho enquanto estabilizante de BTC ainda foi pouco estudado, tendo apenas sido publicado um estudo de caracterização do comportamento mecânico de BTC com CRP (Bogas et al., 2023), em que este estabilizante contribuiu para duplicar a resistência à compressão em relação ao BTC não estabilizados, demonstrando o seu potencial como alternativa eco-eficiente ao CEM. Contudo, devido à elevada necessidade de água do CRP, a porosidade dos BTC com CRP foi superior e a sua resistência à compressão ligeiramente inferior à dos com CEM. Assim, a microestrutura dos BTC varia consoante o tipo de estabilizante, o que pode afetar o seu desempenho higroscópico. Este aspeto ainda não foi investigado em BTC com CRP. Assim, este estudo caracteriza o desempenho higroscópico de BTC eco-eficientes. Para tal, o comportamento isotérmico de adsorção-dessorção foi analisado em BTC com 2 tipos de solo (S1 e S2), 0-10% de estabilizante (CRP ou CEM), diferentes percentagens de incorporação de CRP (20, 50 e 100%), tendo sido confrontado com a sua microestrutura, que foi avaliada através de porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) e adsorção de nitrogénio (N_2).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Os BTC foram produzidos com dois tipos de solo (S1 e S2) oriundos de Montemor-o-Novo, um tipo de resíduo de construção e demolição (RCD) da Vimajas, cimento Portland tipo I 42,5R (CEM) da Secil e cimento reciclado termoativado (CRP) produzido em laboratório.

Os solos S1 e S2 apresentavam massas volúmicas de 2,70 e 2,59 g/cm^3 (NP 83, 1965), limites de liquidez de 30 e 23,7%, limites de plasticidade de 22 e 18,9%, índices de plasticidade de 8 e 4,7% (NP 143, 1969), teores de matéria orgânica < 1% e de 1,48% e teores ótimos de humidade de 16 e 10,9% (ASTM

D698, 2021), respetivamente. Adicionalmente, os solos S1 e S2 eram constituídos por aproximadamente 20,1 e 5% de brita, 48,4 e 69,8% de areia, 31,5 e 25,2% de argila/silte (E 239, 1970; HB 195, 2012), com 13 e 4,2% de argila (de acordo com ensaios de sedimentação), respetivamente. Além disso, a composição granulométrica destes solos situava-se entre os limites indicados na XP P 13-901 (2001). Os solos foram também caracterizados através de análises de difração de raios-X e de termogravimetria, sendo basicamente constituídos por quartzo e albite e quantidades reduzidas de argilas expansivas, designadamente nontronite (S1) e montmorillonite (S2). Os resíduos de construção e demolição tinham uma massa volúmica de 2300 kg/m^3 e absorção de água às 24 horas de 4,3% (EN 1097-6, 2013), sendo constituídos por aproximadamente 45% de betão, 28% de agregado natural, 17% de cerâmicos de alvenaria, 2% de materiais betuminosos, 0,03% de vidro e 8% de outros materiais.

O CEM era caracterizado por uma consistência normal de 0,295 e um tempo de presa de 190-310 mins, assim como cerca de 1,02% de hidróxido de cálcio (CaO) livre. O CRP foi produzido a partir de pasta com relação água/cimento de 0,55 e resistência à compressão aos 28 dias de 33,4MPa. Cerca de 90 dias após a produção, a pasta foi submetida a processos de redução de dimensão de partículas (< 125 μm). Após este processo, as partículas foram submetidas a tratamento térmico num forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 150°C, onde permaneceram durante 1h, seguido de novo aquecimento a 10°C/min até 650°C, onde permaneceram durante 3h, tendo finalmente sido arrefecidas dentro do forno até temperatura ambiente. O CRP era caracterizado por uma consistência normal de 0,73, um tempo de presa de 290-385 mins e por 13,94% de CaO livre.

Para a realização deste trabalho, os BTC foram produzidos em 2 etapas, com dimensões de 220×105×60-80 mm através de uma prensa manual da *Terstaram* com uma força de compactação de 150kN. Na etapa 1, os BTC eram compostos por solo S1 e 5-10% de estabilizante (CRP ou CEM) (Quadro 1), enquanto, na etapa 2, eram constituídos por solo S2 com 25% de RCD e 5-8% de estabilizante (CRP ou CEM) (Quadro 1), de forma a aumentar a sua eco-eficiência. Destaca-se que, após a sua produção, os BTC estabilizados foram submetidos a 1 semana de cura húmida, e os BTC não estabilizados a 1 semana de cura seca cobertos com película.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

O desempenho higroscópico dos BTC foi avaliado através do método da câmara climática sugerido na EN ISO 12571 (2021). Os BTC foram secos em estufa e colocados numa câmara climática a 23±0,5°C e diferentes humidades relativas (HR) de forma crescente, nomeadamente 35%, 60%, 80% e 95%, para determinar a sua curva de adsorção. De seguida, foi realizado o processo inverso, com HR decrescente, para determinação da sua curva de dessorção.

Adicionalmente, os BTC foram caracterizados em termos de massa volúmica (MV) (EN 772-13, 2000) e de resistência à compressão aos 28dias (fc) (EN 772-11, 2011; NBR 8492, 2012). A resistência à compressão do BTC em ambiente de laboratório foi obtida com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com capacidade de 3000kN e uma célula de carga com capacidade de 200kN. Além disso, a distribuição de porosidade de seis composições foi determinada através de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e de adsorção de nitrogénio (N_2). Os ensaios de MIP e de adsorção de N_2 foram efetuados com recurso a um porosimetro *AutoPore IV 9500 V1.09* e um analisador *Micromeritics ASAP 2010*, respetivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MASSA VOLÚMICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O Quadro 1 apresenta a massa volúmica seca (MVseca), porosidade aberta (PA) e resistência mecânica aos 28 dias (fc) dos BTC em ambiente de laboratório. A porosidade aberta dos NE não foi determinada, uma vez que estes perdiam a integridade em contacto com a água.

Quadro 1– Composição dos BTC e resultados dos ensaios

Etapa	Designação	Tipo de solo	RCD (%)	CEM (%)	CRP (%)	Água total (%)	MV seca (kg/m^3)	PA (%)	fc (MPa)	$TH_{95\%HR}$ (%)	H_A (%)
Etapa 1	S1.CEM10	S1	-	10	-	15,0	1769	31,1	5,92	4,53	0,50
	S1.CRP10	S1	-	-	10	16,5	1595	36,8	4,44	5,19	0,47
	S1.CEM5	S1	-	5	-	15,2	1737	32,6	3,34	5,03	0,28
	S1.CRP5	S1	-	-	5	16,2	1649	35,3	2,45	5,22	0,24
	S1.CRP2.CEM8	S1	-	2	8	15,0	1742	32,0	5,12	4,78	0,58
	S1.CRP5.CEM5	S1	-	5	5	15,5	1683	33,8	4,99	4,88	0,47
	S1.NE	S1	-	-	-	14,4	1754	-	2,33	6,02	0,28
Etapa 2	S2.CEM8	S2	25	8	-	14,0	1865	26,4	9,04	3,01	1,19
	S2.CEM5	S2	25	5	-	14,0	1874	24,9	6,52	2,62	0,74
	S2.CRP8	S2	25	-	8	14,0	1778	25,4	5,51	3,14	0,93
	S2.CRP1,6.CEM6,4	S2	25	6,4	1,6	14,0	1845	28,6	10,43	3,24	1,09
	S2.CRP4.CEM4	S2	25	4	4	14,0	1874	26,0	8,39	2,95	1,07
	S2.NE	S2	25	-	-	12,0	1835	26,1	2,08	2,66	0,47

Os S1.BTC abrangeram gamas de massa volúmica e resistência à compressão de 1595-1769 kg/m^3 e 2,33-5,92 MPa e enquanto os S2.BTC compreenderam 1778-1874 kg/m^3 e 2,08-10,43 MPa, respetivamente (Quadro 1). Em geral, os S1.BTC apresentaram menor massa volúmica do que os S2.BTC, essencialmente devido à sua maior porosidade. De facto, a composição e a distribuição granulométrica do solo S1 contribuíram para um menor grau de compactação com maior teor ótimo de humidade do que o solo S2 (secção 2.1). No entanto, a resistência à compressão do S1.NE foi superior à do S2.NE, devido ao seu maior teor de argila, que incrementou a cimentação natural entre partículas.

A estabilização dos BTC com CEM teve uma influência pouco relevante na massa volúmica, mas conduziu a um aumento significativo da resistência à compressão (Quadro 1). Por outro lado, a

incorporação de CRP resultou numa redução da massa volúmica e aumento da porosidade dos BTC, independentemente do tipo de solo (Quadro 1). A menor compacidade dos BTC com CRP pode ser explicada pela sua maior necessidade de água e, consequente, maior dificuldade de compactação. Desta forma, a sua resistência mecânica foi inferior à dos BTC com CEM com o mesmo teor de estabilizante. No entanto, apesar da sua menor massa volúmica, a resistência à compressão dos BTC com CRP foi até 1,9-2,6 vezes superior à dos BTC.NE, o que significa que as propriedades de cimentação do CRP compensaram o efeito da sua maior porosidade em relação aos BTC.NE.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

O Quadro 2 resume os resultados da análise microestrutural realizada para seis BTC. A porosidade total obtida a partir de MIP (PT_{MIP}) e o volume total de poros obtido para adsorção de N_2 dos S1.BTC variaram entre 31,8 e 34,5% e entre 0,0386 e 0,0447 cm^3/g, enquanto as dos S2.BTC variaram entre 23,9 e 27,5% e entre 0,0206 e 0,0366 cm^3/g, respetivamente. Desta forma, à semelhança do verificado para a massa volúmicas (Quadro 1), os S2.BTC apresentaram menor porosidade do que os S1.BTC, indicando que os S2.BTC atingiram maior compacidade. Por outro lado, os S2.BTC apresentaram menor superfície específica do que os S1.BTC (Quadro 2), apesar de terem um volume de poros inferior e de a sua porosidade ter sido menos grosseira. Adicionalmente, o volume de poros menor do que 50nm (N_2) dos S2.BTC foi inferior ao dos S1.BTC, justificado pelo seu menor teor de partículas finas.

Quadro 2– Resultados das análises MIP e de adsorção de N_2

Designação	Análise MIP			Análise de adsorção de N_2			
	Porosidade total <400µm (%) (PT_{MIP})	**Porosidade entre 6-50nm (%)**	**Fração da porosidade total entre 6-50nm (%)**	**Volume de poros total <150nm (cm^3/g)**	**Volume de poros <50nm (cm^3/g)**	**Fração do volume de poros total <50nm (%)**	**Superfície específica BET (m^2/g)**
S1.CEM10	32,30	5,98	18,51	0,0447	0,0155	34,71	9,09
S1.CRP10	34,50	6,20	17,96	0,0446	0,0186	41,68	9,72
S1.NE	31,77	4,92	15,47	0,0386	0,0235	60,86	15,6
S2.CEM8	23,94	7,53	31,47	0,0366	0,0159	43,41	6,39
S2.CRP8	25,78	5,15	19,97	0,0306	0,0138	45,18	6,02
S2.NE	27,50	2,33	8,48	0,0206	0,0111	53,82	7,33

Os BTC estabilizados apresentaram uma porosidade notoriamente mais refinada do que os BTC.NE, apesar de a sua PT_{MIP} ter sido por vezes superior. Por um lado, a estabilização dos BTC conduziu a um aumento da fração de mesoporos de 6-50nm (MIP). Por outro, esta levou a uma diminuição da superfície específica, tendo sido até 72 e 22% superior nos BTC.NE do que nos BTC estabilizados da etapa 1 e 2, respetivamente. Isto pode ser explicado pelo facto de a estabilização inativar as partículas finas de argila, promovendo a sua separação e aglomeração, diminuindo o espaço intercamada e a superfície específica (Wu et al., 2022). A ocorrência deste fenómeno foi mais evidente nos S1.BTC, devido ao facto de o seu teor de argila ter sido maior do que o dos S2.BTC.

A PT_{MIP} dos BTC com CRP foi superior à dos com a mesma percentagem de CEM, tanto nos S1.BTC como nos S2.BTC. Tal pode ser justificado pelo facto de os BTC com CRP terem sido produzidos com maior quantidade de água total (S1.BTC) ou terem sido mais difíceis de compactar (S2.BTC) do que os BTC com CEM. No entanto, apesar de terem apresentado maior porosidade total, a microestrutura dos BTC com CRP foi semelhante a mais refinada do que a dos BTC com a mesma percentagem de CEM, tendo sido mais claro nos S1.BTC. A porosidade mais fina do S1.CRP10 foi semelhante no MIP (6-50nm) e maior na adsorção de N_2 (<50nm) do S1.CEM10. De facto, como consequência da porosidade das partículas de CRP, uma porção da água é absorvida pela porosidade intrapartícula, levando à diminuição do espaço interpartícula e à densificação da sua microestrutura (Bogas et al., 2022).

Contudo, o mesmo não se verificou nos S2.BTC, em que o BTC com CRP apresentou uma porosidade menos refinada do que o BTC com CEM, o que explica a resistência à compressão ligeiramente maior para determinada porosidade (Quadro 1). Porém, as superfícies específicas dos BTC com CRP e com CEM foram praticamente idênticas, tanto para os S1.BTC como para o S2.BTC, o que demonstra a eficiência dos dois estabilizantes.

3.3 CURVAS DE ADSORÇÃO-DESSORÇÃO E HISTERESE

3.3.1 Influência do tipo de solo

A Figura 1 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos BTC não estabilizados com diferentes tipos de solo (S1 e S2). Para uma dada HR, o S1.NE apresentou maior TH do que o S2.NE, em ambas as curvas. De facto, apesar de terem sido sujeitos à mesma pressão de compactação, a porosidade do S1.NE foi superior à do S2.NE, conforme demonstrado pela sua massa volúmica reduzida e pela análise microestrutural (Quadros 1 e 2). Tal pode ser explicado, não só pelo facto de o S1.NE ter sido produzido com maior quantidade de água e ter atingido um grau de compactação inferior, mas também pelo facto de o solo S1, ao ter maior teor de argila do que o solo S2, ter contribuído para um volume de poros finos e superfície específica superiores no S1.NE do que no S2.NE (Quadro 2). Isto demonstra a importância das propriedades do solo para a microestrutura dos BTC, e consequentemente, para o seu comportamento higroscópico.

A forma das curvas de adsorção-dessorção do S1.NE foi bastante diferente da do S2.NE (Figura 1). O S2.NE apresentou maior histerese local até 60%HR e ligeiramente inferior a 80%HR, tendo exibido maior histerese média e menor $TH_{95\%HR}$ do que o S1.NE (Quadro 1). As curvas do S1.NE apresentaram um aumento acentuado até 35%HR, associado à fase de adsorção superficial monocamada. Tal pode ser explicado pela sua superfície específica elevada (Quadro 2), resultante não só da presença de uma quantidade relevante de argila, mas também da sua natureza expansiva por conter nontronite. De facto, o volume de poros abaixo de 50nm corresponde a cerca de 31% da PT_{MIP} (<400µm, Quadro 2) e 61% do volume total de poros de N_2 (<150nm, Quadro 2), demonstrando que este BTC possuía uma quantidade relevante de porosidade fina. Adicionalmente, o TH elevado acima de 80%HR (Figura 1), relacionado com a fase de condensação capilar, pode ser explicado pelo seu teor de mesoporos. A histerese deste BTC ocorreu essencialmente acima de 35%HR, e aumentou significativamente com a HR (Figura 1). De facto, até 35%HR, a adsorção é essencialmente governada pela adsorção nas superfícies externas (maior para maior superfície específica) e pela captação de água no espaço intercamada dos minerais argilosos (<2nm), em especial os expansivos. Acima desta fase, a mesoporsidade também participa na adsorção, contribuindo para a histerese.

As curvas do S2.NE são típicas de um material granular. De facto, o solo S2 apresentava um teor de argila relativamente reduzido, que ficou ainda mais diluído com a incorporação de 25%RCD. A microestrutura mais grosseira deste BTC em comparação com o S1.NE é demonstrada pela sua menor

PT_{MIP} e menor superfície específica (Quadro 2). O S2.NE apresentou adsorção reduzida e histerese semelhante para as várias HR até 80%HR, tendo sido superior à do S1.NE até 60%HR. Contrariamente ao S1.NE, no caso do S2.NE, a fase de adsorção monocamada foi praticamente impercetível (Figura 1) e deverá ter ocorrido antes dos 35%HR, devido à sua superfície específica e teor de partículas finas reduzidos.

Neste estudo, ambos os solos continham argilas expansivas. No entanto, a maior histerese do BTC com maior teor de argila (S1.NE) só ocorreu para HR superior a 60%. Tal pode ser explicado pelo facto, de a distribuição de porosidade também afetar significativamente esta propriedade, nomeadamente o efeito *ink-bottle*.

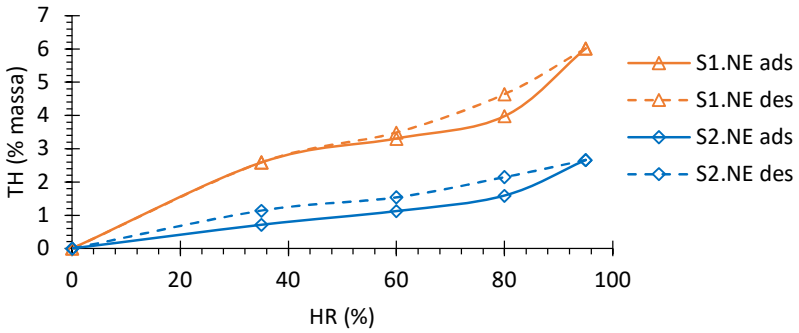


Figura 1 – Curvas de adsorção-dessorção dos BTC não estabilizados

3.3.2 Influência do tipo e teor de estabilizante

A influência do estabilizante dependeu do tipo de solo utilizado na produção dos BTC, nomeadamente do seu teor de argila. A Figura 2 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos com diferentes percentagens de estabilizante. A incorporação de até 10% de estabilizante resultou num decréscimo das propriedades higroscópicas dos BTC, tendo-se observado a redução progressiva do $TH_{95\%HR}$, independentemente do tipo de estabilizante (Quadro 1). Por um lado, a incorporação de estabilizante promove a floculação e cimentação das partículas de argila, reduzindo a sua atividade e superfície específica (Quadro 2). Tal contribui para a redução da captação de água na fase de adsorção monomolecular (até 35%HR), bem como para o fenómeno de absorção de água intercamada nas partículas argilosas. Por outro lado, a estabilização com cimento terá diminuído a permeabilidade dos BTC, dado que o desenvolvimento de produtos de hidratação reduz a porosidade e interconetividade destes materiais. Além disso, ocorreu um refinamento da microestrutura, tendo aumentado o volume de mesoporos entre 6 e 50nm (Quadro 2), mas diminuído o volume de microporosidade muito fina (Quadro 2). A presença de argila ativa e a sua elevada superfície específica aumenta a captação de água, mesmo para BTC.NE com mesoporosidade semelhante a inferior. O incremento da mesoporosidade e a forma mais irregular da estrutura porosa resultou num aumento da histerese média nos BTC com 10% de estabilizante (Quadro 1).

A incorporação de 5% de estabilizante foi menos efetiva na estabilização e redução de porosidade dos BTC (Quadros 1 e 2). Assim, estes BTC apresentaram maior quantidade de argila ativa com elevada superfície específica e o seu comportamento foi intermédio entre o BTC.NE e os BTC com 10% de estabilizante (Figura 2). Tal pode ser confirmado pela ligeira redução da adsorção de água a 35%HR em comparação com o BTC.NE. Desta forma, a histerese média não foi afetada de forma relevante pela incorporação de 5% de estabilizante (Quadro 1). No entanto, e apesar do seu maior teor de água de

produção, estes S1.BTC apresentaram maior resistência à compressão do que o S1.NE (Quadro 1), bem como mantiveram a sua integridade em contacto com a água, indicando que a estabilização ocorreu.

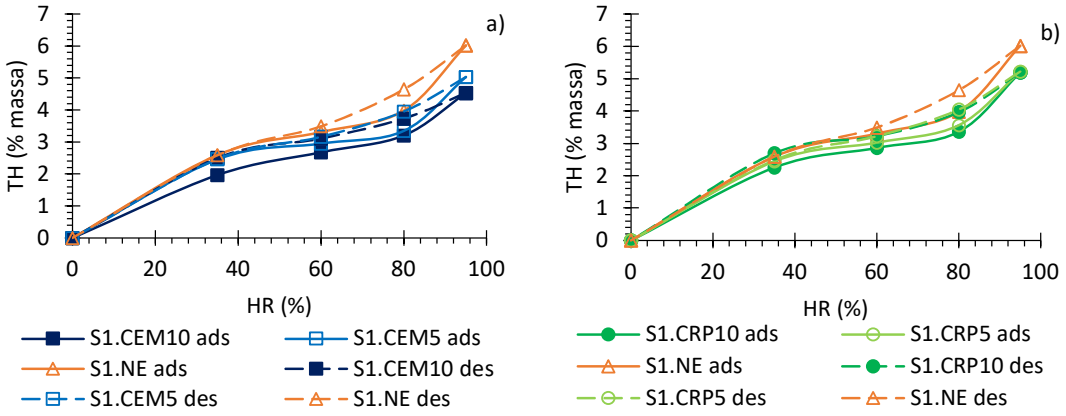


Figura 2 – Curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos com diferentes quantidades de: a) CEM; b) CRP

Relativamente ao tipo de estabilizante, o comportamento dos S1.BTC com CEM ou com CRP foi semelhante. A adsorção aos 35%HR e 95%HR foi ligeiramente superior nos BTC com CRP do que nos BTC com CEM (Figura 2), o que poderá ser explicado pela sua superfície específica e PT_{MIP} (Quadro 2) ligeiramente superiores, respetivamente.

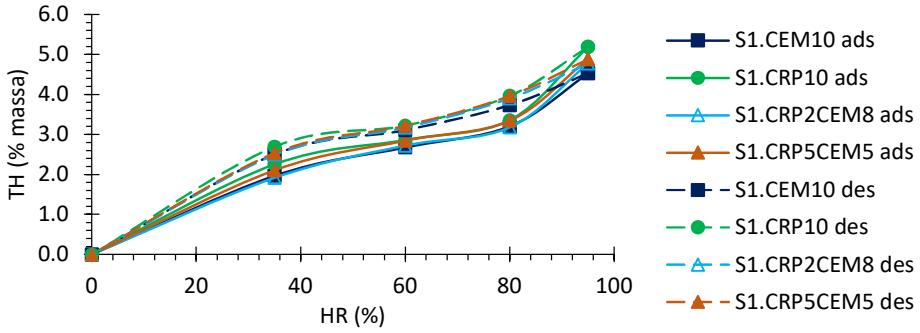


Figura 3– Curvas de adsorção-dessorção dos S1.BTC produzidos 10% de estabilizante composto por diferentes quantidades de CEM e CRP

A histerese média também foi ligeiramente inferior nos BTC com CRP do que nos com CEM (Quadro 1), tanto para 5% como para 10% de estabilizante. No entanto, estes parâmetros foram determinados em percentagem de massa, pelo que os resultados terão sido afetados pela variação da massa volúmica seca dos BTC com CRP e CEM. Tendo em conta que as massas volúmicas dos BTC com CRP foram cerca de 90% das dos BTC com CEM (Quadro 1), a mesma adsorção em percentagem de massa corresponde a menor quantidade de água adsorvida. Desta forma, caso o TH tivesse sido determinado em percentagem de volume, os S1.BTC com CRP teriam apresentado $TH_{95\%HR}$ e histereses médias semelhantes às dos com CEM. Conforme discutido na secção 3.2, a fração de poros abaixo de 50nm e a superfície específica foram idênticas nos S1.BTC com CRP e com CEM (Quadro 2). A substituição parcial de CEM por CRP a curvas de adsorção-dessorção e $TH_{95\%HR}$ intermédios relativamente aos BTC com apenas CRP ou CEM (Figura 3). Em suma, a capacidade higroscópica dos BTC com solo argiloso

(S1.BTC) decresceu com o teor de estabilizante, tendo sido pouco afetada pelo tipo de estabilizante. A Figura 4 apresenta as curvas de adsorção-dessorção dos S2.BTC produzidos com CRP ou CEM. Ao contrário dos S1.BTC, os $TH_{95\%HR}$ dos BTC estabilizados foram superiores aos do S2.NE (Figura 4), independentemente do tipo de estabilizante. De facto, apesar da sua menor massa volúmica e maior PT_{MIP} (Quadro 2), a sua microestrutura foi mais refinada, apresentando maior volume de microporos (Quadro 2). O teor de argila reduzido do solo S2, ainda mais reduzido com a incorporação de RCD, pode explicar a superfície específica reduzida do S2.NE e a sua subsequente pouca adsorção a 35%HR. Devido ao facto de o solo S2 ter um teor de argila reduzido, a estabilização cimentícia teve um efeito pouco relevante na redução da superfície específica dos S2.BTC comparativamente ao S2.NE (Quadro 2), o que explica a sua influência pouco significativa na capacidade de adsorção-dessorção até 60-80%HR (Figura 4). O maior volume de mesoporos (6-50nm) dos S2.BTC estabilizados compensou a redução da superfície específica após a estabilização, tendo aumentado a capacidade de adsorção, em especial ao nível da condensação capilar, acima de 80%HR. Devido à sua maior capacidade de adsorção e à forma mais complexa da estrutura porosa destes BTC (efeito de *ink-bottle* mais relevante), a curva de dessorção foi maior nos S2.BTC estabilizados do que no S2.NE, tendo conduzido a histereses médias mais elevadas (Figura 4 e Quadro 1).

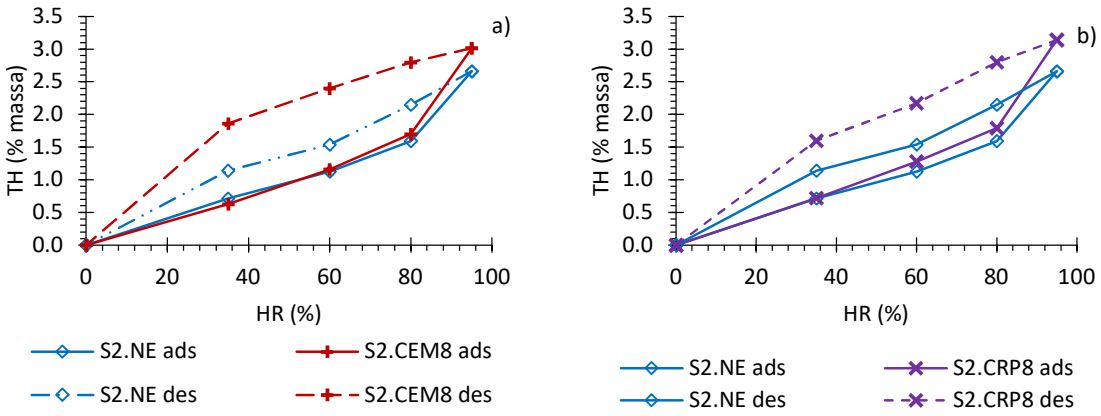


Figura 4 – Curvas de adsorção-dessorção do S2.NE e dos S2.BTC produzidos com: a) 8%CEM; b) 8%CRP

À semelhança dos S1.BTC, os S2.BTC com CRP apresentaram menor histerese média e maior $TH_{95\%HR}$ do que os com a mesma percentagem de CEM (Quadro 1). Com base na discussão de resultados dos S1.BTC, tendo conta a redução de apenas 5% da massa volúmica do S2.BTC com CRP, seria expectável que o $TH_{95\%HR}$ fosse semelhante ao do S2.BTC com CEM. No entanto, ao contrário dos S1.BTC, a fração do volume de poros total abaixo de 50nm do S2.BTC com CRP foi inferior à do com CEM, tendo resultado em curvas de dessorção e histereses menores, em especial para 35-60%HR. Todavia, o tipo de estabilizante não afetou o comportamento higroscópico dos S2.BTC de forma relevante. Além disso, ao contrário dos BTC com solo argiloso (S1.BTC), a estabilização dos BTC com solo arenoso (S2.BTC) incrementou a sua capacidade higroscópica.

À semelhança dos S1.BTC, apenas se observaram pequenas variações das curvas de adsorção-dessorção quando o CEM foi parcialmente substituído por CRP (Figura 5). Ao contrário do que se verificou para o S2.BTC com apenas CRP, a incorporação de até 50% CRP não afetou significativamente a massa volúmica e as curvas de dessorção dos S2.BTC. O $TH_{95\%HR}$ e curva de dessorção mais elevados foram obtidos para o S2.BTC com 20%CRP (S2.CRP1,6CEM6,4), que também apresentou a maior resistência à compressão (Quadro 1).

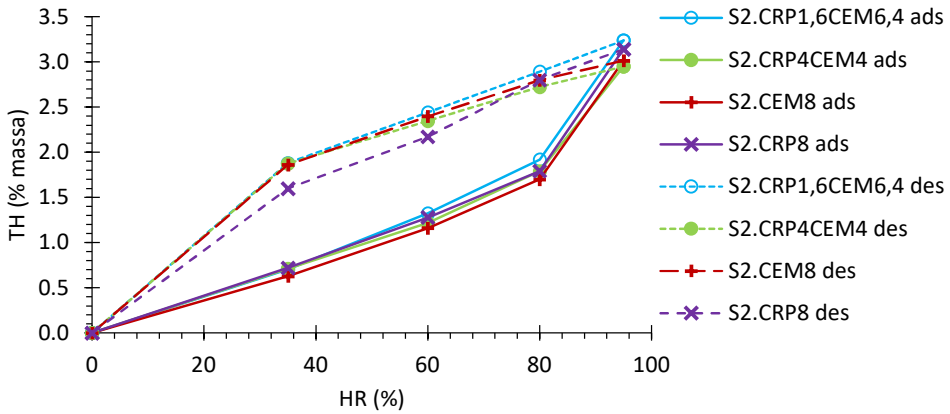


Figura 5– Curvas de adsorção-dessorção dos S2.BTC produzidos 8% de estabilizante composto por diferentes quantidades de CEM e CRP

4 CONCLUSÕES

A microestrutura e capacidade higroscópica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado, como substituição parcial ou total do cimento Portland, foi analisada tendo em conta diferentes tipos de solo e percentagens de estabilizante.

Devido à maior necessidade de água e maior dificuldade de compactação, os BTC com CRP apresentaram menor grau de compactação e resistência à compressão do que os BTC com CEM. No entanto, o CRP exibiu elevada capacidade de hidratação e eficiência na estabilização, tendo atingido resistências à compressão mais de duas vezes superiores às dos BTC.NE.

A microestrutura dos BTC ficou mais refinada após estabilização, independentemente do tipo de solo e estabilizante. O volume de mesoporos aumentou, tendo afetado a capacidade higroscópica e a histerese dos BTC.

A influência da estabilização nas propriedades higroscópicas dos BTC dependeu do tipo de solo, tendo contribuído para o seu decréscimo quando foi utilizado um solo argiloso (S1) e incremento quando foi utilizado um solo arenoso (S2). A estabilização reduziu a atividade e área de adsorção de partículas argilosas disponível (superfície específica e porosidade intercamada), tendo reduzido as propriedades de adsorção, em particular na fase de adsorção monocamada. No entanto, o volume de mesoporos aumentou. Desta forma, dependendo do teor de argila, a estabilização pode aumentar ou reduzir a capacidade higroscópica dos BTC.

A estabilização dos BTC alterou a estrutura porosa dos BTC, tendo resultado em maior quantidade de mesoporos, e consequentemente, aumentado a histerese. Este fenómeno torna-se mais relevante para maior teor de estabilizante.

O desempenho higroscópico dos BTC não foi afetado de forma relevante pela substituição parcial ou total de CEM por CRP. Apesar de terem apresentado maior porosidade, a microestrutura fina dos BTC com CRP foi semelhante à dos com CEM.

Assim, o CRP foi efetivo na estabilização dos BTC, tendo-se aproximado do comportamento mecânico e higroscópico dos BTC com CEM.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS através do projeto UIDB/ 04625/2020, bem como a colaboração da SECIL e da Vimajas, pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental, e das Oficinas do convento, Montemor-o-Novo. O terceiro autor gostaria ainda de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento 2023.05651.BD.

REFERÊNCIAS

Arrigoni, A., Grillet, A., Pelosato, R., Dotelli, G., Beckett, C., Woloszyn, M., Ciancio, D., 2017. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. Build. Environ. 115, 358–367. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.034

ASTM D698, 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). American Society for Testing & Materials (ASTM).

Augarde, C., 2012. Soil mechanics and earthen construction: strength and mechanical behaviour. In Modern Earth Buildings, Materials, Engineering, Constructions and Applications, A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. Edited by M. Hall, R. Lindsay and M. Krayenhoff, pp. 204–221.

Bogas, J., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J., Guedes, M., 2022. Hydration and phase development of recycled cement. Cem. Concr. Compos. 127, 104405. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405

Bogas, J., Real, S., Cruz, R., Azevedo, B., 2023. Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. J. Build. Eng. 79. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107892

Carriço, A., Bogas, J., Real, S., Pereira, M., 2022. Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. Constr. Build. Mater. 333, 127392. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392

Carriço, A., Real, S., Bogas, J., 2021. Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. Cem. Concr. Compos. 124, 104270. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270

E 239, 1970. Soils. Grain-size analysis by wet sieving. Laboratório de engenharia civil (LNEC).

EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption. European Committee for standardization (CEN).

EN 772-11, 2011. Methods of test for masonry units. Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry un. European Committee for standardization (CEN).

EN 772-13, 2000. Methods of test for masonry units. Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone). European Committee for standardization (CEN).

EN ISO 12571, 2021. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties. European Committee for standardization (CEN).

Fabbri, A., Aubert, J.-E., Bras, A., Faria, P., Gallipoli, D., Goffart, J., McGregor, F., Perlot-Bascoules, C., Soudani, L., 2022. Hygrothermal and Acoustic Assessment of Earthen Materials. pp. 83–126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_3

HB 195, 2012. The australian earth building handbook. Standards Australia.

McGregor, F., Heath, A., Shea, A., Lawrence, M., 2014. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. Build. Environ. 82, 599–607. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027

NBR 8492, 2012. Soil-cement brick. Dimensional analysis, compressive strength and water absorption. Test method. Associação brasileira de normas técnicas (ABNT).

NP 143, 1969. Soils. Determination of consistency limits. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

NP 83, 1965. Soils. Determination of particle density. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

Real, S., Bogas, J., Carriço, A., Hu, S., 2021. Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete. Appl. Sci. 11, 2454. https://doi.org/10.3390/app11062454

Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J., Carriço, A., 2022. Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. Materials (Basel). 15. https://doi.org/10.3390/ma15196766

Rigassi, V., 1985. Compressed earth blocks : Manual of production. Vol. I. Eschborn, Germany: CRAterre-EAG.

Saidi, M., Soukaina, A., Zeghmati, B., Sediki, E., 2018. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. Constr. Build. Mater. 167, 566–577. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063

WBCSD, IEA, 2009. Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA).

Wu, J., Deng, Z., Deng, Y., Zhou, A., Zhang, Y., 2022. Interaction between cement clinker constituents and clay minerals and their influence on the strength of cement-based stabilized soft clay. Can. Geotech. J. 59, 889–900. https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0194

XP P 13-901, 2001. Compressed earth blocks for walls and partitions. Definitions. Specifications. Tset methods. Delivery acceptance conditions. Association Française de Normalisation (AFNOR).

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

OPTIMISING ACCELERATED CARBONATION CURING FOR ENHANCED MECHANICAL PERFORMANCE OF ALKALI-ACTIVATED MATERIALS

Ghandy Lamaa [a]; António P. C. Duarte [a]; Jorge de Brito [a]; Rui Vasco Silva [a]

[a] Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Department of Civil Engineering, Architecture and Environment, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal; ghandy.lamaa@tecnico.ulisboa.pt (G.L.); antonio.duarte@tecnico.ulisboa.pt (A.P.C.D.); jb@civil.ist.utl.pt (J.d.B.); rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt (R.V.S.)

ABSTRACT

This study presents an investigation on the enhancement of the properties of three alkali-activated binders: fly ash; municipal solid waste incinerator bottom ash; and waste glass rejects, with the aim of improving their performance through an optimised accelerated carbonation curing regime. For each binder, mortar-size specimens (160 × 40 × 40 mm^3), resembling small-scale pavement blocks, were prepared using previously optimised mix designs incorporating optimum alkaline solutions for maximum performance. They were then subjected to a curing regime comprising of unchanging thermal and dry curing stages but varying the accelerated carbonation curing stage with different CO_2 concentrations (0%, 5%, 10%, and 25%) and exposure periods (24, 67, and 161 hours). The compressive and flexural strengths revealed distinct trends for each binder under different CO_2 curing conditions. Fly ash displayed an equilibrium between early-stage strength gain and microcrack development, while bottom ash and glass showed increased strength with higher CO_2 concentrations and longer curing times. Flexural strength also improved, notably with waste glass exhibiting a substantial 118.82% increase at 25% CO_2. The results served to determine the optimum CO_2 concentration and exposure period needed for fully-carbonated, thus performance-enhanced, pavement blocks. Furthermore, the results will also allow concentration-dependent CO_2 diffusivity coefficients to be estimated.

Keywords: alkali-activated materials; accelerated carbonation curing; mechanical strength development; microstructural enhancements; CO_2 capture.

1 INTRODUCTION

Since the early 19th century, ordinary Portland cement (OPC) has been the primary construction binding material, renowned for its exceptional performance evidenced by various concrete megastructures [1, 2]. Despite its widespread use, OPC production contributes significantly to CO_2 emissions, with estimates suggesting around 2520 Mt of CO_2 released in 2021 alone, making up 8% of total global emissions from all industries [3]. As efforts to reduce CO_2 emissions intensify to mitigate global warming effects, addressing emissions from the cement industry has become crucial [4].

Various approaches have been explored to reduce emissions from OPC production, including technological improvements in cement calciner operations to enhance energy efficiency and decrease CO_2 emissions [5]. However, a predominant focus has been brought on mitigating environmental impacts by substituting OPC with supplementary cementitious materials (SCM) like blast-furnace slag (BFS), fly ash (FA), and silica fume (SF), commonly used as partial cement replacements [6-8]. Indeed, the use of these materials has significantly reduced environmental impacts [9] and, consequently, there has been growing interest in replacing OPC entirely with aluminosilicate-rich binders in the production of alkali-activated materials (AAM) [10, 11]. These binders, activated by an alkaline solution, offer promising eco-friendly alternatives. Extensive investigation has been conducted on the use of FA and

BFS as sole or blended precursors in alkali-activated concrete mixes, yielding positive results [12-16]. However, the availability of FA and BFS is becoming limited due to shifts towards renewable energy sources and more eco-efficient processes in industries like coal and steel production [17, 18].

Recent studies have examined the potential of new aluminosilicate industrial waste materials as AAM, including municipal solid waste incinerator bottom ashes (MIBA) and waste glass rejects (WGR), as sole precursors [17, 19, 20]. However, mortar and concrete incorporating these binders often exhibit subpar mechanical and durability performances, attributed to lower amorphous content in the precursors and porous microstructural profiles. To address these limitations, the use of accelerated carbonation as a curing method has been researched [20-24], showing promising enhancements in porosity, microstructure, and mechanical performance.

After previously optimising the water content, compaction method, and alkaline solution for FA, MIBA, and WGR in previous work, significant micro- and macrostructural improvements were observed [20, 25]. However, it is possible that the mixes have not yet reached their maximum performance potential, as the specimens are currently undergoing curing using an unoptimized carbonation curing method. The effectiveness of this curing technique relies on various factors, including CO_2 concentration, curing duration, relative humidity, temperature, and pressure. Therefore, it is crucial to identify the optimal combination of these factors for each selected binder, to achieve the peak performance.

In this study, the carbonation curing technique was optimised for the best mechanical performance of FA, MIBA, and WGR. The optimum alkaline solution of each binder was used to produce specimens that will undergo a series of different curing regimes, aiming to find the best to be used for maximized performance. For this purpose, similar mixes were prepared per each binder, from which standard-size mortar specimens were cast. The curing regime used comprised thermal, dry, and carbonation curing stages. The thermal and dry curing periods were held constant for all specimens; however, this was not the case for the carbonation curing stage where factors such as exposure period and CO_2 concentration were variables. For each binder, specimens were exposed to different CO_2 concentrations and curing periods. To find the optimum combination of CO_2 concentration and exposure period for maximized performance, the mechanical performance of the specimens was assessed by subjecting them to compressive and flexural strength tests. The results of this experimental campaign served to determine the optimum CO_2 concentration and exposure period needed for fully-carbonated, thus performance-enhanced, conventional concrete pavement blocks.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 BINDERS

The FA, from the Sines power plant in *Alentejo*, Portugal, served as the reference binder, requiring no prior preparations due to meeting size requirements. MIBA from the *Valorsul* waste-to-energy power plant in *São João da Talha*, Portugal, underwent preparatory steps, including contaminant removal, drying, and grinding to meet particle size distribution standards. WGR from *CascoVidro* in *Marinha Grande*, Portugal, were used, primarily comprising highly reactive soda-lime-silica glass, suitable for alkali activation. However, these rejects required size reduction through milling due to their extensive particle size distribution.

2.2 AGGREGATES

In this study, two types of siliceous sand were used as fine aggregates: (a) coarse sand with a particle size of 0/4 and (b) fine sand with a particle size of 0/1. Additionally, coarse aggregates consisting of 2-5.6 mm sand-gravel of calcareous nature were employed.

2.3 ALKALINE ACTIVATOR

The alkaline activator used was a liquid solution prepared using sodium hydroxide, sodium silicate solution, and water. Sodium hydroxide pellets of 98% purity and a relative density of 2.13 g/ml were employed to produce the alkaline activator. Additionally, a solution of sodium metasilicate was utilized. The sodium silicate solution consisted of reactive grade sodium silicate, with approximately 26.4 ± 1.5% silicon oxide (SiO_2) and 8 ± 0.6% sodium oxide (Na_2O), and a SiO_2/Na_2O ratio of 3.3 ± 0.1. Moreover, the sodium silicate solution had a water content of 65.6 ± 2% and a relative density of 1.355 g/ml. The solvent for the anhydrous sodium hydroxide was tap water provided by the EPAL company.

2.4 WATER-REDUCING ADMIXTURE

SikaPlast-717 was used as the water-reducing admixture (WRA). It is a naphthalene-based superplasticizer comprising synthetic organic water-based dispersants, with a density of 1.21 ± 0.03 kg/dm^3 and a pH of 10 ± 1.

2.5 SETTING TIME RETARDER

Sodium tetraborate decahydrate (37%) was employed as the setting time retarder. The retarder was dissolved in water and added to the alkaline solution to prevent possible flash setting occurrences [25].

2.6 MIX DESIGN

As mentioned, the optimal water-to-binder (w/b) ratio, alkaline solution concentrations, and percentage of WRA for each precursor were determined based on previous work [20, 25] and are detailed in Table 1. Identical 2 L mixes were prepared for each binder, following their respective optimal mix designs outlined in Table 2. The binder proportions remained constant with no variations; specifically, only 100% FA, 100% MIBA, and 100% WGR were used. To prevent flash setting, a setting retarder comprising 4% of the binder mass was added and dissolved in the alkaline solution for all mixes.

Table 1 Optimum w/b ratio, alkaline solution concentrations, and percentage of WRA used for each binder.

Type of binder	w/b	Na_2O/binder (%)	SiO_2/Na_2O	WRA (% binder mass)
FA	0.22	10	1.0	0
MIBA	0.35	10	0	0
WGR	0.35	10	0	2

Table 2 Mix composition for all binders in kg/m^3.

Type of binder	Binder	WRA	Water	Fine sand	Coarse sand	Sand-gravel	NaOH	Na_2SiO_3 solution	Borax
FA	350	0	4.3	284.7	551.1	1065.9	30.8	132.6	14
MIBA	350	0	135.6	284.7	551.1	1065.9	45.2	0	14
WGR	350	7	135.5	284.7	551.1	1065.9	45.2	0	14

2.7 PRODUCTION, CURING AND TESTING METHODS

As mentioned, the specimens in this study were designed to resemble standard mortar specimens while meant to represent conventional concrete pavement blocks. A consistent compaction method was deployed to ensure uniformity, and their smaller size facilitated compatibility with existing testing

equipment. The mixes were prepared following the guidelines of EN 196-1 [26], with slight modifications primarily in the mixing procedure.

Three-gang steel moulds measuring 40 × 40 × 160 mm³ were employed, with Petromold-F selected as the release agent for its superior effectiveness with alkaline mixes. After moulding and compaction, the specimens were covered with plastic film to prevent rapid evaporation and subjected to curing under three conditions: thermal at 70 °C; dry at ~65% RH and 23 °C; and carbon curing at ~65% RH and 23 °C with varying CO_2 concentrations. Following casting, the moulds were placed in the thermal chamber for 24 hours before demoulding. Subsequently, all specimens were cured in a dry chamber for 21 days (504 hours) before placement in the CO_2 chamber for 24, 67, and 161 hours at concentrations of 0.05% (atmospheric), 5%, 10%, and 25%, as detailed in Table 3. While thermal and dry curing durations remained constant for all specimens, CO_2 exposure duration and concentration varied, as outlined in Table 4.

After curing, specimens were tested for compressive and flexural strengths in accordance with EN 1015-11 [27].

Table 3 Variation in CO_2 concentration and exposure period.

CO_2 concentration (%)	CO_2 exposure period (hours)		
	24	67	161
0.05	-	-	161h0%
5	24h5%	67h5%	161h5%
10	24h10%	67h10%	161h10%
25	24h25%	67h25%	161h25%

Note: 0.05% CO_2 represents the atmospheric CO_2 content. "-" represents the absence of the specimens.

Table 4 Curing stages of specimens per binder.

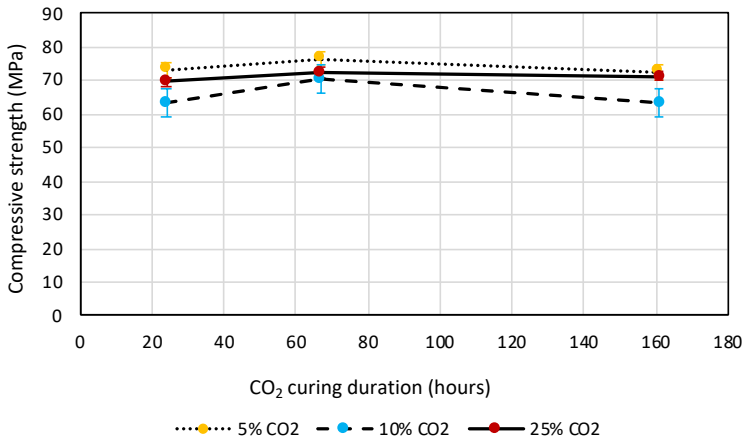
Group	Number of specimens	Curing stages					
		Thermal curing	Dry curing	Carbonation curing			
				% CO_2	CO_2 exposure period		
A	2	24 h	504 h	0.05%	-	-	161 h
B	6	24 h	504 h	5%	24 h	67 h	161 h
C	6	24 h	504 h	10%	24 h	67 h	161 h
D	6	24 h	504 h	25%	24 h	67 h	161 h

3 RESULTS AND ANALYSIS

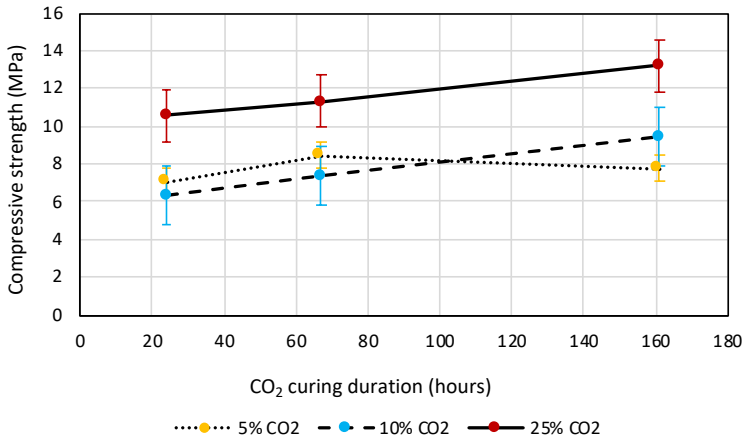
3.1 COMPRESSIVE STRENGTH

Figure 1 illustrates the compressive strengths of mortars made with FA, MIBA, and WGR exposed to varying CO_2 curing concentrations for different durations. For FA, under 5% CO_2 (Figure 1a), the compressive strength increased by approximately 4.64% from 73.2 MPa to 76.6 MPa at 24 h and 67 h, respectively, before declining by 5.09% from the peak value at 161 h. A similar trend was observed for specimens exposed to 10% CO_2, with an increase of about 11.70% from 63.2 MPa to 70.6 MPa at 24 h and 67 h, respectively, followed by a decrease of 10.48% to 63.2 MPa at 161 h. However, the compressive strength of FA specimens under 10% CO_2 was lower than that of control specimens cured under ambient conditions, which reached 71.0 MPa. At 25% CO_2, the strength increased initially by

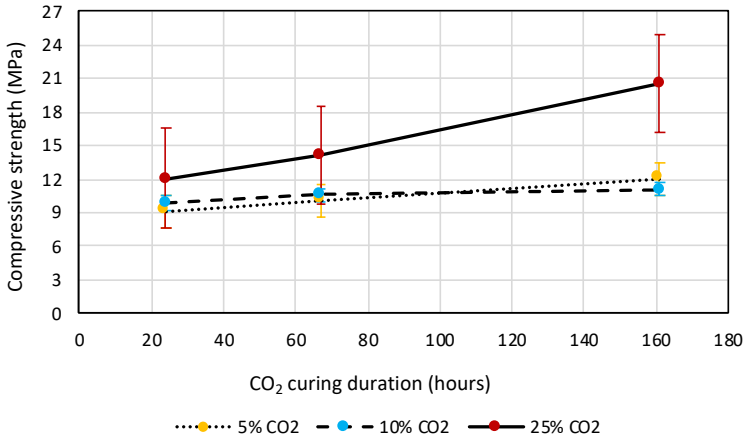
4.02% from 69.6 MPa to 72.4 MPa at 24 h and 67 h, respectively, subsequently slightly decreasing to 71.4 MPa at 161 h, representing a decrease of 1.38% from the peak value.



(a)



(b)



(c)

Figure 1 Compressive strength variations of (a) FA, (b) MIBA, and (c) WGR at different CO_2 concentrations and exposure durations.

This trend suggests that FA reached peak performance at 67 hours, followed by a decline, possibly due to continuous carbonation. Carbonation, a chemical reaction between CO_2 and calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) in FA or with free Ca^{2+} and Na^+ ions, forms calcium carbonate ($CaCO_3$), sodium carbonates (Na_2CO_3) and water (H_2O). Initially, the precipitation of these carbonates can enhance strength by filling pores, but prolonged carbonation may lead to microcrack formation and weaken the structure through extensive decalcification of C-(A-)S-H phases. Additionally, $CaCO_3$ formation can alter pore structure, affecting water transport and overall strength development.

Figure 1b illustrates the compressive strength results of MIBA specimens exposed to various CO_2 curing concentrations over different durations. After 24 hours, compressive strengths of 7.1 MPa, 6.3 MPa, and 10.6 MPa were recorded at 5%, 10%, and 25% CO_2 concentrations, respectively. These values increased at 67 hours to 8.5 MPa, 7.4 MPa, and 11.3 MPa for 5%, 10%, and 25% CO_2 concentrations, respectively. While specimens cured at 5% CO_2 peaked at 67 hours and then slightly declined to 7.7 MPa after 161 hours, those cured at 10% and 25% CO_2 concentrations continued to increase, reaching 9.5 MPa and 13.2 MPa, respectively, after 161 hours. Notably, carbonated MIBA specimens exhibited enhanced performance compared to those exposed to atmospheric CO_2 levels, where compressive strength was only 4.5 MPa.

These findings emphasize the positive influence of carbonation curing, especially with higher CO_2 concentrations and longer durations, on the compressive strength of MIBA specimens. The formation of robust calcium carbonate and sodium carbonate compounds during the carbonation reaction enhanced the load-bearing capacity and structural integrity of the specimens. This highlights the potential for optimizing the carbonation process to improve the mechanical properties and overall performance of MIBA concrete across various applications.

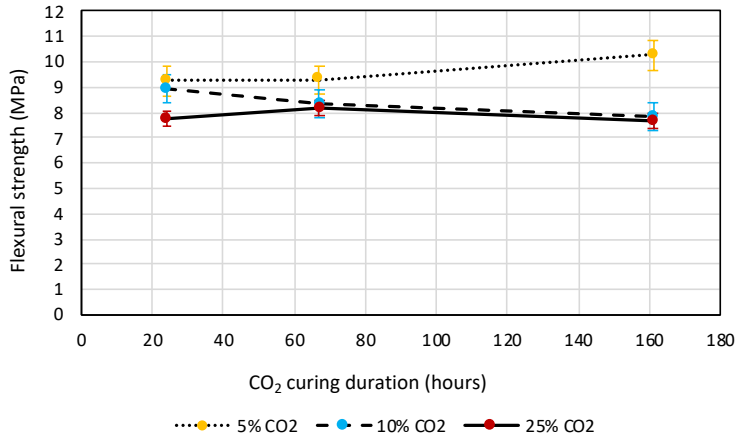
Figure 1c presents the compressive strength results of WGR specimens exposed to different CO_2 concentrations for varying durations. After 24 hours, strengths of 9.2 MPa, 9.9 MPa, and 12.1 MPa were recorded at 5%, 10%, and 25% CO_2, respectively, compared to 9.9 MPa for uncarbonated WGR specimens. Strengths improved with longer curing durations, reaching 10.1 MPa, 10.6 MPa, and 14.2 MPa at 67 hours for 5%, 10%, and 25% CO_2, respectively. Further increases were observed at 161 hours, with strengths of 12.0 MPa, 11.1 MPa, and 20.6 MPa for 5%, 10%, and 25% CO_2, respectively.

Unlike FA and MIBA, WGR exhibited a consistent increase in compressive strength with longer curing times and higher CO_2 concentrations. The WGR specimens demonstrated over 70% higher strength at 25% CO_2 compared to 5% and 10% CO_2 after 161 hours, with a reported 108.08% increase for 25% CO_2 compared to 21.21% for 5% CO_2 and 12.12% increase in strength for 10% CO_2, from 24 to 161 curing hours. This behaviour indicates that WGR is highly responsive to the carbonation curing process, showing continuous strength improvement with prolonged curing durations and increased CO_2 concentrations.

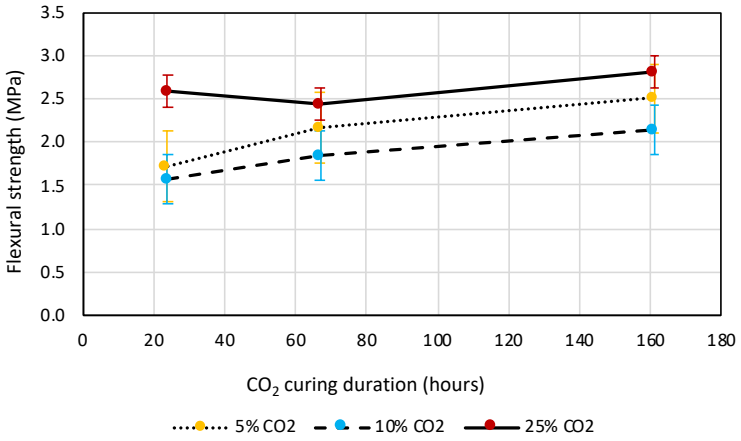
3.2 FLEXURAL STRENGTH

Figure 2 shows the flexural strengths of mortars made with FA, MIBA, and WGR under different curing durations and CO_2 concentrations. For FA (Figure 2a), specimens exposed to 5% CO_2 demonstrated the highest strength: 9.26 MPa at 24 h; 9.29 MPa at 67 h; and 10.27 MPa at 161 h. Conversely, those cured under 10% CO_2 exhibited decreased strength over time: 8.94 MPa; 8.32 MPa; and 7.86 MPa at the same intervals. The lowest performance was observed in specimens cured under 25% CO_2: 7.77 MPa; 8.18 MPa; and 7.67 MPa, respectively. The dense microstructure of the FA matrix hinted at elevated performance even without accelerated carbonation. Exposure to 5% CO_2 boosted performance by 1.31%, 1.42%, and 12.23% after 24 h, 67 h, and 161 h, respectively, due to gradual formation of carbonates within the material's matrix. However, specimens exposed to 10% and 25%

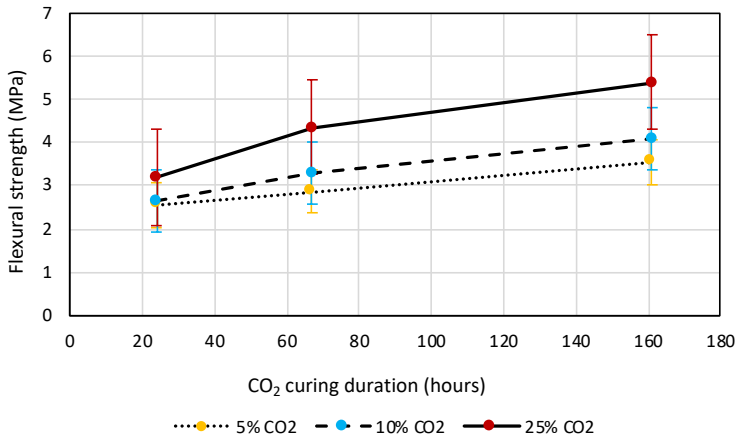
CO_2 exhibited reduced performance due to extensive decalcification of the dense microstructure, leading to microcracking and decreased performance over time.



(a)



(b)



(c)

Figure 2 Flexural strength variations of (a) FA, (b) MIBA, and (c) WGR at different CO_2 concentrations and exposure durations.

For MIBA (Figure 2b), specimens exposed to 25% CO_2 exhibited the highest flexural strengths: 2.58 MPa at 24 h; 2.44 MPa at 67 h; and 2.80 MPa at 161 h. Similarly, increased performance was observed for MIBA specimens cured at 5% and 10% CO_2. Under 5% CO_2, there was a steady increase in flexural strength over time: 1.72 MPa at 24 h; 2.16 MPa at 67 h; and 2.51 MPa at 161 h. Likewise, specimens cured under 10% CO_2 showed enhanced performance over time, recording 1.57 MPa, 1.84 MPa, and 2.14 MPa at the same intervals. The reference MIBA specimens cured under atmospheric CO_2 conditions exhibited a strength of 1.75 MPa.

Steady increases in flexural strength were observed for WGR specimens (Figure 2c). After 161 hours of carbonation at 5%, 10%, and 25% CO_2, strength increased by 43.67%, 65.38%, and 118.82%, respectively, compared to the uncarbonated specimens' strength of 2.47 MPa. The highest WGR performance was noted for specimens exposed to 25% CO_2, recording 3.19 MPa, 4.35 MPa, and 5.39 MPa at 24 h, 67 h, and 161 h, respectively. Specimens cured under 10% CO_2 exhibited strengths of 2.65 MPa, 3.30 MPa, and 4.08 MPa at the same intervals, while those exposed to 5% CO_2 reported strengths of 2.55 MPa, 2.86 MPa, and 3.55 MPa, respectively.

The consistent performance improvement for MIBA and WGR with increasing CO_2 concentration and curing duration is attributed to the denser microstructure formation due to calcium carbonate formation, similar to the findings for compressive strength.

4 CONCLUSION

Throughout this experimental campaign, the main objective was to refine the accelerated carbonation curing process for three distinct alkali-activated binders: fly ash; municipal solid waste incinerator bottom ash; and waste glass rejects. Previous optimisation efforts regarding water content, compaction method, and alkaline solution had already yielded significant improvements in both micro- and macrostructural aspects. However, given the ongoing use of an unoptimized carbonation method, the aim was to pinpoint the ideal combination of CO_2 concentration and exposure duration to achieve peak performance.

For FA, compressive strength peaked at 67 hours of curing, followed by a decline, suggesting a delicate balance between early-stage strength gain from carbonation and subsequent microcrack formation. MIBA exhibited a clear positive correlation between higher CO_2 concentrations, longer curing times, and increased compressive strength. Conversely, WGR displayed a distinct behaviour, with a consistent improvement in compressive strength observed with longer curing durations and higher CO_2 concentrations, underscoring its unique responsiveness to the carbonation curing process.

This investigation also explored flexural strength dynamics, providing additional insights. FA specimens exposed to 5% CO_2 demonstrated superior flexural strength, while those subjected to 10% and 25% CO_2 exhibited reduced performance due to extensive $CaCO_3$ formation within the dense microstructure. MIBA showed an increase in flexural strength with higher CO_2 concentrations and longer curing times, consistent with the trends observed in compressive strength. Remarkably, WGR exhibited a significant increase in flexural strength, particularly at 25% CO_2, showcasing a 118.82% improvement compared to uncarbonated WGR specimens.

Synthesizing these findings reveals that the effectiveness of accelerated carbonation curing for alkali-activated binders extends beyond compressive strength to impact flexural strength as well. The intricate interplay between CO_2 concentration, curing duration, and the unique characteristics of each binder contributes to overall performance. While FA showcased early strength gain followed by a decline, MIBA and WGR exhibited sustained improvements in both compressive and flexural strengths.

This nuanced understanding sets the stage for future endeavours, emphasizing the potential for optimizing the carbonation process to enhance the mechanical properties of alkali-activated binders in construction applications. The observed trends lay the foundation for developing tailored approaches to carbonation curing for each binder, recognizing the distinctive microstructural responses.

REFERENCES

[1] R. Nobis, Illustrated History of Cement and Concrete: The Exciting Development of Two Outstanding Building Materials, Rainer Nobis2021.

[2] S. Mindess, J.F. Young, D. Darwin, Concrete, 2nd ed., Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, U.S.A.2003.

[3] IEA, Cement Roadmap, 2009. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement_Roadmap_Foldout_WEB.pdf. (Accessed Novembre 2015).

[4] R. Pierrehumbert, There is no Plan B for dealing with the climate crisis, Bull. At. Sci. 75(5) (2019) 215-221.

[5] H. Mikulčić, M. Vujanović, D.K. Fidaros, P. Priesching, I. Minić, R. Tatschl, N. Duić, G. Stefanović, The application of CFD modelling to support the reduction of CO_2 emissions in cement industry, Energy 45(1) (2012) 464-473.

[6] W. Ashraf, Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities, Constr. Build. Mater., Elsevier Ltd, 2016, pp. 558-570.

[7] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41(12) (2011) 1244-1256.

[8] M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, Cem. Concr. Res. 78 (2015) 71-80.

[9] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, S.-H. Tae, Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO_2 emissions from concrete, J. Clean. Prod. 103 (2015) 774-783.

[10] J.L. Provis, A. Palomo, C.J. Shi, Advances in understanding alkali-activated materials, Cem. Concr. Res. 78 (2015) 110-125.

[11] J.L. Provis, Alkali-activated materials, Cem. Concr. Res. 114 (2018) 40-48.

[12] G.S. Ryu, Y.B. Lee, K.T. Koh, Y.S. Chung, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, Constr. Build. Mater. 47 (2013) 409-418.

[13] N.K. Lee, H.K. Lee, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, Constr. Build. Mater. 47 (2013) 1201-1209.

[14] M. Chi, R. Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, Constr. Build. Mater. 40 (2013) 291-298.

[15] X. Gao, Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends, Constr. Build. Mater. 80 (2015) 105-115.

[16] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan, J.S.J. van Deventer, Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, Cem. Concr. Compos. 45 (2014) 125-135.

[17] S. Casanova, R.V. Silva, J. de Brito, M.F.C. Pereira, Mortars with alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash and fine recycled aggregates, J. Clean. Prod. 289 (2021) 125707.

[18] D. Suescum-Morales, M. Bravo, R.V. Silva, J.R. Jiménez, J.M. Fernandez-Rodriguez, J. de Brito, Effect of reactive magnesium oxide in alkali-activated fly ash mortars exposed to accelerated CO_2 curing, Constr. Build. Mater. 342 (2022).

[19] R. Kurda, R.V. Silva, J. de Brito, Incorporation of Alkali-Activated Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash in Mortar and Concrete: A Critical Review, Materials 13(15) (2020) 3428.

[20] G. Lamaa, D. Suescum-Morales, A.P.C. Duarte, R.V. Silva, J. de Brito, Optimising the Performance of CO_2-Cured Alkali-Activated Aluminosilicate Industrial By-Products as Precursors, Materials (Basel, Switzerland) 16(5) (2023).

[21] D. Kassim, G. Lamaa, R.V. Silva, J. de Brito, Performance Enhancement of Alkali-Activated Electric Arc Furnace Slag Mortars through an Accelerated CO_2 Curing Process, Applied Sciences 12(3) (2022).

[22] M. Nedeljković, Y. Zuo, K. Arbi, G. Ye, Carbonation Resistance of Alkali-Activated Slag Under Natural and Accelerated Conditions, Journal of Sustainable Metallurgy 4(1) (2018) 33-49.

[23] R. Carvalho, R.V. Silva, J. de Brito, M.F.C. Pereira, Alkali activation of bottom ash from municipal solid waste incineration: Optimization of $NaOH^-$ and Na_2SiO_3-based activators, J. Clean. Prod. 291 (2021).

[24] G. Lamaa, A.P.C. Duarte, R.V. Silva, J. de Brito, Carbonation of Alkali-Activated Materials: A Review, Materials (Basel, Switzerland) 16(8) (2023).

[25] G. Lamaa, D. Kassim, B.A. Silva, A.P.C. Duarte, J.d. Brito, R.V. Silva, Utilization of Aluminosilicate Industrial Wastes as Precursors in CO_2-Cured Alkali-Activated Precast Concrete Pavement Blocks, Construction Materials 4(2) (2024) 353-381.

[26] EN-196-1, Methods of testing cement—Part 1: Determination of strength. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium, 2005, p. 36.

[27] EN-1015-11, Methods of test for mortar for masonry—Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium, 1999, p. 12.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM BETÕES E ARGAMASSAS

Stéphanie Rocha[a]; Guilherme Ascensão[b]; Lino Maia[a]

[a]CONSTRUCT-LABEST—Laboratório de Tecnologia e Comportamento Estrutural do Betão, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal, up202010607@g.uporto.pt

[b]RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal, guilhermeascensao@ua.pt

RESUMO

A elevada produção e o descarte ineficaz de resíduos de construção e demolição (RCDs) pressiona a indústria da construção civil a aplicá-los como matéria-prima alternativa na fabricação de materiais de construção inovadores. Uma das dificuldades na valorização de RCDs é a sua enorme variabilidade, necessitando de estudos contínuos sobre os materiais seus constituintes e as suas possíveis aplicações, promovendo condições de uso de acordo com as especificações vigentes. Neste trabalho pretende-se analisar diferentes estratégias de valorização de RCDs, analisando-se o ciclo de vida das diferentes soluções e os constrangimentos à sua efetiva implementação, procurando assim identificar oportunidades para aumentar a economia circular na construção. Em Portugal, a especificação LNEC E471-2009 permite apenas a utilização de agregados reciclados grossos em betão. Contudo, estudos recentes indicam que frações finas podem também ser utilizadas na produção de betão. No processamento e britagem de RCDs é ainda gerada uma fração ultrafina ou pó de RCD, normalmente descartada em aterros. O potencial de valorização deste resíduo na produção de betão parece ser limitado devido à sua granulometria e elevada capacidade de absorção de água. No entanto, algumas investigações preliminares sugerem potencialidades na aplicação desta fração na produção de argamassas alcali-ativadas.

Palavras-chave: Agregado Reciclado, Avaliaçãodo Ciclo de Vida, Economia Circular, Resíduos de Construção e Demolição.

1 INTRODUÇÃO

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pelas Nações Unidas visam garantir um equilíbrio sustentável da sociedade a nível económico, social e ambiental até 2030 (Unidas, 2022). Alinhado com os ODS, o Pacto Ecológico Europeu tem como meta tornar a Europa o primeiro continente com impacto ambiental neutro no que tange à emissão de gases com efeito estufa até 2050. O objetivo inicial é reduzir 55% das emissões de gases até 2030, tendo como referência dados de 1990. Para atingir as metas ambientais definidas, a Comissão Europeia pretende redefinir o seu modelo de desenvolvimento em torno da inovação tecnológica, investimento sustentável e empregos verdes, antecipando benefícios significativos para a saúde e bem estar dos cidadãos europeus (Comissão Europeia, 2021).

A nível global, a urbanização acelerada dificulta o cumprimento dos ODS, pois comporta elevado consumo de materiais de construção e produção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (Zhang *et al*. 2023). Devido às suas inúmeras vantagens técnicas, os materiais cimentícios, sobretudo betão e argamassas, são os principais produtos utilizados no desenvolvimento urbano e na construção de infraestruturas. Embora as suas vantagens técnicas sejam indiscutíveis, os impactos ambientais causados durante o ciclo de vida dos materiais cimentícios é elevado, incluindo a extração de matéria -prima e o consumo de recursos naturais, as emissões de carbono incorporadas durante o processo de manufatura, e o descarte dos resíduos no fim da vida (Villagrán-Zaccardi *et al.* 2022; Worrell *et al*., 2001). Em 2021, a produção de cimento Portland cresceu 4400 milhões de toneladas a nível mundial, sendo a China responsável por metade do aumento da produção (Sahoo *et al.* 2022).

É, portanto, imperativo reduzir o impacto ambiental do sector da construção respondendo simultaneamente à crescente necessidade de urbanização a nível mundial. Nas últimas décadas, a comunidade académica e os agentes industriais do sector têm procurado desenvolver ligantes e agregados alternativos mais sustentáveis e otimizar o perfil ambiental de betões e argamassas. Nesse sentido, a valorização de RCDs quer como agregado, filler ou material cimentício suplementar, tem sido investigada em materiais de construção (H. Zhang, Zhang, Tang, *et al.*, 2023).

À escala global, utilização de RCDs como agregados finos e grossos tem sido extensamente investigada com diferentes países a permitir o seu uso, estabelecendo limites de incorporação através de regulamentações e normas. A especificação portuguesa LNEC L 471 (LNEC 2009) estabelece a utilização de agregados grossos de RCDs apenas em betões, enquanto a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2021) permite a utilização de agregados reciclados finos e grossos de RCDs. Além de permitir a utilização de frações finas e o uso de agregados reciclados grossos para a produção de betão estrutural com resistência até 20 MPa, a atual versão da norma brasileira flexibiliza os requisitos para ambientes de classe de agressividade I e II em obras correntes.

Embora a literatura, regulamentações e normas existentes abordem principalmente as frações grossas e finas, existe uma terceira fração de RCDs ultrafina (<150 µm) menos explorada e muitas vezes destinada a aterros sanitários. Durante o processo de britagem de RCDs para obtenção de agregados grossos e finos, estima-se que entre 20 a 30% da massa do produto final seja composto por esta fração (Tang *et al.* 2020). A deposição em aterro deste resíduo ultrafino diminui a capacidade dos aterros existentes, envolve custos operacionais que desincentivam o processamento e a valorização de RCDs, e comporta riscos para a qualidade do ar e saúde pública. A valorização da fração ultrafina de RCD em materiais de construção reduzirá os impactos ambientais associados à gestão deste resíduo assim como contribuirá para descarbonizar a indústria cimenteira.

O presente estudo tem como objetivo realizar a revisão de literatura dos trabalhos realizados nos últimos 10 anos reportando a utilização de agregados finos ou ultrafinos de RCDs em materiais de construção de base cimentícia, analisando os materiais e produtos desenvolvidos numa perspetiva de economia circular e sustentabilidade.

2 DADOS E MÉTODOS

Por se tratar de um trabalho de revisão bibliográfica, foi necessário estruturar a metodologia em oito etapas distintas de forma a atingir os objetivos propostos por este trabalho (Figura 1).

Figura 1 - Etapas da metodologia aplicada

A primeira etapa da metodologia deste trabalho consistiu em definir a base de dados para a pesquisa das publicações e os termos aplicados nos campos de busca. A plataforma selecionada foi a *Science Direct* com base na maior abrangência do material científico disponível e na existência de várias ferramentas bibliométricas que permitem investigações aprofundadas. As palavras-chaves foram selecionadas de forma a abranger de forma compreensiva o tema abordado, como o tipo de material, no caso o agregado fino ou ultrafino, utilizando os termos *"filler"*, "*fine*" e "*ultrafine*"; a refletir a classificação de resíduo frequentemente atribuída às frações finas e ultrafinas de RCDs, aplicando os termos "*waste*", *"cdw"*, "*residue*" e "*by-product*"; a definir o tipo de produto, no caso argamassas, utilizando o termo "*mortar*"; e aspetos de sustentabilidade, incluindo termos como "*circular economy*", "*lca*", "*sustainability*" e "*life cycle*". De forma sumária, a definição destas palavras-chaves visou correlacionar os seguintes aspetos: material, resíduo, produto e sustentabilidade. Na Tabela *1* apresenta-se as palavras-chaves e operadores booleanos utilizados, e a quantidade de publicações encontradas.

Refira-se que as palavras-chave definidas na pesquisa 2, 3, 4 e 5 estão compreendidas no item 6 (*"circular economy" or "lca" or "sustainability" or "life cycle"*) não sendo, por isso, a quantidade de publicações reportadas cumulativa. A separação das palavras-chave permitiu verificar a quantidade de publicações encontradas com apenas uma única palavra-chave relacionada com sustentabilidade. Numa segunda e terceira fase de pesquisa, foram definidas apenas publicações que consistissem em artigos de revisão e de pesquisa; e removidas publicações duplicadas. Até esta fase de seleção foram identificados 64 artigos de revisão e 164 artigos de pesquisa, totalizando 228 publicações.

Tabela 1 - Palavras-chave utilizadas na pesquisa bibliográfica realizada na plataforma Science Direct

Pesquisa	Termos ou palavras-chave	Quantidade de publicações
1	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "waste" or "cdw" or "residue" or "by-product" and "mortar"*	156
2	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "waste" or "cdw" or "residue" or "by-product" and "mortar" and "circular economy"*	65
3	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "waste" or "cdw" or "residue" or "by-product" and "mortar" and "lca"*	52
4	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "waste" or "cdw" or "residue" or "by-product" and "mortar" and "sustainability"*	139
5	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "waste" or "cdw" or "residue" or "by-product" and "mortar" and "life cycle"*	79
6	*"filler" OR "fine" OR "ultrafine" and "construction and demolition waste" and "MORTAR" and "circular economy" or "lca" or "sustainability" or "life cycle"*	162

Na quarta, quinta e sexta etapa de seleção foram avaliados os seguintes critérios: (i) quantidade de artigos publicados por ano, considerando um intervalo de 10 anos, entre o início de 2014 e maio de 2024; (ii) quantidade de artigos por país e a sua distribuição continental; e, (iii) quantidade de artigos publicados por revista. Na sétima fase de análise, foi utilizado o software *VOSViewer* para analisar a existência de coocorrências de palavras-chave nos artigos selecionados na base de dados. Esta fase de análise possibilitou criar mapas de visualização de redes bibliométricas que permitem relacionar os termos aplicados e as suas conexões.

Por último, foram examinados 228 resumos das publicações com objetivo de identificar os principais assuntos abordados. Nesta fase, foram excluídos 64 artigos, pois não contemplavam alguma das vertentes fundamentais deste trabalho, seja características do material, produto, resíduo ou a avaliação da sustentabilidade da solução de valorização. Após a exclusão desses artigos, foram identificados e analisados em detalhe os principais trabalhos realizados em cada uma das vertentes comtempladas, incluindo o tipo de material para reuso ou reciclagem; função do material; aspetos de sustentabilidade numa perspetiva de economia circular (sustentabilidade ambiental, saúde humana, viabilidade económica, gestão de resíduos, eficiência energética, redução de carbono, avaliação do ciclo de vida e políticas públicas); produto (betão, argamassa, solo, pavimentos, blocos, entre outros); e propriedades físicas, químicas, mecânicas, durabilidade e microestrutura dos materiais.

3 RESULTADOS

3.1 CARATERIZAÇÃO DAS PUBLICAÇÕES

A Figura *2* apresenta a distribuição temporal das 228 publicações selecionadas, considerando artigos de revisão e de pesquisa, publicados nos últimos 10 anos. Verifica-se um crescimento considerável do número de publicações referente à valorização de resíduos de construção e demolição e economia circular, principalmente a partir do ano de 2020, comprovando a relevância e atualidade do tema e o crescente interesse da comunidade científica. É importante enfatizar que no ano de 2024 foram consideradas apenas publicações realizadas até maio, pressupondo-se que o número de publicações possa ultrapassar as realizadas em 2023 até ao término do ano vigente.

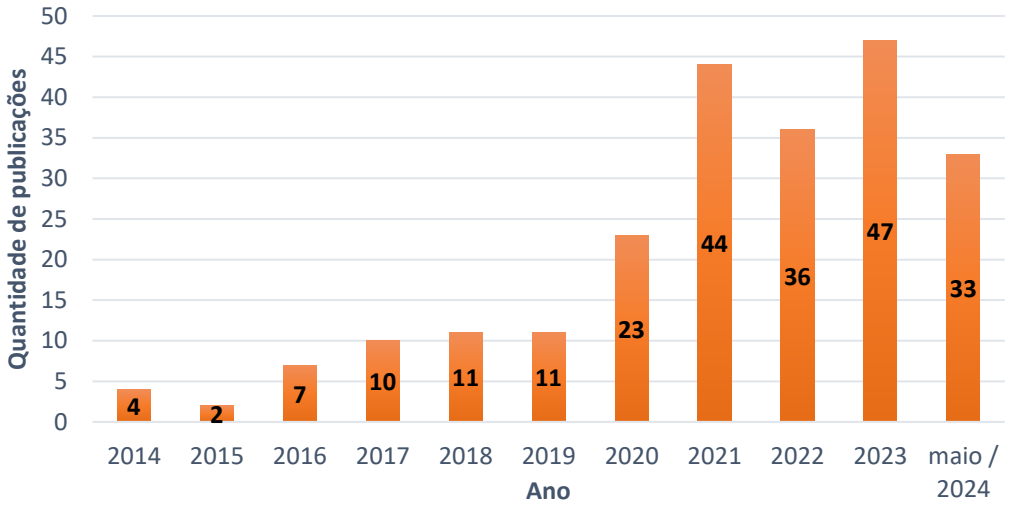


Figura 2 - Distribuição das publicações no intervalo de 10 anos

No que respeita à distribuição geográfica das publicações, considerado o país de origem do primeiro autor de cada um dos trabalhos, verifica-se que as publicações selecionadas estão distribuídas por 44 países, localizados nos cinco continentes. O maior número de artigos publicados verificou-se em Espanha, com 31 publicações; seguida da China (24 publicações), Índia (21 publicações), Brasil (18 publicações), Itália (17 publicações), Portugal (12 publicações), Austrália (10 publicações) e, Colômbia e Bélgica (8 publicações cada). Destaca-se o elevado número de trabalhos de autores Chineses e Indianos, oriundos dos dois países com as duas maiores populações do mundo, e entre os três países com maior produção de RCD a nível mundial. O crescente interesse de autores Europeus, Indianos e Chineses espelha a necessidade de novas soluções de valorização para as frações finas e ultrafinas de RCDs nestas geografias. A China, por exemplo, adotou uma política similar ao Pacto Ecológico Europeu, pretendendo neutralizar as emissão de carbono até 2060, onde o sector da construção terá um papel central (Wang *et al.* 2021). De forma análoga, a proliferação de publicações de origem europeia parece refletir a magnitude deste problema ambiental no espaço europeu, onde os RCDs representam cerca de 40% dos resíduos gerados na União Europeia e onde medidas legislativas foram recentemente tomadas para garantir a gestão ambientalmente correta destes resíduos e para estimular a adoção de modelos económicos circulares (Garcia *et al.*, 2024).

Quanto às revistas onde os trabalhos são publicados, o maior número de publicações foi encontrado nas revistas *Journal of Cleaner Production* (51 publicações), *Construction and Building Materials* (48 publicações), *Journal of Building Engineering* (27 publicações) e, *Resources, Conservation and Recycling* (16 publicações).

3.2 COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE E TERMOS

Para criação de mapa e análise de coocorrências foi utilizado o software *VOSviewer* e considerados termos com um número mínimo de cinco ocorrências. Com esse critério de exclusão definido, das 947 palavras-chave encontradas nos 228 artigos apenas 41 foram selecionadas para criação do mapa. Destacam-se as palavras-chave *"circular economy", "sustainability", "life cycle assessment"* e *"construction and demolition waste"* que aparecem referidas como palavra-chave 58, 35, 44, e 41 vezes, respetivamente. A Figura 3 apresenta o mapa de coocorrência e interconexões, sendo identificáveis seis *clusters* conforme a afinidade entre termos. A análise dos *clusters* revela um panorama abrangente das áreas de investigação emergentes relacionadas à gestão sustentável dos

resíduos de construção e demolição (RCD). Cada cluster identificado oferece indicações relevantes sobre diferentes aspetos dessa temática complexa.

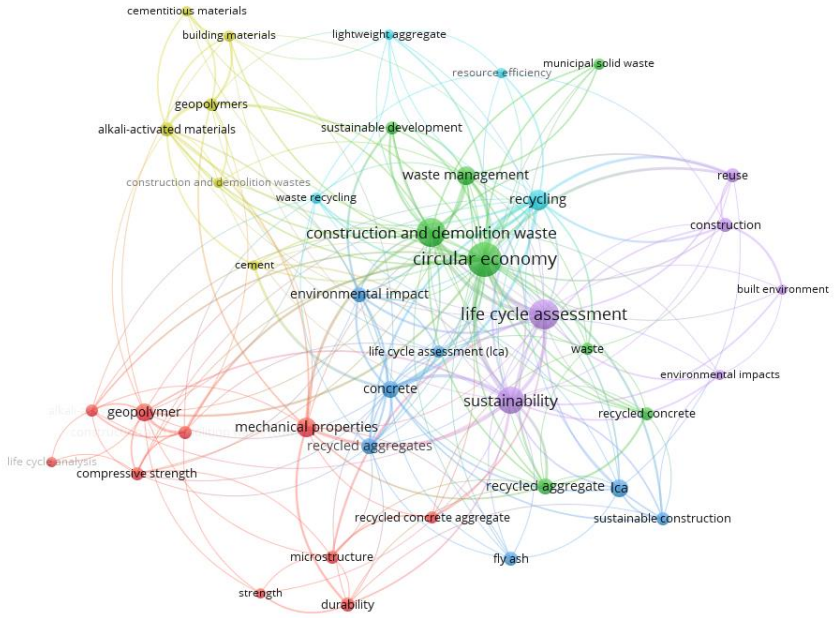


Figura 3 - Mapa de coocorrência de palavras-chave das publicações selecionadas.

O *cluster* identificado com a cor vermelha representa 10 palavras-chave, referentes sobretudo as propriedades fisico-químicas, mecânicas e de durabilidade dos materiais. Os principais termos citados foram "*mechanical properties", "geopolymer*" e *"durability"* com 19, 16 e 10 ocorrências. Destacam-se também com 8 ocorrências os termos "compressive strength", "*construction and demolition waste (cdw)"* e "*microstructure*". As palavras-chave "*alkali-activation*" e "*recycled concrete aggregate*" possuem 7 repetições; e, "*recycled concrete aggregate*" e "*strength*"com 5 ocorrências. Estas palavras-chave indicam publicações onde a valorização de frações fina e ultrafinas de RCD foi explorada em materiais geopoliméricos destacando-se a análise das propriedades físico-químicas, mecânicas e de durabilidade de materiais geopoliméricos contendo RCDs.

O *cluster* identificado com a cor verde, possui 8 itens principais, relacionados com a gestão sustentável de resíduos. As palavras-chave *"circular economy"* e *"construction and demolition waste"* são as mais citadas com 58 e 41 ocorrências respectivamente e possuem o maior número de ligações no mapa. Os termos "*waste management*" e *"Recycled aggregate"* com 17 e 13 ocorrências também são significativos com termos como *"recycled concrete"*,"sustainable *development"* e, *"waste"* e *"municipal solid waste"* serem menos relevantes com 8, 7 e 6 ocorrências, respetivamente. Esse *cluster* evidencia um foco forte na gestão sustentável de resíduos, com destaque para a economia circular e práticas eficientes de gestão de RCD, essenciais para reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade no setor da construção.

O *cluster* identificado com a cor azul congrega 7 palavras-chave e relaciona impactos ambientais e avaliação do ciclo de vida com a produção de betão. Os termos mais citados são "*lca*", "*concrete*", *"recycled aggregates*", "*environmental impact"* e *"fly ash"* com 15, 14, 12, 11 e 10 ocorrências, respectivamente. As palavras-chave *"sustainable construction"* e *"life cycle assessment (lca)"* reforçam o ênfase na produção de betão sustentável com 8 e 7 repetições. Percebe-se a importância dos impactos ambientais e da avaliação do ciclo de vida na produção de betão, sublinhando a importância de avaliações de ACV rigorosas na promoção prática de construção mais sustentáveis.

O cluster identificado com a cor amarela apresenta 6 palavras-chave e demonstra a relação entre tipos de ligantes (de base cimentícia e geopolimérica) e a valorização de resíduos de construção e demolição. Constata-se as seguintes ocorrências: *"alkali-activated materials"*, "*geopolymers"* e "*building materials*" com 10, 8 e 6 ocorrências, respetivamente. A presença de um número significativo de termos relativos a materiais alcali-ativados demostra o potencial desta via de valorização para as diferentes frações de RCD.

O *cluster* 5 identificado com cor roxa contabiliza 6 palavras-chave relacionando a construção sustentável com os impactos ambientais e a avaliação do ciclo de vida, sem um número de conexões significativas a materiais e produtos ou às suas propriedades. As palavras-chave "*life cycle assessment*" e "*sustainability*" são extremamente relevantes neste cluster, com 44 e 35 ocorrências, respetivamente. Termos como "construction" e "reuse" com 9 ocorrências, "built environment" e "*environmental impacts*" com 5 repetições revelaram ser menos significativos.

O *cluster* identificado com cor azul-clara, possui apenas 4 palavras-chave, sendo o único conjunto de afinidades que aborda termos referentes a agregados e a sua relação com a eficiência no uso de recursos e promoção de práticas construtivas responsáveis e sustentáveis. A palavra "*recycling*" possui 21 ocorrências, seguida do termo "*waste recycling*" com 6 repetições e, "*lightweight aggregate*" *e "resource efficiency*", com 5 ocorrências cada.

Em conjunto, esses clusters oferecem uma visão abrangente das tendências atuais e das áreas de investigação emergentes no campo da valorização de RCD, e indicam um caminho promissor para práticas mais sustentáveis e eficientes na indústria da construção.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ESTRATÉGIAS DE VALORIZAÇÃO DOS RCDS

A Economia Circular procura a otimizar a gestão de recursos sendo a valorização de resíduos objeto de intensa investigação (Çimen, 2021). A valorização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), aliada a estratégias de redução da produção, e reutilização, reciclagem e recuperação de elementos construtivos e materiais de construção é crucial para a implementação de práticas de construção circular (Ossio *et al*. 2023).

Soto-Paz *et al.* (2023) investigaram a produção de RCDs e diferenças nas estratégias de valorização entre países emergentes e desenvolvidos. Verificou-se que os países emergentes produzem quantidades significativamente maiores de resíduos, mas que são os países desenvolvidos que mais investem no desenvolvimento de novas estratégias de valorização. Nos países desenvolvidos, há um foco concentrado em estudos sobre perspetivas económicas, impacto ambiental e desenvolvimento tecnológico, especialmente no âmbito da reciclagem. Esses países também possuem um sistema estruturado de gestão de RCDs, desde a fase de conceção até o fim de sua vida útil. Por outro lado, nos países emergentes, as estratégias de gestão estão num estágio inicial de desenvolvimento, limitando-se frequentemente ao abandono ou à eliminação final dos RCDs (Cong & Cheng 2021; J. Liu *et al*. 2023; X. Liu *et al.* 2024; Song *et al*. 2022; Wu *et al.* 2019; H. Zhang, Zhang, Tang, *et al.* 2023; Zhao *et al*. 2024).

A investigação conduzida por Gálvez-Martos *et al.* (2018) abordou as principais práticas de gestão de RCD na Europa. Foram identificadas as melhores práticas para reduzir o impacto ambiental e melhorar a eficiência dos recursos, desde a fase de geração e transporte até a qualidade dos materiais secundários, além do compromisso com a reutilização e reciclagem. Apesar das diversas tecnologias

disponíveis para otimizar o tratamento de resíduos e desenvolver materiais de construção alternativos, ainda persiste uma atitude conservadora no setor da construção e no seu enquadramento normativo.

Para aumentar a taxa de valorização de RCDs é essencial reciclar não apenas agregados grossos, mas também as frações finas e o pó de RCD. A reutilização de todos os fluxos de resíduos é importante não só do ponto de vista ambiental como também trará benefícios económicos aumentando a competitividade de operações de processamento de RCDs. No entanto, verifica-se pela análise da bibliografia, que existem ainda dificuldades na implementação de tecnologias de valorização de RCDs. A qualidade de agregado de betão reciclado grosso pode ser comprometida pela existência de argamassa aderida. As propriedades do material granular podem ser melhoradas apesar da consequente produção de maiores volumes de finos. O uso de agregados reciclado fino de betão ainda é uma questão pouco definida devido à diversidade de metodologias para determinar a capacidade de absorção de água, bem como a variação dos resultados no desempenho do betão. Para além disso, verifica-se necessidade geral de compensação de água e destaca-se a importância da padronização das metodologias para a referida necessidade de compensação. A utilização de pó de RCD em argamassas e betão é a solução de valorização menos explorada, e requer maiores esforços na aplicação de metodologias para verificar a variabilidade das propriedades. Frequentemente utilizada em menor quantidade para não comprometer o desempenho dos materiais desenvolvidos, essa abordagem pode tornar a gestão menos competitiva (Villagrán-Zaccardi *et al*., 2022).

4.2 PÓ DE RCD CERÂMICO E DE BETÃO

O pó de RCD necessita de tratamento e processamento para poder ser utilizado em argamassas e betões. Um estudo conduzido por H. Zhang, Zhang, Tang, *et al*. (2023) implementou um processo de moagem e calcinação para transformar RCD cerâmico e de betão em pó fino. A moagem gerou pó refinado, enquanto a calcinação trouxe novas fases ativas. Os autores reportam que o processo de moagem permitiu uma taxa de hidratação do cimento superior, melhorando a estrutura porosa das argamassas. Já a calcinação levou a que a hidratação inicial do cimento fosse mais acelerada.

Em outras investigações também foram empregues dois tipos de pós de RCDs, provenientes de betão e cerâmica, como substitutos parciais do cimento em argamassa. As substituições resultaram em uma hidratação mais rápida nas idades iniciais, embora com reatividade pozolânica limitada. Taxas de substituições inferiores a 20% melhoraram a fluidez da argamassa. Apesar da redução da resistência à compressão, houve um aumento na resistência à flexão, considerando que as dosagens do pó de RCD betão e pó de RCD cerâmico foram inferiores a 10% e 20% respetivamente. Ambos os pós melhoraram o grau de hidratação aos 28 dias, devido aos efeitos de nucleação, além de demonstrarem eficácia na redução de custos e emissões de CO_2, desde que a dosagem não exceda 20% *(H. Zhang, Zhang, He, et al*. 2023)

Brekailo *et al.* (2022) também utilizaram pós de RCD cerâmico e de betão para diminuir o teor de cimento em ecoargamassas. Apesar dos benefícios ambientais, verificou-se aumentos da expansão das argamassas. Os autores também avaliaram o desempenho das argamassas com RCDs quando expostas ao ataque de sulfatos. A introdução de RCDs diminui a capacidade resistente das argamassas ao ataque de sulfatos, sobretudo quando utilizados RCDs de betão.

O pó de RCD proveniente da reciclagem de betão também foi estudado como material cimentício suplementar e comparado com escórias granuladas de alto forno (Martin *et al.*, 2023). Apesar da redução na resistência à compressão em 40% ao substituir aproximadamente 15% do ligante por pó de RCD, a redução das emissões de CO_2 variam de 10% a 25% quando as substituições excedem 30% (Martin *et al*. 2023).

Nedunuri *et al*. (2021) investigou o potencial de carbonatação de frações finas de RCDs provenientes de estruturas de betão demolidas, e valorizadas na produção de blocos de alvenaria. A resistência dos blocos de alvenaria obedeceu às exigências funcionais requeridas e, dependendo da idade do betão do qual foi recolhido o resíduo, as amostras foram capazes de capturar entre 16 a 48% do CO_2 emitido.

Importa salientar os impactos ambientais e na saúde humana associados ao descarte ou utilização de finos de RCDs. Embora os RCDs sejam predominantemente compostos por materiais inertes, uma pequena fração contém substâncias perigosas. Entre as frações de RCD, os resíduos finos apresentam maiores quantidades de contaminantes devido à concentração desses componentes químicos durante o processamento dos RCDs em geral. Os fatores que influenciam esses impactos incluem pH, presença de gesso, material orgânico, exposição atmosférica, infiltração e tamanho da fração. O destino final predominante para esses resíduos continua sendo os aterros gerais, onde é comum a presença de metais pesados como arsênio, cromo, cobre, cádmio e chumbo, bem como gases tóxicos como metano, sulfeto de hidrogénio e vapores de mercúrio, além de retardadores de chama. Portanto, uma pesquisa enfatiza a importância de integrar os RCDs na economia circular para reduzir a quantidade de resíduos, mas destaca a necessidade crucial de minimizar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente na gestão desses materiais. Isso exige práticas seguras de gestão e provisão de resíduos finos, garantindo a segurança (Molla *et al*. 2021).

4.3 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO E BETÃO

A revisão sistemática de Griffiths *et al.* (2023) avaliou os sistemas sociotécnicos, inovações tecnológicas e opções políticas para reduzir as emissões de CO_2 na indústria de cimento e betão, considerando que o ciclo completo desses materiais corresponde a 10% das emissões globais de CO_2. Sob o ponto de vista sociotécnico, destaca-se o papel dos agentes industriais, decisores políticos e reguladores, especialmente no contexto de normas e regulamentações, essenciais para promover o uso de materiais alternativos. Além disso, contratos públicos com a indústria de cimento podem ser uma ferramenta crucial para garantir a disponibilidade de produtos descarbonizados.

Para melhorar a gestão de RCDs, as comunidades políticas e científicas buscam soluções que sejam tanto economicamente viáveis quanto ambientalmente sustentáveis. Tecnologias como classificação, separação, preparação, reprocessamento e gerenciamento do fim de vida são essenciais nesse contexto. Embora sejam promissoras, essas tecnologias dependem de parâmetros como a composição do material, o valor agregado no produto final, a disponibilidade de instalações de reciclagem e as considerações sobre transporte para garantir uma gestão eficiente. Além disso, é crucial considerar também as tecnologias aplicáveis ao fim de vida dos materiais (Jiang *et al*. 2023).

Olsson *et al*. (2024) analisou os critérios utilizados na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) do cimento e betão. Os autores constataram a evidente falta de padronização de critérios, limitações na disponibilidade de dados e a elevada complexidade na avaliação do desempenho dos diferentes materiais. Recomenda-se ações para estabelecer padrões e métodos de avaliação, o aprimoramento das diretrizes de ACV através da criação de bases de dados padronizados e, sobretudo, um contacto mais próximo entre o meio académico e o sector industrial. Estas ações potenciariam a incorporação de matérias primas alternativas em materiais cimentícios, atendendo a requisitos de engenharia e a conformidade.

Resultados semelhantes foram reportados num outro estudo de X. Liu *et al.* (2024) que avaliaram 22 trabalhos referentes à reciclagem de resíduos de betão. Os autores concluíram que a falta de padronização nos critérios de avaliação de desempenho ambiental adotados, dificulta a comparabilidade e a qualidade dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida.

5 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada neste estudo evidencia os seguintes aspetos:

- Verifica-se um aumento significativo do número de publicações nos últimos 10 anos com foco na valorização de RCD, denotando o interesse crescente da comunidade académica e industrial em melhorar os padrões de sustentabilidade do sector da construção, e o impacto das políticas ambientais internacionais que visam promover a redução da exploração de matéria-prima, e o aumento da eficiência na utilização de recurso naturais e na gestão de resíduos.
- A análise dos *clusters* de publicações evidencia elevada diversidade temática no âmbito da gestão sustentável de RCDs. Enquanto alguns *clusters* de publicações examinam sobretudo as propriedades técnicas dos materiais reciclados, outros enfatizam a gestão de resíduos e a melhoraria da sustentabilidade dos processos. Essa diversidade de abordagens é essencial para a criação de práticas abrangentes e eficazes no setor da construção.
- O pó de RCD cerâmico e de betão revela potencial como substituto parcial de cimento em argamassas e betões, destacando-se benefícios na redução de custos e emissões de CO_2. No entanto, desafios como a reatividade pozolânica limitada dos RCDs e a sensibilidade ao ataque de sulfatos precisam ser cuidadosamente avaliados para otimizar seu uso. Integrar esses resíduos na economia circular é essencial para mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde pública, exigindo práticas de gestão seguras e regulamentadas.
- A análise da bibliografia existente revela a complexidade e os desafios enfrentados pela indústria de cimento e betão na redução de emissões de carbono e na melhoria dos seus indicadores de sustentabilidade. As diferentes abordagens adotadas por diferentes autores e países refletem contextos industriais e regulatórios específicos, que influenciam significativamente as metodologias propostas para alcançar metas ambientais. A necessidade de padronização e o aprofundamento das metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida são essenciais para integrar de forma eficaz materiais de construção alternativos e promover práticas sustentáveis no sector da construção.

REFERÊNCIAS

ABNT. (2021). *NBR 15116:2021 - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de Cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios*.

Brekailo, F., Pereira, E., Pereira, E., Farias, M. M., & Medeiros-Junior, R. A. (2022). Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack. *Cleaner Materials*, *3*, 100034. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100034

Çimen, Ö. (2021). Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, *305*, 127180. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127180

Comissão Europeia. (2021). *Pacto Ecológico Europeu*.

Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *8*(3), 283–314. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004

Gálvez-Martos, J.-L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, *136*, 166–178.

Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., & Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *180*, 113291. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113291

J, C. G., D, C., G, F., G, P., F, G., & D, T. (2024). *Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union* (Issue KJ-NA-31-784-EN-N (online)). https://doi.org/10.2760/721895

Jiang, J., Chu, C., Song, L., Gao, X., Huang, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Hou, L., Ju, M., & Cao, Z. (2023). From prospecting to mining: A review of enabling technologies, LCAs, and LCCAs for improved construction and demolition waste management. *Waste Management*, *159*, 12–26. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.017

Liu, J., Li, Y., & Wang, Z. (2023). The potential for carbon reduction in construction waste sorting: A dynamic simulation. *Energy*, *275*, 127477. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127477

Liu, X., Asghari, V., Lam, C.-M., Hsu, S.-C., Xuan, D., Angulo, S. C., John, V. M., Basavaraj, A. S., Gettu, R., Xiao, J., & Poon, C.-S. (2024). Discrepancies in life cycle assessment applied to concrete waste recycling: A structured review. *Journal of Cleaner Production*, *434*, 140155. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140155

LNEC. (2009). LNEC E 471-2009. In *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*.

Martin, C., Manu, E., Hou, P., & Adu-Amankwah, S. (2023). Circular economy, data analytics, and low carbon concreting: A case for managing recycled powder from end-of-life concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *198*, 107197. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107197

Molla, A. S., Tang, P., Sher, W., & Bekele, D. N. (2021). Chemicals of concern in construction and demolition waste fine residues: A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, *299*, 113654. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113654

Nedunuri, A. S. S. S., Mohammed, A. yar, & Muhammad, S. (2021). Carbonation potential of concrete debris fines and its valorisation through mineral carbonation. *Construction and Building Materials*, *310*, 125162. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125162

Olsson, J. A., Miller, S. A., & Kneifel, J. D. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *206*, 107619. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619

Ossio, F., Salinas, C., & Hernández, H. (2023). Circular economy in the built environment: A systematic literature review and definition of the circular construction concept. *Journal of Cleaner Production*, *414*, 137738. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137738

Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher. (2022). Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*, *44*. https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2022.100767

Song, M., Ju, T., Meng, Y., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2022). A review on the applications of microbially induced calcium carbonate precipitation in solid waste treatment and soil remediation. *Chemosphere*, *290*, 133229. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133229

Soto-Paz, J., Arroyo, O., Torres-Guevara, L. E., Parra-Orobio, B. A., & Casallas-Ojeda, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, *78*, 107724. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107724

Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., & Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, *114*, 103807. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103807

Unidas, N. (2022). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*.

Villagrán-Zaccardi, Y. A., Marsh, A. T. M., Sosa, M. E., Zega, C. J., De Belie, N., & Bernal, S. A. (2022). Complete re-utilization of waste concretes–Valorisation pathways and research needs. *Resources, Conservation and Recycling*, *177*, 105955. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105955

Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *171*, 105565. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105565

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, *26*, 303–329. https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ENERGY.26.1.303

Wu, Y., Lu, B., Bai, T., Wang, H., Du, F., Zhang, Y., Cai, L., Jiang, C., & Wang, W. (2019). Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. *Construction and Building Materials*, *224*, 930–949. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112

Zhang, H., Zhang, B., Tang, L., & Zeng, W. (2023). Analysis of two processing techniques applied on powders from recycling of clay bricks and concrete, in terms of efficiency, energy consumption, and cost. *Construction and Building Materials*, *385*, 131517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131517

Zhang, H., Zhang, C., He, B., Yi, S., & Tang, L. (2023). Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO2 emission. *Journal of Building Engineering*, *71*, 106507. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106507

Zhang, K., Qing, Y., Umer, Q., & Asmi, F. (2023). How construction and demolition waste management has addressed sustainable development goals: Exploring academic and industrial trends. *Journal of Environmental Management*, *345*, 118823. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118823

Zhao, W., Hao, J. L., Gong, G., Ma, W., Zuo, J., & Di Sarno, L. (2024). Decarbonizing prefabricated building waste: Scenario simulation of policies in China. *Journal of Cleaner Production*, *458*, 142529. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142529

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS ISOLANTES BIOCOMPÓSITOS PRODUZIDOS A PARTIR DE FIBRAS DE COCO: ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO

Egon Vettorazzi[a]; António Figueiredo[b]; German Vela[b]; Guilherme Ascensão[b]; Romeu Vicente[b]; Mónica Oliveira[c].

[a]UNILA - Federal University of Latin American Integration, Brazil

[b]RISCO - Research Center for Risks and Sustainability in Construction, University of Aveiro (UA), Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

[c]TEMA – Centre for Mechanical Technology and Automation, University of Aveiro (UA), Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro Portugal

RESUMO

A rápida urbanização despoletou o aumento do consumo energético associado aos edifícios, tornando-se num problema mundial no que respeita o aumento das emissões de CO_2. Num cenário global, os edifícios são responsáveis por cerca de um terço do consumo de energia e um quarto das emissões de gases com efeito de estufa. Alguns materiais constituídos à base de fibras naturais têm excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico, podendo ter uma contribuição significativa para a descarbonização do edificado.

A fibra de coco é uma substância natural derivada das cascas dos cocos. A sua disponibilidade aumentou significativamente em resultado da crescente popularidade da água de coco, sobretudo na América Latina e no continente Africano. Estas fibras possuem múltiplas propriedades únicas, destacando-se a excelente resistência à água e a ataques microbiológicos, elevada resistência ao impacto e baixa condutibilidade térmica. Estes atributos tornam as fibras de coco um material muito interessante para utilização em aplicações de isolamento em edifícios.

Este trabalho de investigação apresenta o desenvolvimento de um material biocompósito (com origem vegetal dos agregados e do ligante) especificamente concebido para aplicações de isolamento térmico e acústico em edifícios. Foram desenvolvidas amostras compostas por fibras de coco e alginato de sódio, e foram estudadas formas de otimização geométrica para melhoria do desempenho acústico. Adicionalmente, avaliaram-se as principais propriedades mecânicas dos painéis desenvolvidos.

Os resultados deste trabalho revelaram a possibilidade de produzir painéis a partir da fibra de coco com a função dupla de isolamento térmico e acústico, podendo constituir uma alternativa sustentável às soluções convencionais de isolamento.

Palavras-chave: Painéis de isolamento; Caracterização experimental; Condutibilidade térmica; Absorção sonora; Compósitos de origem vegetal.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta um desafio crescente: conciliar eficiência energética, conforto acústico e sustentabilidade ambiental. Materiais naturais podem reduzir o impacto ambiental e apoiar um setor da construção mais sustentável. Muitos desses materiais estão amplamente disponíveis na natureza, e sua utilização em tais aplicações contribui para a solução do problema de gestão de resíduos. A indústria vem integrando novos materiais naturais para aplicações acústicas e térmicas (Suwan et al., 2020). Esses materiais apresentam-se como alternativa aos tradicionais devido às suas vantagens de sustentabilidade e menor impacto ambiental. Ao contrário dos materiais sintéticos derivados do petróleo, as fibras naturais e resíduos agroindustriais são biodegradáveis, não esgotam recursos naturais não renováveis e podem ser cultivados de forma sustentável (Govindan et al., 2016).

Materiais fibrosos e porosos são comumente utilizados para fins de isolamento térmico e absorção sonora, principalmente para frequências médias e altas. A estrutura desses materiais interage com as ondas sonoras, dissipando sua energia na forma de calor. Isso promove o isolamento acústico aéreo e reduz a reverberação dentro de ambientes permitindo correções acústicas dos mesmos (Venegas et al., 2021). Pesquisas recentes demonstram a viabilidade do uso de fibras naturais em edificações. Um estudo utilizou resíduos agrícolas e agroindustriais para solucionar problemas de isolamento acústico e térmico, desenvolvendo um painel multicamadas feito de caroços de frutas e fibra de coco. Os resultados mostraram um coeficiente médio de absorção sonora superior a 0,5, isolamento acústico superior a 30 dB bem como uma condutibilidade térmica de 0,14 W/(mK) (Segura et al., 2024). Outro estudo, realizado em Marrocos, empregou resíduos de papel e fibras naturais disponíveis na região para o desenvolvimento de painéis que posteriormente foram analisados termicamente e acusticamente. Os resultados indicaram bom desempenho para o desenvolvimento desses materiais locais com as boas propriedades de isolamento acústico e térmico para aplicações em edifícios. As principais vantagens incluem baixo impacto ambiental, baixo custo e competitividade com materiais sintéticos comercializados (Ouakarrouch et al., 2022).

Devido às suas propriedades térmicas e menor impacto ambiental, a aplicação de materiais naturais em componentes construtivos tem-se tornado cada vez mais frequente. Trabalhos de investigação demonstram o potencial desses materiais para melhorar o desempenho térmico, reduzindo a carga de transmissão de calor nas paredes das edificações e, consequentemente, o consumo de energia. Isso pode ser alcançado através da adição de compostos de fibra de coco e outros materiais naturais nas fachadas dos edifícios, proporcionando um conforto térmico interno mais estável, apesar das variações de temperatura externa, proporcionando ainda uma redução do consumo energético (Segura et al., 2024). Desta forma, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização de painéis de isolamento térmico e acústico biocompósitos produzidos a partir de fibra de coco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PRODUÇÃO DO MATERIAL BIOCOMPÓSITO

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi produzida uma solução em painel com o material biocompósito, para análise à resistência mecânica e caracterização das propriedades acústicas e térmicas. A solução foi obtida pela mistura de um aglomerante de origem biológica (alginato de sódio) e fibra de coco.

2.1.1 Matérias primas

A fibra de coco selecionada apresentava elevado teor de humidade. Desta forma, foi submetida a secagem em estufa durante 48 horas a 50°C, obtendo-se uma percentagem de humidade relativa de cerca de 24,6 %. A Figura 1 mostra as fibras antes e depois da secagem.

a) b)

Figura 1 – a) Fibra de coco húmida; b) fibra de coco seca.

O alginato de sódio (C6H7NaO6) é o aglomerante comercial biológico utilizado, na forma de sal. Com uma viscosidade em solução aquosa 350-550 mPas (solução aquosa a 1 %, 20 °C) e um pH: 8,0 (solução aquosa a 1 %). Também foi utilizado sulfato de cálcio (CaSO4) e citrato de sódio (C6H5O7Na3.2H2O).

2.1.2 Preparação do biocompósito

A obtenção dos biocompósitos de fibra de coco e alginato de sódio é ilustrada na Figura 2. Primeiramente, foi misturado o alginato de sódio, sulfato de cálcio e citrato de sódio em seco, obtendo-se a solução aglomerante que posteriormente foi dissolvida. Neste estudo, foi utilizada água destilada como solvente e foi misturada em temperatura ambiente com rotação mecânica contínua variando de 250 a 8000 rpm. A velocidade foi elevada proporcionalmente à densidade da mistura durante 60 minutos, na Figura 2a) é apresentado o aglutinante diluído. Em seguida, o aglutinante é manualmente combinado com as fibras, sendo o resultado da mistura apresentado na Figura 2 b). A mistura foi colocada em moldes retificados por camadas de aproximadamente 1 cm, com prensagem manual. Após o preenchimento total dos moldes os biocompósitos foram colocados em estufa para cura por 72 horas a uma temperatura de 50 °C.

De um total de 9 formulações testadas (com diferentes percentagens de alginato e da relação água e ligante) foi selecionada a seguinte composição: 21,3 % (p/p) de fibras de coco, 2,7 % de alginato de sódio, 0,5 % (p/p) de sulfato de cálcio, 0,1 % (p/p) de citrato de sódio e 75,4 % (p/p) de água destilada. A amostra selecionada teve como princípio a trabalhabilidade da mistura e os resultados dos ensaios mecânicos (não apresentados no presente trabalho).

a) b) c)

Figura 2 – a) Aglutinante diluído; b) mistura de aglutinante com fibra de coco; c) provetes de ensaio.

Desta forma, foi desenvolvido uma placa composta por fibras de coco e alginato de sódio, em que se avaliaram as suas propriedades mecânicas e térmicas e direcionou-se o estudo na otimização da geometria da superfície para maximizar o desempenho acústico, em termos de absorção sonora.

2.2 MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO

2.2.1 Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas dos materiais biocompósitos produzidos foram avaliadas através de ensaios em flexão e em compressão, conforme descrito pela norma (BS EN 1015-11, 1999). Para a realização de ambos, foi utilizada uma máquina universal de ensaios, modelo AG-IC 100 kN, Shimadzu, com anel de carga de 5 kN. Três provetes com dimensões 40x40x160 mm^3 foram testados à flexão e três provetes com dimensões de 40x40x40 mm^3 foram testados à compressão (Figura 3). Note-se que os provetes usados nos ensaios em compressão são resultantes do ensaio de flexão, pelo que uma das faces não se encontra retificada. Conforme indicado anteriormente, todas as amostras foram submetidas a um período de cura de 72 horas em câmara climática a 50 °C antes da realização dos ensaios mecânicos.

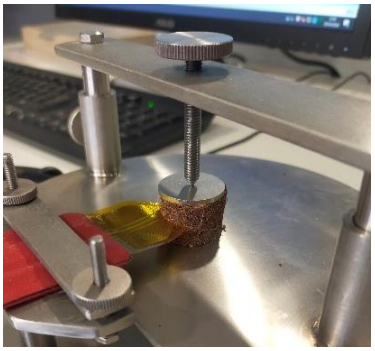
a) b)

Figura 3– Ensaios de caracterização mecânica: a) ensaio de resistência em flexão; b) ensaio de resistência em compressão.

2.2.2 Ensaios térmicos

A condutibilidade térmica do biocompósito foi medida usando o método de fonte de calor plano transiente (TPS), em que foi utilizado o aparelho TPS 2500 S, *HotDisk*, junto com um suporte de amostras e um sensor de Kapton, conforme descrito na norma (ISO 22007-2:2022, 2022). Para o teste, foi preparado um par de amostras, cada uma com um diâmetro de 15 mm e uma espessura de 9 mm. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um período de cura de 72 horas em câmara climática a 50 °C. Em seguida, uma das faces foi polida para garantir perfeita planeza como é apresentado na Figura 4 a). O sensor de Kapton foi colocado entre o par de amostras, de forma que o sensor fique em contacto com as suas faces, além disso duas pastilhas de aço foram colocadas sobre o topo e sobre o fundo das amostras, conforme presente na Figura 4 b).

a)



b)

Figura 4– a) Amostras polidas; b) Porta amostras com sensor de Kapton.

2.2.3 Ensaios acústicos

As propriedades acústicas dos materiais compósitos desenvolvidos foram avaliadas através da determinação da percentagem de absorção acústica e perda de transmissão, conforme descrito nas normas (ISO 10534-2, 2023) e (ASTM E1050, 2019), respetivamente, utilizando um tubo de impedância, modelo ITA219 da Holmarc. As medições foram realizadas na faixa de frequência entre os 100 Hz a 5000 Hz. Amostras circulares com diâmetro de 100 mm foram utilizadas para avaliar as propriedades acústicas dos materiais desenvolvidos na gama de frequências entre os 100 Hz e 1000 Hz, enquanto amostras de menor dimensão (21 mm) foram testadas na gama de frequência entre os 1000 Hz e 5000 Hz conforme a especificação do equipamento. Observa-se na Figura 5a), o equipamento utilizado para os ensaios. A espessura das amostras foi mantida constante em toda a gama de frequências (40 mm), assim como o procedimento de preparação e cura (72 horas em câmara climática a 50 °C). Amostras com diferentes arranjos geométricos superficiais foram produzidas e testadas para avaliar o efeito da alteração da geometria superficial das amostras na absorção acústica do material (Figura 5b)).

a)

b)

Figura 5- a) Equipamento usado nos ensaios acústicos; b) Amostras com diferentes geometrias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESEMPENHO MECÂNICO

Os resultados dos ensaios mecânicos revelaram que a formulação otimizada apresenta resistência à flexão máxima de aproximadamente 1,2 MPa e resistência à compressão de 1,0 MPa para um deslocamento de 4 mm. Da literatura, (Schritt & Pleissner, 2022) avaliaram diferentes compósitos de origem vegetal obtendo resistências à compressão para 10 % de deformação e em flexão em conformidade com os resultados obtidos no presente trabalho. Estes resultados demonstram que amostras compósitas produzidas a partir de fibra de coco podem ser desenvolvidas com propriedades mecânicas adequadas para aplicação em soluções de isolamento acústico. Na Figura 6a são apresentados os resultados referentes ao ensaio de flexão, enquanto na Figura 6b são apresentados os resultados do ensaio de compressão.

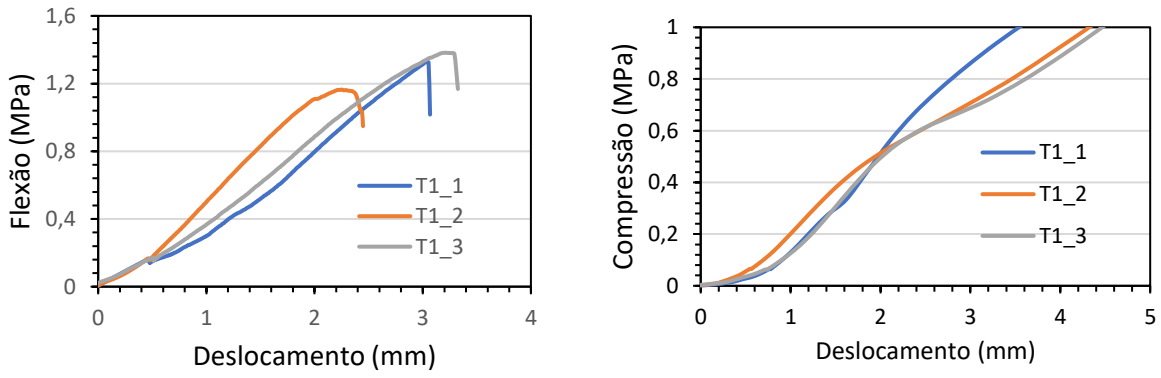


Figura 6 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica: a) ensaio de resistência à flexão; b) ensaios de resistência à compressão.

3.2 DESEMPENHO TÉRMICO

Dos resultados da caracterização térmica, a condutibilidade do biocompósito desenvolvido apresenta um valor de 0,091 ± 0,002 W/(mK). Em comparação com soluções comerciais como lã mineral onde o valor da condutibilidade térmica é de 0,039 W/(mK), o biocompósito apresenta valores de condutibilidade térmica superiores (de aproximadamente o dobro). No entanto, pela análise de trabalhos semelhantes existentes na literatura onde os autores usaram fibras de coco e outros aglutinantes de origem biológica, verifica-se que os resultados de condutibilidade térmica obtidos variaram entre 0,08 e 0,14 W/(mK) (Muthuraj et al., 2019). Desta forma, estima-se que os resultados obtidos neste trabalho poderão ser melhorados através da otimização das formulações e do processo de produção das amostras (ex. níveis de compactação/densidades).

3.3 DESEMPENHO ACÚSTICO

O desempenho acústico da formulação otimizada foi avaliado e comparado com uma solução comercial de lã mineral. As amostras de fibra de coco apresentaram um perfil de absorção acústica significativamente distinto da lã mineral, apresentado taxas de absortância superiores ao material de referência na gama de frequências entre os 400 e os 600 Hz (Figura 7a). Nesta gama de frequências a percentagem de absorção das amostras otimizadas variou aproximadamente entre os 40 e os 70 %,

enquanto a absortância da solução de referência em lã mineral situou-se em torno dos 40 %. Para frequências superiores a 600 Hz, a formulação otimizada apresentou uma capacidade de absorção praticamente constante em torno dos 70 %, que embora bastante significativa, verificou-se ser inferior à amostra referência de lã mineral. No entanto, a perda de transmissão acústica das amostras de fibras de coco foi superior em todo o espectro de frequências (Figura 7b). A influência da geometria superficial das amostras na performance acústica do material foi notória, sobretudo em termos da capacidade de absortância das amostras de fibra de coco onde se verificou um global aumento do coeficiente de absorção em cerca de 20 % para a geometria com pirâmides na superfície da amostra em todo o espectro de frequências analisado. Por sua vez, a perda de transmissão acústica foi ligeiramente reduzida, tendo sido as maiores reduções verificadas em torno dos 1500 Hz e 4000 Hz. Ainda assim as amostras de fibra de coco apresentaram valores de perda de transmissão significativamente superiores à amostra referência de lã mineral.

Considerando as aplicações do sector da construção onde gamas de frequência médias (entre 500 e 1500 Hz) assumem uma importância preponderante, os resultados de absorção acústica e perda de transmissão acústica obtidos sugerem que formulações à base de fibra de coco apresentam potencialidades nesta área de aplicação e poderão constituir uma alternativa sustentável as soluções atualmente existentes no mercado, sendo simultaneamente capazes de contribuir para a descarbonização do sector da construção.

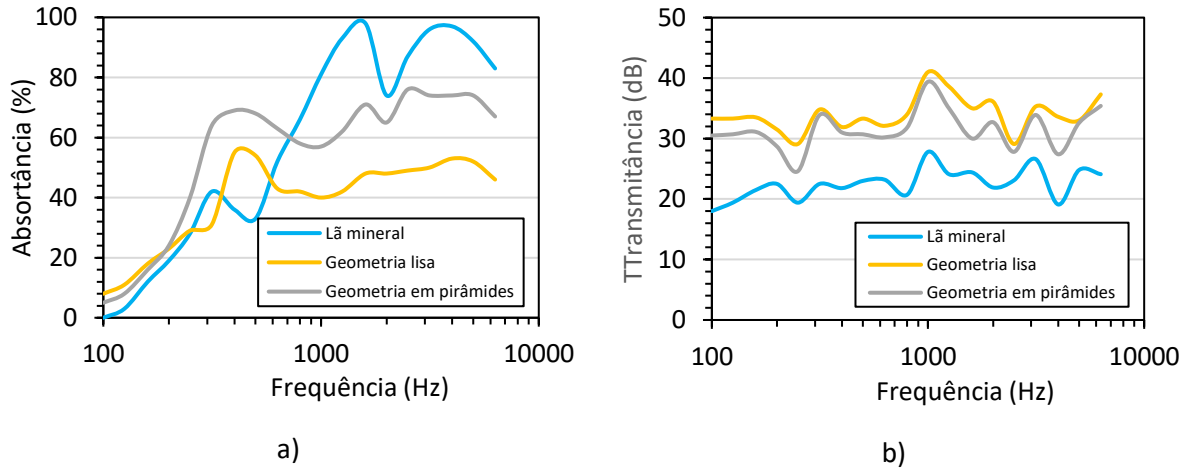


Figura 7 – Comparação da performance acústica entre soluções: a) absorção acústica; b) perda de transmissão sonora.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o estudo do desenvolvimento de uma solução biocompósica, que combina diferentes materiais de origem vegetal como agregados e como ligante. O desenvolvimento da solução teve como premissa o desenvolvimento de um novo material com boas propriedades térmicas e acústicas para aplicações no sector da construção, contribuindo para a descarbonização do mesmo.

Os resultados são resumidos nos seguintes pontos:

- Propriedades mecânicas em termos de resistência em compressão e em flexão com máximos de aproximadamente 1,0 MPa e 1,4 MPa, respetivamente. Desta forma apresentam propriedades mecânicas adequadas para o tipo de aplicação desejadas;

- Condutibilidade térmica de aproximadamente 0,091 W/(mK) demonstrou que os compósitos produzidos apresentam propriedades térmicas muito próximas às dos materiais isolantes térmicos convencionais;
- As propriedades de absorção acústica para frequências baixas revelaram ser superiores aos resultados obtidos numa amostra de lã mineral, tipicamente usada no sector da construção. Destaca-se ainda uma melhoria notável nas propriedades acústicas pela alteração da geometria de uma da superfície das amostras.

Em suma, a solução desenvolvida apresenta um elevado potencial de aplicação no setor da construção, podendo ser uma resposta sustentável alternativa aos materiais isolantes convencionais nomeadamente para aplicações de isolamento térmico em paredes de fachada, ou para aplicações em tetos falsos para isolamento acústico entre diferentes pisos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de investigação foi apoiado pelo Centro de Investigação de Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020].

REFERÊNCIAS

ASTM E1050. (2019). *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*.

BS EN 1015-11. (1999). Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar. In *BSI*.

Govindan, K., Madan Shankar, K., & Kannan, D. (2016). Sustainable material selection for construction industry – A hybrid multi criteria decision making approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 1274–1288. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.07.100

ISO 10534-2. (2023). *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method*.

ISO 22007-2:2022. (2022). *Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method*.

Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., & Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, *135*, 238–245. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.04.053

Ouakarrouch, M., Bousshine, S., Bybi, A., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2022). Acoustic and thermal performances assessment of sustainable insulation panels made from cardboard waste and natural fibers. *Applied Acoustics*, *199*, 109007. https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2022.109007

Schritt, H., & Pleissner, D. (2022). Recycling of organic residues to produce insulation composites: A review. *Cleaner Waste Systems*, *3*, 100023. https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2022.100023

Segura, J., Montava, I., Juliá, E., & Gadea, J. M. (2024). Acoustic and thermal properties of panels made of fruit stones waste with coconut fibre. *Construction and Building Materials*, *426*, 136054. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136054

Suwan, A., Sukhawipat, N., Uthaipan, N., Saetung, A., & Saetung, N. (2020). Some properties of experimental particleboard manufactured from waste bamboo using modified recycled palm oil as adhesive. *Progress in Organic Coatings*, *149*, 105899. https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2020.105899

Venegas, R., Zieliński, T. G., Núñez, G., & Bécot, F. X. (2021). Acoustics of porous composites. *Composites Part B: Engineering*, *220*, 109006. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109006

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA A PRODUÇÃO DE TIJOLOS PRENSADOS

Andréia da Conceição de Faria[a]; Cristopher Antonio Martins de Moura[b,c]; Matheus Henrique Dela Costa Ferreira[c]; Bruna Silva Almada[c]; Maria Teresa Paulino Aguilar[d]; Guilherme Jorge Brigolini Silva[c]

[a]Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, andreiafaria@ufsj.edu.br

[b]Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Unidade II, 78605-091, Barra do Garças, Mato Grosso, Brasil, cristopher.moura@ufmt.br

[c]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, matheus.dela@aluno.ufop.edu.br, bruna.almada@aluno.ufop.edu.br, guilhermebrigolini@ufop.edu.br

[d] Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, Escola de Engenharia, 31270-901, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, teresa@ufmg.br

RESUMO

Os rejeitos de minério de ferro são subprodutos da atividade de mineração, que são posteriormente descartados em barragens de enormes proporções. Tal disposição representa riscos ambientais e socioeconômicos, à exemplo dos desastres ocorridos pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais-Brasil. O presente trabalho busca contribuir com a investigação de estratégias para o aproveitamento de rejeitos de barragem de minério de ferro (RBMF). Para isso, foi conduzida uma caracterização química e mineralógica do RBMF, seguida da produção de protótipos álcali-ativados pelo método *one part* e avaliação da resistência à compressão com diferentes métodos de cura (ambiente e 45°C) e teores de Na_2SiO_3 como ativador (0-10%). Os resultados de resistência revelaram que os traços com adição de 5,0% e 7,5% curados a 45°C obtiveram maior ganho de resistência aos 7 dias. Nesse sentido, considerou-se que tanto o teor ótimo de ativador quanto a cura térmica contribuíram para o ganho de resistência observado. Portanto, este estudo indica que é possível obter matrizes com resistências compatíveis com a produção de tijolos a partir da ativação alcalina do RBMF. Ademais, os resultados oferecem uma contribuição na investigação de estratégias para mitigação dos impactos adversos da deposição em barragens de rejeitos de mineração.

Palavras-chave: Rejeito de barragem de minério de ferro, ativação alcalina, *one part mix*, barragem de Fundão.

1 INTRODUÇÃO

Os rejeitos de barragem de minério de ferro (RBMF) são coprodutos oriundos do beneficiamento do minério de ferro bruto, e corresponde à fração do material extraído da jazida que é comumente despejada em barragens. Estas barragens consistem em megaestruturas compostas por aterramentos sucessivos de camadas de lama de RBMF ao longo do tempo de produção da empresa, que normalmente operam por várias décadas. O Brasil é o país com a segunda maior contribuição para a produção de minério de ferro no mundo, atrás somente da Austrália no *ranking* dos maiores produtores globais (USGS 2023). No ano de 2021, a produção mundial do minério foi de 2.680 Mt e, somente no Brasil, foram produzidas cerca de 431 Mt, o equivalente a 16% do produto total (USGS 2023). Essa quantidade refere-se ao produto beneficiado e concentrado, sendo que a quantidade de RBMF gerado no processamento pode ser duas ou três vezes maior (Long *et al.* 2024). A deposição de volumes tão grandes de RBMF em barragens representa um grande risco tanto para as áreas circunvizinhas, como para todos os municípios e distritos situados à jusante da barragem.

O desastre de Mariana, ocorrido em 5 de novembro de 2015 na barragem de Fundão, situada no estado brasileiro de Minas Gerais, é um exemplo trágico do potencial destrutivo e dos prejuízos causados pelo colapso dessas estruturas. A barragem foi construída utilizando o método de empilhamento à montante, que é considerado o mais barato e de maior risco, utilizado na maioria dos casos de rupturas reportados no mundo (Carmo *et al.* 2017). Após sua ruptura, o dano ambiental devido ao assoreamento do rio Doce pela lama de rejeito causou a contaminação permanente do solo, a destruição quase completa da vegetação ripária e a mortalidade dos animais aquáticos e terrestres que dependiam destes ecossistemas (IBAMA 2015). Além da perda de 19 vidas humanas, os danos socioeconômicos consistiram na interrupção do abastecimento de água da população atingida, prejuízos na produção de energia hidroelétrica e interrupção das demais atividades econômicas que dependem da qualidade da água (ANA 2016). Após o desastre e sua repercussão mundial, diversos pesquisadores direcionaram seus esforços ao propósito de contribuir para a redução da carga de rejeito das barragens através do reaproveitamento deste resíduo.

Vários autores propuseram a incorporação do RBMF com a finalidade de desenvolver materiais de construção alternativos e sustentáveis. As possíveis formas de se incorporar o RBMF na construção civil abrangem aplicações como materiais cimentícios suplementares (Bezerra *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2021; Duarte *et al.* 2022; Zhang *et al*. 2023a; Zhang *et al*. 2023b; Vescovi, Bezerra e Poggiali 2023), *fillers* e agregados (Huang *et al.* 2023; Zhang *et al.* 2023a; Gu *et al.* 2023), precursor para matrizes álcali-ativadas (Ferreira *et al.* 2022; Saldanha *et al.* 2023), matéria-prima para clínquer (Faria *et al.* 2023), base e sub-base de pavimentos (Sá *et al.* 2022; Jing *et al.* 2023), tijolos ecoeficientes (Zhang *et al.* 2021; Mendes *et al.* 2019; Thejas e Hossiney 2022) e pigmentos (Gong *et al.* 2023).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de protótipos de matrizes álcali-ativadas produzidas utilizando-se como precursor o RBMF oriundo da localidade de Gesteira, visando uma potencial aplicação para confeção de tijolos prensados. Para tanto, serão avaliados diferentes teores de ativador e diferentes métodos de cura. O objetivo se insere no contexto de uma proposta de valorização dos resíduos sólidos industriais mediante o aproveitamento destes na produção de materiais destinados à construção civil. Ao mesmo tempo, busca-se uma alternativa mais nobre para o descarte do RBMF e que contemple um risco reduzido de acarretar em danos ambientais e prejuízos socioeconômicos severos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, utilizou-se rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) como precursor para a produção de protótipos álcali-ativados (Figura 1a). O RBMF foi obtido da barragem de Fundão, na comunidade de Gesteira, Minas Gerais-Brasil, após o seu rompimento. O metassilicato de sódio (Na_2SiO_3) foi utilizado como ativador alcalino (Figura 1b), devido ao seu uso recorrente na literatura recente, como observa-se no trabalho de Thejas e Hossiney (2022).

Figura 1 – Precursor de RBMF e ativador alcalino metassilicato de sódio

Inicialmente, o RBMF foi seco em temperatura ambiente até a umidade higroscópica e peneirado em peneira de abertura 4,75mm, sendo utilizada somente a fração passante (Figura 2a). Em seguida, o material foi caracterizado química e mineralogicamente por fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX), respectivamente. A FRX foi realizada no equipamento PANalytical Epsilon3x. A DRX foi realizada equipamento D2 Phaser da Bruker, utilizando 30kV e 10mA com radiação de Cu Kα, 2θ de 5°-75°, passo de 0,02° e 1s por passo. A identificação das fases realizada no programa DIFFRAC.EVA 5.0 e quantificação das fases foi realizada pelo TOPAS 5.0 (*Bruker*), com utilização do banco de dados do projeto acadêmico *Crystallography Open Database* (COD) (Vaitkus *et al.* 2023; Merkys *et al.* 2023; Vaitkus *et al*. 2021; Quirós *et al*. 2018; Merkys *et al*. 2016; Gražulis *et al*. 2015; Gražulis *et al*. 2012; Gražulis *et al*. 2009; Downs e Hall-Wallace 2003) e refinamento pelo método de Rietveld (Rietveld 1969).

Para a produção dos protótipos alcali-ativados, foram utilizados diferentes teores de ativador, visando alcançar o ponto ótimo de resistência à compressão. O Quadro 1 apresenta as misturas adotadas para fabricação de protótipos. A relação água/sólidos foi definida a partir de resultados do ensaio de compactação, conforme NBR 7182 (ABNT 2016), e inspeção visual da consistência da mistura durante o processo de moldagem, resultando em 14% da massa total de sólidos.

Quadro 1 – Proporções de mistura dos protótipos ensaiados

Precursor – RBMF (%)	**Ativador – Na_2SiO_3 (%)**	**Relação água/sólidos**
100	0	0,14
100	2,5	0,14
100	5,0	0,14
100	7,5	0,14
100	10,0	0,14

O método *one part mix,* conforme Luukkonen *et al.* (2018), foi utilizado para a produção dos protótipos alcali-ativados. Assim, o RBMF e o metassilicato de sódio foram previamente homogeneizados e, em seguida, misturados com água em uma argamassadeira elétrica, em dois ciclos de 10 min. Após a mistura, o material foi transferido para moldes de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 2b) e compactado com aplicação de carga de 15kN em prensa manual, seguida da extração do corpo-de-prova (Figura 2c).

Figura 2 – (a) Peneiramento e homogeneização; (b) Moldagem dos corpos-de-prova 5 cm x 10 cm; (c) Extração dos corpos-de-prova.

Para cada teor de metassilicato de sódio utilizado, foram avaliadas duas condições de cura: cura em temperatura ambiente e cura com temperatura controlada a 45 °C. As propriedades obtidas no presente trabalho referem-se ao período curado por 7 dias, como uma etapa de avaliação inicial dos protótipos, visando futura produção de tijolos. Para avaliação de propriedades de interesse tecnológico, optou-se pela determinação da resistência à compressão uniaxial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO RBMF

O Quadro 2 apresenta o resultado da análise química do RBMF por meio de fluorescência de raios X.

Quadro 2 – Resultado da análise FRX do RBMF

Óxido	**SiO_2**	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**K_2O**	**CaO**	**TiO_2**	**Outros**	**PF**
Teor (%)	56,95	21,70	14,12	0,51	0,25	0,41	0,36	5,70

Destaca-se que o teor de SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 totalizam cerca de 92,77% do RBMF. Os resultados de composição química corroboram com os relatados em outros trabalhos que caracterizaram amostras de RBMF oriundas de outras áreas atingidas pela ruptura da barragem de Fundão, como é possível observar nos trabalhos de Bessa *et al.* (2024) e Silva e Paiva (2020). É importante salientar que estes trabalhos utilizaram amostras de RBMF coletadas no município de Barra Longa - Minas Gerais, que é uma comunidade vizinha situada à jusante do ponto onde foi coletado o RBMF utilizado neste estudo.

A Figura 3 apresenta o resultado da análise mineralógica do RBMF obtido por difração de raios X.

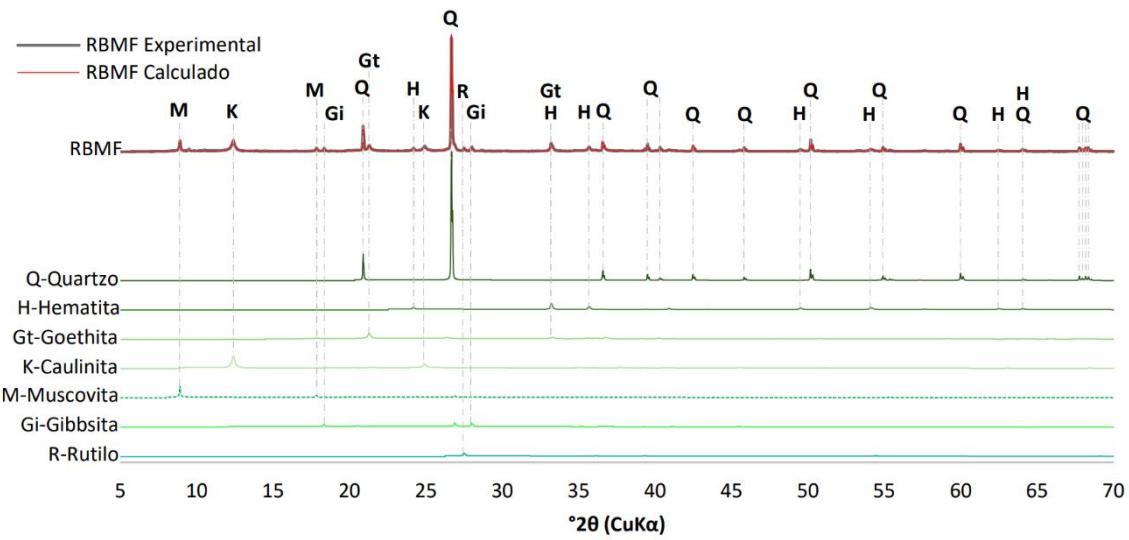


Figura 3 – Resultado da análise por DRX do RBMF

A análise qualitativa do difratograma do RBMF revelou a presença dos minerais quartzo – SiO_2 (COD 5000035[1]; Will *et al*. 1988), caulinita – $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (COD 9009230[2]; Bish e Von Dreele 1989), hematita – Fe_2O_3 (COD 1011240[3]; Pauling e Hendricks 1925), goethita –α-FeO(OH) (COD 9016406[4]; Hazemann *et al*. 1991), muscovita $2M_1$ – $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(F,OH)_2$ (COD 9004409[5]; Liang e Hawthorne 1996), gibbsita – $Al(OH)_3$ (COD ID 1011081[6]; Megaw 1934) e rutilo – TiO_2 (COD ID 9004141[7]; Meagher e Lager 1979).

Os resultados da análise quantitativa pelo refinamento de Rietveld foram resumidos na Figura 4.

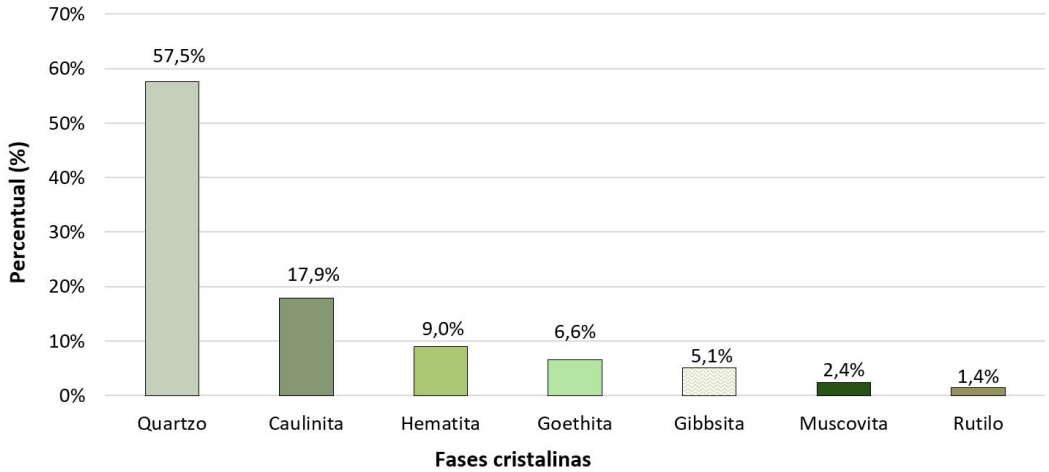


Figura 4 – Análise quantitativa dos resultados de DRX do RBMF

Os resultados da Figura 4 revelam que o RBMF retirado da localidade de Gesteira é rico em quartzo e caulinita, totalizando 75,4% das fases identificadas, enquanto os minerais ferrosos hematita e goethita consistem em 15,6% da composição mineral do rejeito. Os minerais encontrados na análise

[1] https://www.crystallography.net/cod/5000035.html
[2] https://www.crystallography.net/cod/9009230.html
[3] https://www.crystallography.net/cod/1011240.html
[4] https://www.crystallography.net/cod/9016406.html
[5] https://www.crystallography.net/cod/9004409.html
[6] https://www.crystallography.net/cod/1011081.html
[7] https://www.crystallography.net/cod/9004141.html

do RBMF deste estudo estão em concordância com as fases cristalinas comumente identificadas em rejeitos de minério de ferro de Minas Gerais, como observa-se no trabalho de Carmignano *et al.* (2021).

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos espécimes cilíndricos rompidos aos 7 dias de cura.

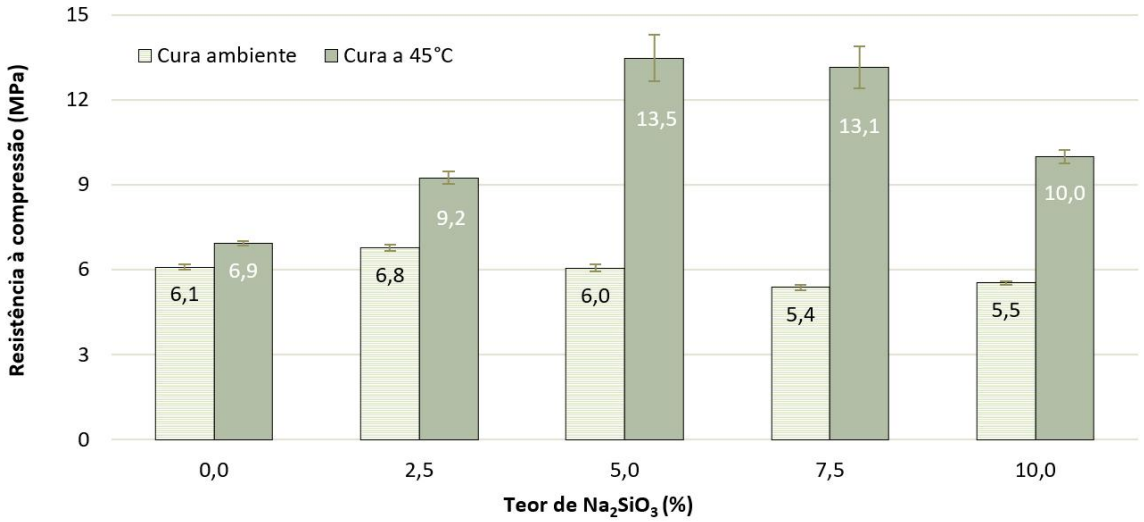


Figura 5 – Resistência à compressão dos protótipos aos 7 dias

Considerando que cada corpo-de-prova cilíndrico com diâmetro de 50 mm possui uma área de contato de 1963,5 mm², a tensão aplicada em cada espécime devido à prensagem com carga de 15 kN foi correspondente a 7,6 MPa. Desta forma, a resistência à compressão dos espécimes de referência pode ser atribuída, em parte, ao adensamento e empacotamento dos grãos, promovida pela etapa de prensagem, que é uma forma de estabilização mecânica. Também pode ser observado que a energia térmica adicional fornecida aos espécimes curados a 45°C possivelmente favoreceu a retração por secagem, reduzindo a porosidade e acarretando em um ganho de 0,8 MPa ao traço de referência.

Ao analisar a influência do teor de Na_2SiO_3, observa-se que os espécimes curados à temperatura ambiente tiveram pouca variação da resistência à compressão, com os valores situando-se entre 5,4 MPa até 6,8 MPa, para os traços com 7,5% e 2,5% de ativador alcalino, respetivamente. Para esta cura, notou-se uma tendência decrescente de resistência mecânica média com o aumento do teor de ativador, com os menores valores de resistência obtidos para os teores de 7,5% e 10% de Na_2SiO_3, sob cura ambiente.

Com o aumento da temperatura de cura para 45°C, houve ganho de resistência à compressão para todos os traços avaliados neste estudo. Comparando-se os espécimes álcali-ativados curados em temperatura ambiente aos espécimes curados a 45°C, observou-se ganhos percentuais de resistência de 35,3%, 125%, 142,5% e 81,8% para os teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de Na_2SiO_3, respetivamente. Quanto ao traço de referência sem adição de ativador, o ganho percentual foi de 13,8%.

Nesse sentido, acredita-se que uma possível explicação para os ganhos de resistência observados esteja associada ao que foi descrito por Saludung *et al*. (2023). Os autores desenvolveram

geopolímeros produzidos a partir de resíduos de cinzas volantes classe F e rejeitos de escória granulada de alto forno, ativados alcalinamente com uma mistura de silicato e hidróxido de sódio, comparando os espécimes curados por 28 dias em temperatura ambiente com os curados a 70°C. Foi sugerido uma aceleração nas reações de geopolimerização com a aplicação de temperaturas mais elevadas, resultando na maior formação de gel, o que se traduz em maior resistência à compressão (Saludung *et al*. 2023). Em contraponto, à temperatura ambiente houve progressão lenta e incompleta das reações de formação do gel (Saludung *et al*. 2023). Complementarmente, no contexto da produção de geopolímeros a partir de rejeitos da mineração de cobre, Tian *et al.* (2020) descreveram a influência da aplicação de temperaturas de cura moderadamente elevadas, no que tange ao desenvolvimento da microestrutura e da dissolução do precursor.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, é possível apresentar as seguintes conclusões:

- ✓ A fluorescência de raios X demonstrou composição química em óxido predominante de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3, com $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 = 92,77\%$;
- ✓ A análise qualitativa aplicada aos resultados de DRX permitiu identificar as fases cristalinas quartzo, hematita, goethita, caulinita, muscovita, gibbsita e rutilo;
- ✓ A análise quantitativa aplicada aos resultados de DRX permitiu constatar predominância das fases cristalinas de quartzo e caulinita, estas representando 57,5% e 17,9%, respetivamente. As fases cristalinas ricas em ferro, hematita e goethita, representaram 9,0% e 6,6%, respetivamente.
- ✓ Foi possível obter protótipos cilíndricos produzidos com RBMF provenientes do rompimento da barragem de Fundão, após a ativação alcalina com Na_2SiO_3 pelo método *one part mix*;
- ✓ Os resultados indicam que os protótipos produzidos possuem resistências à compressão médias superiores à 13 MPa para os teores de 5% e 7,5% de Na_2SiO_3, sob cura à 45 °C. Os protótipos curados sob temperatura ambiente exibiram redução da resistência à compressão após a adição do ativador alcalino, sendo que a menor resistência foi de 5,4 MPa ao se adicionar 7,5% de Na_2SiO_3.
- ✓ A partir de estudos da literatura sobre materiais álcali-ativados, sugeriu-se que o aumento da temperatura de cura dos espécimes tem influência direta no ganho de resistência destes, possivelmente devido à aceleração das reações de dissolução dos precursores e formação de gel. Em contrapartida, a cura a temperatura ambiente não se mostrou eficaz em promover ganhos de resistência à compressão, independente do teor de ativador alcalino adicionado.

Dessa forma, a caracterização química e mineralógica demonstrou que o rejeito possui composição compatível com precursores para materiais álcali-ativados. Ademais, a partir dos resultados mecânicos, observou-se que a resistência à compressão foi superior ao mínimo de 2,0 MPa determinado pela NBR 8491 (ABNT, 2012) para tijolos de solo-cimento. Embora a geometria e o método de estabilização sejam diferentes dos dispostos na referida norma, os resultados indicam que há potencial para aplicação do RBMF para produção de tijolos prensados e estabilizados. Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se a ampliação dos teores de diferentes ativadores, idades e regimes de cura, produção de espécimes em geometria de tijolos e estudo das propriedades mecânicas, de durabilidade e estabilidade dimensional.

5 AGRADECIMENTOS

- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas (FAPEMIG);
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES);
- Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ);
- Grupo de Pesquisa CNPq - ATIVE/Cimentos Alcalinos e Ácidos Ativados, Laboratório Nanolab (REDEMAT/UFOP) e Laboratório de Construção Civil (DECIV/UFOP).

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (ANA). (2016). Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce – Rompimento da barragem em Mariana/MG: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil (Informe 2015). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Agência Nacional de Águas, Ministério do Meio Ambiente, República Federativa do Brasil, 49 p. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/encarteriodoce_22_03_2016v2.pdf

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2012). NBR 8491: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2016). NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação (Versão Corrigida – 2020). Rio de Janeiro, p. 9.

Bezerra, C.G., Rocha, C.A.A., Siqueira, I.S., Toledo Filho, R.D. (2021). Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes. Construction and Building Materials, 303:124496. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124496

Bessa, S., Duarte, M., Lage, G., Mendonça, I., Galery, R., Lago, R., Texeira, A.P., Lameiras, F., Aguilar, M.T. (2024). Characterization and Analysis of Iron Ore Tailings Sediments and Their Possible Applications in Earthen Construction. Buildings, 14(2):362. https://doi.org/10.3390/buildings14020362

Bish, D.L., Von Dreele, R.B. (1989). Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite. Clays and Clay Minerals, 37(4):289-296. https://doi.org/10.1346/CCMN.1989.0370401

Carmo, F.F., Kamino, L.H.Y., Tobias Junior, R., Campos, I.C., Carmo, F.F., Silvino, G., Castro, K.J.S.X., Mauro, M.L., Rodrigues, N.U.A., Miranda, M.P.S., Pinto, C.E.F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in Ecology and Conservation, 15(3):145-151. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002

Carmignano, O.R., Vieira, S.S., Teixeira, A.P.C., Lameiras, F.S., Brandão, P.R.G., Lago, R.M. (2021). Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. J. Braz. Chem. Soc., 32(10):1895-1911. https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20210100

Downs, R. T., Hall-Wallace, M. (2003). The American Mineralogist Crystal Structure Database. American Mineralogist, 88:247-250.

Duarte, M.S., Almada, B.S., Santos, W.J., Bessa, S.A.L., Bezerra, A.C.S., Aguilar, M.T.P. (2022). Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore

tailings as supplementary cementitious material. Journal of Building Engineering, 59:105099. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105099

Faria, N.C.N., Pereira, V.M., Nobre, T.R.S., Romano, R.C.O., Coelho, A.C.V., Angulo, S.C. (2023). Clinker Portland with iron ore tailing and its characterization by integrated laboratory methods. Construction and Building Materials, 402:132958. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132958

Ferreira, I.C., Galéry, R., Henriques, A.B., Teixeira, A.P.C., Prates, C.D., Lima, A.S., Souza Filho, I.R. (2022). Reuse of iron ore tailings for production of metakaolin-based geopolymers. Journal of Materials Research and Technology, 18:4194-4200. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.192

Gong, L., Hua, X., Yao, B., Liang, J., Tian, G. (2023). Novel red composite pigment with high thermostability from iron ore tailings: Synthesis and coloring mechanism. Ceramics International, 49(3):5066-5076. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.021

Gražulis, S., Chateigner, D., Downs, R.T., Yokochi, A.F.T., Quiros, M., Lutterotti, L., Manakova, E., Butkus, J., Moeck, P., Bail, A.L. (2009). Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures. Journal of Applied Crystallography, 42(4):726-729. https://doi.org/10.1107/S0021889809016690

Gražulis, S., Daškevič, A., Merkys, A., Chateigner, D., Lutterotti, L., Quirós, M., Serebryanaya, N.R., Moeck, P., Downs, R.T., Bail, A.L. (2012). Crystallography Open Database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration. Nucleic Acids Research, 40(D1):D420-D427. https://doi.org/10.1093/nar/gkr900

Gražulis, S., Merkys, A., Vaitkus, A., Okulič-Kazarinas, M. (2015). Computing stoichiometric molecular composition from crystal structures. Journal of Applied Crystallography, 48(1):85-91. https://doi.org/10.1107/S1600576714025904

Gu, X., Liu, B., Li, Z., Wang, H., Liu, J., Nehdi, M.L., Zhang, Y. (2023). Mechanical grinding kinetics and particle packing novel characterization of iron ore tailings as inert filler for cement mortar. Journal of Building Engineering, 78:107558. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107558

Hazemann, J.-L., Bérar, J.F., Manceau, A. (1991). Rietveld studies of the aluminium-iron substitution in synthetic goethite. Materials Science Forum, 79-82:821-826. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.79-82.821

Huang, S., Pi, Z., Cai, C., Li, H. (2023) Utilization of high-sulfur iron ore tailings in cement mortar by considering the influence of curing temperature and tailing content. Journal of Building Engineering, 74:106826. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106826

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). (2015). Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Coordenação Geral de Emergências Ambientais, Diretoria de Proteção Ambiental, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf

Jing, C., Wang, N., Shi, W., Meng, X., Guo, C. (2023). Experimental study on iron ore tailings sand and municipal solid waste incineration fly ash used in semi-rigid base of asphalt pavement. Construction and Building Materials, 393:131981. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131981

Liang, J.-J., Hawthorne, F.C. (1996). Rietveld refinement of micaceous materials; muscovite-2M_1 , a comparison with single-crystal structure refinement. The Canadian Mineralogist, 34(1):115-122. Disponível em: https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/34/1/115/12702/Rietveld-refinement-of-micaceous-materials?redirectedFrom=fulltext

Long, H., Zhu, D., Pan, J., Li, S., Yang, C., Guo, Z., Xu, X. (2024). A critical review on metallurgical recovery of iron from iron ore tailings. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(2):112140. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112140

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. Cement and Concrete Research, 103:21-34. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001

Meagher, E.P., Lager, G.A. (1979). Polyhedral thermal expansion in the TiO_2 polymorphs; refinement of the crystal structure of rutile and brookite at high temperature. The Canadian Mineralogist, 17(1):77-85. Disponível em: https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/17/1/77/11318/Polyhedral-thermal-expansion-in-the-TiO-2?redirectedFrom=fulltext

Megaw, H.D. (1934). The Crystal Structure of Hydrargillite, $Al(OH)_3$. Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials, 87(1-6):185-205. https://doi.org/10.1524/zkri.1934.87.1.185

Mendes, B.C., Pedroti, L.G., Fontes, M.P.F., Ribeiro, J.C.L., Vieira, C.M.F., Pacheco, A.A., Azevedo, A.R.G. (2019). Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. Construction and Building Materials, 227:116669. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050

Merkys, A., Vaitkus, A., Butkus, J., Okulič-Kazarinas, M., Kairys, V., Gražulis, S. (2016). COD::CIF::Parser: an error-correcting CIF parser for the Perl language. Journal of Applied Crystallography, 49(1):292-301. https://doi.org/10.1107/S1600576715022396

Merkys, A., Vaitkus, A., Grybauskas, A., Konovalovas, A., Quirós, M., Gražulis, S. (2023). Graph isomorphism-based algorithm for cross-checking chemical and crystallographic descriptions. Journal of Cheminformatics, 15(25). https://doi.org/10.1186/s13321-023-00692-1

Pauling, L., Hendricks, S.B. (1925). The crystal structures of hematite and corundum. Journal of the American Chemical Society, 47(3):781-790. https://doi.org/10.1021/ja01680a027

Quirós, M., Gražulis, S., Girdzijauskaitė, S., Merkys, A., Vaitkus, A. (2018). Using SMILES strings for the description of chemical connectivity in the Crystallography Open Database. Journal of Cheminformatics, 10(23). https://doi.org/10.1186/s13321-018-0279-6

Rietveld, H.M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. Journal of applied Crystallography, 2:65-71. https://doi.org/10.1107/S0021889869006558

Sá, T.S.W., Oda, S., Balthar, V.K.C.B.L.M., Toledo Filho, R.D. (2022). Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. Construction and Building Materials, 342(B):128072. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128072

Saldanha, R.B., Caicedo, A.M.L., Araújo, M.T., Scheuermann Filho, H.C., Moncaleano, C.J., Silva, J.P.S., Consoli, N.C. (2023). Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. Construction and Building Materials, 365:130008. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130008

Saludung, A., Azeyanagi, T., Ogawa, Y., Kawai, K. (2023). Mechanical and microstructural evolutions of fly ash/slag-based geopolymer at high temperatures: Effect of curing conditions. Ceramics International, 49(2):2091-2101. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.175

Silva, C.B., Paiva, P.R.P. (2020). Artificial stone production using iron ore tailing (IOT). Cerâmica [online], 66(378):164-171. https://doi.org/10.1590/0366-69132020663782854

Thejas, H.K., Hossiney, N. (2022). Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. Case Studies in Construction Materials, 16:e00973. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00973

Tian, X., Xu, W., Song, S., Rao, F., Xia, L. (2020). Effects of curing temperature on the compressive strength and microstructure of copper tailing-based geopolymers. Chemosphere, 253:126754. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126754

United States Geological Survey (USGS). (2023). Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p. https://doi.org/10.3133/mcs2023

Vaitkus, A., Merkys, A., Gražulis, S. (2021). Validation of the Crystallography Open Database using the Crystallographic Information Framework. Journal of Applied Crystallography, 54(2):661-672. https://doi.org/10.1107/S1600576720016532

Vaitkus, A., Merkys, A., Sander, T., Quirós, M., Thiessen, P.A., Bolton, E.E., Gražulis, S. (2023). A workflow for deriving chemical entities from crystallographic data and its application to the Crystallography Open Database. Journal of Cheminformatics, 15(123). https://doi.org/10.1186/s13321-023-00780-2

Vescovi, P.H.T., Bezerra, A.C.S., Poggiali, F.S.J. (2023). Iron ore tailing (IOT) chemical composition and content impact on the physical, mechanical, and durability properties of blended cement. Journal of Building Engineering, 80:108119. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108119

Will, G., Bellotto, M., Parrish, W., Hart, M. (1988). Crystal structures of quartz and magnesium germanate by profile analysis of synchrotron-radiation high-resolution powder data. Journal of Applied Crystallography, 21(2):182-191. https://doi.org/10.1107/S0021889887011567

Zhang, N., Tang, B., Liu, X. (2021). Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. Construction and Building Materials, 288: 123022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123022

Zhang, Y., Li, Z., Gu, X., Nehdi, M. L., Marani, A., Zhang, L. (2023a). Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete. Journal of Building Engineering, 72:106585. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106585

Zhang, Y., Zhang, L., Wang, Q., Han, D., Li, Z. (2023b). Iron ore tailings, phosphate slags, and lithium slags as ternary supplementary cementitious materials for concrete: Study on compression

strength and microstructure. Materials Today Communications, 36:106644. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106644

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DA ATIVAÇÃO ALCALINA SÓLIDA DE FILITOS DE DIFERENTES ORIGENS

Dayana Keitty Carmo Gonçalves[a]; Guilherme Jorge Brigolini Silva[b]; Rosemary Bom Conselho Sales[c]
Maria Teresa Paulino Aguilar[d]

[a]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Av. Min. Olavo Drummond, 25 - Amazonas, Araxá - MG, 38180-510, dayana.goncalves@cefetmg.br

[b]Universidade Federal de Ouro Preto - Praça Tiradentes, 20 - Centro - Ouro preto - Minas Gerais - Brasil CEP: 35.400-000, guilhermebrigolini@ufop.edu.br

[c]Universidade do Estado de Minas Gerais - Rua Gonçalves Dias, 1434 – Lourdes - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil - CEP 30.140-091, rosemary.sales@uemg.br

[d]Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil CEP: 31.270-90, teresa@ufmg.br

RESUMO

Utilizando-se a ativação alcalina é possivel a estabilização de solos/rejeitos, resultando em mateirais com baixo impacto ambiental e alto desempenho em idades iniciais. A síntese tradicionalmente utiliza precursores sólidos e ativadores em solução. No entanto, é possível realizar a síntese utilizando precursores e ativadores sólidos. O filito é um material de fácil pulverização e rico em SiO_2 e Al_2O_3, com potencial para ativação alcalina. Contudo, na literatura são escassos os estudos sobre ativação alcalina de filitos, e inexistentes sobre a ativação *one part* utilizando como precursor exclusivamente o filito. Nesse trabalho é avaliada ativação alcalina de dois filitos encontrados em diferentes regiões do Brasil. Os materiais precursores após caracterização física e química, foram submetidos a tratamentos térmicos e à moagem em moinho de bolas. O material tratado termo-mecanicamente foi então ativado utilizando ativador sólido a base de hidróxido de sódio. Foram testados traços com correção do teor de alumina e silica. A eficácia da ativação foi avaliada em vinte quatro horas após a moldagem quanto à resistência à compressão. Pastas produzidas com os materiais apresentaram resultados similares, que indicam a estabilização de ambos filitos avaliados e o potencial de aplicação do material para arquitetura de terra, em especial adobe.

Palavras-chave: estabilização alcalina, arquitetura de terra, pasta geopolimérica.

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material manufaturado mais consumido no mundo e um dos maiores responsáveis por emissões de CO_2 (ZHANG *et al*., 2014). A estabilização alcalina de materiais pulverulentos pode ser uma solução para mitigar tais emissões (AMRAN *et al*., 2019). Assim, no atual cenário os materiais alcalinamente ativados são de forma abrangente considerados mais ecológicos quando comparados ao cimento Portland e a outros materiais cerâmicas em inúmeros critérios (KRIVEN *et al*., 2024).

Pela estabilização alcalina são produzidos materiais ativados alcalinamente que são uma nomenclatura genérica, aplicada à materiais aglutinantes obtidos por meio da reação entre um metal alcalino, sólido ou em solução, com um aluminossilicato sólido em pó. O metal alcalino desempenha papel de ativador da fonte de aluminossilicato, que é o precursor no processo de polimerização presente nesses materiais. Essa nomenclatura abrange muitos aglutinantes, com fontes de aluminossilicato com alto ou baixo teor de cálcio (PROVIS, 2017). Como ativador os materiais mais empregados são os hidróxidos e silicatos, no entanto, podem ser utilizados também carbonatos, sulfatos, aluminatos ou óxidos alcalinos. O objetivo do uso de um metal alcalino é fornecer cátions aumentando o pH da solução e consequentemente acelerar a dissolução do aluminossilicato (TORRES-CARRASCO e PORTAS, 2017).

O filito é uma rocha metamórfica presente em grande parte do solo do brasileiro, rico em SiO_2 e Al_2O_3. Nos últimos anos, alguns estudos da literatura buscam equacionar o uso do filito para produção de ligantes alcalinos. Sendo uma das possibliidades o uso na arquiteutra de terra, área de estudo que tem atraído atenção de estudiosos em todo o mundo, devido à sua natureza sustentavel (ZHANG, *et al*., 2024). Melo e Thaumaturgo (2012) ressaltam que até 40% da composição química do filito é suscetível ao ataque alcalino e que 50% do material é quartzo, que pode agir como fíler nos cimentos geopoliméricos. Silva, Rabelo e Fagury Neto (2014) produziram geopolímeros utilizando filito, *in natura* e calcinado, e hidróxido de sódio, obtendo resultados satifatórios. Estudos de Peralta Sánchez (2015) também reafirmam que o filito, devido às suas características físicas e teores de aluminossilicato, possui potencial para ser utilizado como precursor. No entanto, a literatura ainda é escassa sobre a utilização da ativação alcalina em pastas contendo como único precursor filito. E inexistente sobre a síntese utilizando ativadores sólidos com aplicação para arquitetura de terra.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para produção das pastas estabilizadas alcalinamente foram utilizados como fonte de Si e Al precursores obtidos da região norte (Filito Rosa *in natura* – FRN) e da região central (Filito Cinza *in natura* - FCN) de Minais Gerais, no Brasil. Como ativadores alcalinos foram utilizados Hidróxido de Sódio em lentilhas e/ou Silicato de Sódio alcalino em pó.

A caracterização química dos filitos FRN e FCN foi realizada por Fluorescência de Raios X (FRX). Quanto finura os filitos foram avaliados *in natura*, pela determinação da superfície específica utilizando-se o método de adsorção gasosa via Brunauer, Emmet e Teller (BET), utilizando para tal o analisador de área superficial e poros Nova 600 BET – Anton Paar e granulometria por difração a laser, utilizando o analisador do tamanho de partículas PSA1190 – Anton Paar, com sistema de laser múltiplo. As fases presentes foram avaliadas por Difração de Raios x (DRX). Sendo utilizado um difratômetro Bruker modelo D2 PHASER - 2nd Gen que dispõe de uma fenda soller de 4,0º rad, espalhamento de 0,6mm e faca (knife) de 1mm para inibir o efeito de fluorescência em materiais ferrosos, filtro de Ni associado ao tubo de Raios X de Cu (radiação de Cu-Kα), voltagem de 30 kV e corrente de 10mA. A varredura variou 2θ de 8° a 70°, com passo (increment) de 0,0220°, tempo por passo de 1s. Os filitos também foram avaliados por espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de

Fourier em espectrofotômetro, modelo Varian 640- IR e tecnologia ATR (MiracleTM ATR for FT-IR spectrometers, o software foi o Varian Resolutions Pro.

A análise dos dados de caracterização, mostrou a necessidade de tornar os filitos mais reativos, Assim, os filito rosa e cinza *in natura*, foram submetidos à moagem e em seguida calcinado a temperaturas de 500ºC, 600ºC, 700ºC, 800ºC e 900ºC. As amostras foram moídas por 2 horas em moinho de bolas e aquecidas a uma taxa de 10ºC/min, até atingirem a temperatura prevista, permanecendo nesta por 2 horas. Decorrido o tempo de calcinação a porta do forno foi aberta, e as amostras foram resfriadas naturalmente até atingirem a temperatura ambiente (entre 23ºC e 28ºC). Obteve-se como resultado os Filito Rosa Tratado e Filito Cinza Tratado (FRT e FCT). Na sequência os filitos foram analisados quanto ao teor de cristalinidade e as fases presentes, por DRX, utilizando o equipamento e condições dos filitos rosa e cinza *in natura* (FRN e FCN).

Em função dos dados de caracterização dos filitos tratados termo mecanicamente, foram produzidas pastas geopoliméricas com o precursores tratados a 700ºC. Foram testadas diferentes composições, onde: alterou-se a proporcão de Si/Al pela inserção de fontes alternativas e complementares de SiO_2 e Al_2O3, adição de óxido de alumina e silicato de sódio. Também se alterou a relação água / sólidos. Cabe ressaltar que se considerou a relação sílica e alumina determinada por meio dos resultados da FRX e não as sílica e alumina presente em fases amorfas. Como as relações consideradas ideiais são construídas para a ativação alcalina com solução líquida, nesse estudo, optou-se por produzir alguns traços com relação H2O/M2O menor, prezando por manter a trabalhabilidade em todas as misturas na condição de utilização de ativadores sólidos.

Na Tabela 1 são apresentados os traços utilizados nas pastas de FRT e FCT. As pastas produzidas com esses precursores e ativadas alcalinamente são identificadas pelas siglas FRTS e FCTS, onde a letra S indica que a pasta foi ativada alcalinamente utilizando hidróxido de sódio e em algumas pastas silicato de sódio. Os traços de FRT contam com adição de óxido de alumina, assim como as pastas de FCT contam com silicato de sódio. Os traços são apresentados quanto à proporção em porcentagem de cada material utilizado.

Tabela 1 – Traços propostos para misturas geopoliméricas produzidas por ativação alcalina com precursor de Filito Rosa Tratado - FRT ou Filito Cinza Tratado - FCT.

	Nº	FRT (%)	FCT (%)	Al_2O_3 (%)	Na_2SiO_3 (%)	NaOH (%)
FRTS	1	80	-	8,8	-	11,2
	2	75,7	-	12,1	-	12,2
	3	70,4	-	10,0	-	19,6
	4	69,0	-	10,9	13,6	7,5
	5	66,7	-	10,7	16,0	6,7
	6	60,0	-	10,0	20,0	10,0
FCTS	1	-	84,7	-	4,2	11,8
	2	-	79,0	-	4,8	16,2
	3	-	78,5	2,4	14,5	4,5
	4	-	75,2	-	18,8	6,0
	5	-	70,0	-	20,0	10,0
	6	-	68,0	-	28,6	3,4

Quanto ao método de produção das pastas, o material calcinado e moído, nas quantidades indicadas na Tabela 1 foram misturados aos ativadores formando um pó único e seco, onde foi adicionada água, sendo homogeneizado de forma manual por 5 minutos. Após a mistura as pastas foram vertidas em moldes cúbicos de silicone com 2cm de lado e vibradas por 15 minutos para completa eliminação de bolhas de ar. As amostras produzidas, foram identificadas e protegidas por filme fino de polietileno por um período de 24 horas. Após esse prazo elas foram desmoldadas, acondicionadas e protegidas dentro de embalagem de polietileno transparente com fecho hermético e submetidas em cura a temperatura ambiente até a idade de rompimento. A eficiência da ativação foi avaliada após 24h por ensaio de compressão em uma prensa hidráulica elétrica digital – Solocap.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FILITOS *IN NATURA*

A composição química dos filitos *in natura*, filito rosa (FRN) e filito cinza (FCN), é mostrada na Tabela 2. As duas amostras são compostas majoritariamente de SiO_2 e Al_2O_3. A amostra de FRN é classificada como aluminossilicato de ferro e a amostra de FCN como aluminossilicato de potássio, em função dos teores de Fe2O3 e K2O, respectivamente (RIBEIRO *et al*., 2000). Observa-se que ambos têm significativo teor de álcalis, devendo ser observado se tais álcalis são consumidos na ativação ou se poderão interagir no futuro com agregados reativos.

Tabela 2 – Composição química dos Filitos

Composto químico	FRN	FCN
SiO_2	62,60%	51,20%
Al_2O_3	16,50%	27,50%
Fe_2O_3	10,60%	3,97%
CaO	0,04%	0,03%
MgO	1,13%	1,66%
K_2O	3,11%	7,88%
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	6,44	3,16

No caso do FRN a razão molar SiO_2/Al_2O_3 é de 6,44 e do FCN é de 3,16. Para a maximização da resistência à compressão do geopolímero a razão molar deve ficar compreendida entre 2,64 e 5,50, com os melhores resultados entre 3,3 e 4,5 (SANTA, 2016). Mesmo que a sílica e alumina presentes sejam reativas, faz-se importante corrigir a relação de SiO_2/Al_2O_3. Tal correção se torna mais importante se estes compostos apresentarem cristalinidade.

O alto teor de Fe_2O_3 especialmente da amostra FRN pode ser associado a presença de goethita ou hematita, não sendo possível pelos dados obtidos por FRX separar as frações de cada mineral (OLIVEIRA, VETTER e PETRICK, 2010), responsável pela coloração avermelhada do material. A presença de Fe2O3 em altos teores pode afetar a cinética da reação de endurecimento de geopolímeros ativados alcalinamente. Duan *et al*. (2016), ao trabalhar com rejeito de minério de ferro, identificaram que a adição (em alguns teores) podem levar ao aumento do tempo de cura em mais de 12 horas, diminuindo o fluxo e prolongando de forma exponencial o tempo de endurecimento para geopolímeros. Choi e Lee (2012) mostram que o impacto no tempo de endurecimento (pela adição de Fe2O3) pode ser observado como decréscimo da resistência mecânica a compressão, visto que o aumento de 5% do teor Fe_2O_3, levou a perda de quase 50% da resistência mecânica para mesma idade. Os autores concluíram que ao ferro pode ser atribuído efeitos inibidores da geopolimerização em meio alcalino.

Os difratogramas de raios-X dos filitos FRN e FCN são apresentados na Figura 1. Em ambos os materiais é identificada a presença de quartzo e muscovita. Em FRN é possível também identificar goethita e em FCN caulinita. Qualitativamente é possível notar que ambas as amostras são basicamente cristalinas. Considerando que a extensão da geopolimerização é influenciada pela reatividade, onde quanto maior o teor amorfo de sílica e alumina mais reativo o material se torna (KE *et al.*, 2015; SANTA, 2016), optou-se pela calcinação das amostras, com objetivo de amorfizar parcialmente as amostras.

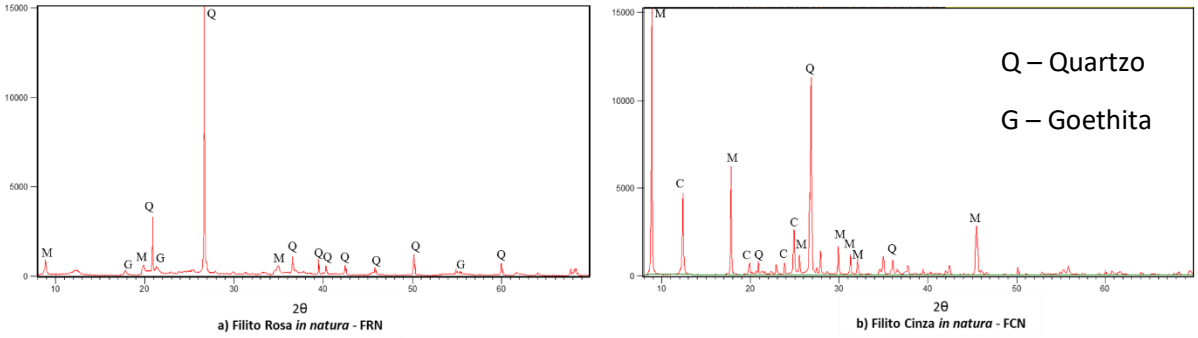


Figura 1 – Difratogramas de raios-X dos filitos *in natura* com identificação das principais fases cristalinas

Os espectros obtidos via FTIR para as amostras FRN e FCN são apresentados na Figura 1. As amostras foram analisadas via FTIR com o objetivo de complementar a avaliação das fases presentes e detectar a composição das misturas moleculares e as estruturas de moléculas individuais. Apesar da técnica ser um método adequado para identificar as fases amorfas é importante ressaltar que ainda não foram catalogados todos os compostos inorgânicos, o que resulta em dificuldades na análise dos resultados.

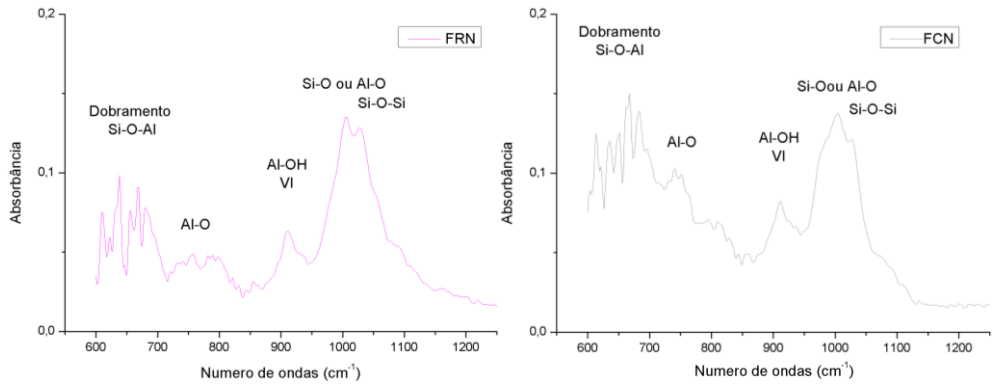


Figura 1 – Espectro de absorbância FTIR a) filito rosa *in natura* (FRN) e b) filito cinza *in natura* (FCN)

Catauro *et al*. (2015) atribuem à banda entre 1080-1050cm-1 como características da vibração de alongamento assimétrico Si-O-Al. Davidovits (2011), afirma que as vibrações internas de Si-O-Si e Si-O-Al podem ser caracterizadas por bandas em 950-1250cm-1, assim como a banda presente em 420-500cm-1. Em 1010-980 cm-1 identifica-se a vibração de estiramento Si-O-Al. Em 912 cm-1 e o alongamento característico da presença de Al (VI)-OH, entre 800-500 cm-1 percebe-se as vibrações de desdobramento de Al-O-Si (CATAURO *et al.*, 2015). Em ambas as amostras é possível verificar a presença das mesmas fases apenas com intensidades diferentes. Ressalta-se entre as fases identificadas, existe a presença de sítios de Al (VI). Essa fase é pouco reativa e com a calcinação é esperada sua reordenação para coordenações tetraédrica (Al (IV)) e/ou pentaédrica (Al (V)) por serem fases mais reativas.

Os resultados de granulometria por difração a laser (média de 3 amostras) podem ser visualizados na Figura 3 e na Tabela 3 que também apresenta os dados de área superficial pelo método BET. A distribuição granulométrica FRN apresenta falta de algumas faixas, o que afeta negativamente a reologia das pastas (PILEGGI e PANDOLFELLI, 1999). Na amostra FCN a distribuição é mais uniforme e semelhante a de amostras avaliadas pela literatura (DEROUICHE e BAKLOUTI, 2021; LOUATI, BAKLOUTI e SAMET, 2016). No entanto, observa-se que o FRN tem partícula média 64,02% menores que FCC7, no entanto FRN tem uma área superficial 82,68% maior que FCN. Sabe-se que, o tamanho das partículas é inversamente proporcional a área superficial (ACEVEDO, ROCHA e BERTOLINO, 2021) e que a esfericidade da partícula é inversamente proporcional a sua superfície específica (MULAZZANI e GUBIANI, 2016), logo pode-se afirmar que as partículas de FCN são mais arredondas que as de FRN, que para tal comparativamente apresenta maior rugosidade superficial. A granulometria e morfologia das partículas são aspectos essenciais no projeto de misturas alcalinamente ativadas, pois interferem diretamente na reatividade (STEFANINI *et al.*, 2024). Para uma dada, amorficidade, espera-se que menores partículas e maiores áreas superficiais propiciam um maior contato do ativador com o precursor e consequentemente maior a dissolução do precursor, proporcionando assim uma maior extensão da geopolimerização (DEROUICHE e BAKLOUTI, 2021; LOUATI, BAKLOUTI e SAMET, 2016). Portanto, é esperado uma maior reatividade do Filito Rosa.

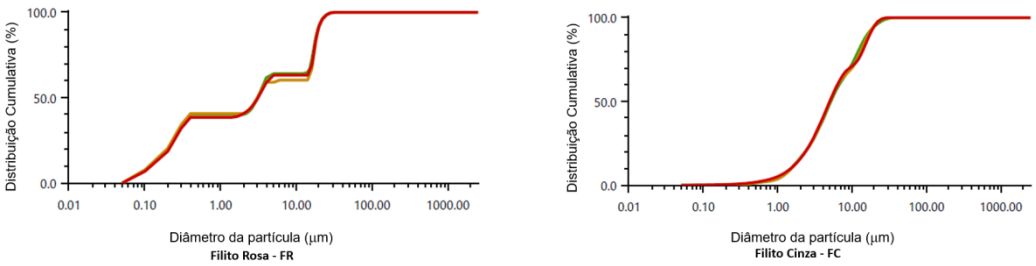


Figura 2 – Curvas de distribuição granulométrica dos filitos *in natura*

Tabela 3 – Distribuição granulométrica e área superficial dos filitos *in natura*

Material	Diâmetro a 10% (µm)	Diâmetro a 50% (µm)	Diâmetro a 90% (µm)	Área Superficial (m^2/g)
FRN	0,116	3,066	19,315	20,190
FCN	1,496	5,029	16,632	3,497

Nota-se que o diâmetro da partícula é condizente com o esperado para a geopolimerização de precursores predominantemente amorfos: amostras de Louati, Baklouti e Samet (2016) que apresentavam diâmetro variando de 125µm a 63 µm e de Tome *et al*. (2022) que tinham entre 15,8 µm e 16,4 µm. O mesmo acontece com os valores de área superficial de ambos os precursores. Os valores são similares aos de Derouiche e Baklouti (2021) que geopolimerizaram caulim com área superficial variando de 4,78 m^2/g até 26,87m^2/g. No entanto, sabe-se que a moagem tem potencial de tornar os materiais predominantemente cristalinos mais reativos (BENEZET e BENHASSAINE, 1999; DEFÁVERI *et al.*, 2019). Dessa forma, optou-se por submeter os filitos a moagem.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS FILITOS APÓS TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

Após moagem foi observado que a amostra FRT passou a ter uma distribuição mais uniforme das faixas granulométrica. No caso da amostra FCT observa-se que de maneira geral o material manteve uma distribuição uniforme de partículas. Além disso, a moagem tornou o material ainda mais fino e a área superficial maior, melhorando assim o potencial de dissolução de ambos os materiais, aumentando

assim a extensão potencial da geopolimerização (LOUATI, BAKLOUTI e SAMET, 2016). No caso da área superficial do filito rosa houve um aumento de 20,57%, enquanto para o filito cinza o aumento foi de 48,24%. Enquanto o diâmetro médio do filito rosa reduziu em 4,63% e do filito cinza em 26,11%.

A Figura 4 mostra a alteração de coloração nas amostras, *in natura* e calcinadas a 500ºC, 600ºC, 700ºC, 800ºC e 900ºC, com taxa de aquecimento de 10ºC/min por 2 horas. Nas amostras de filito rosa é possível observar a acentuação dos tons avermelhados e nas amostras de filito cinza a suavização da coloração cinza, com surgimento do tom avermelhado. A avaliação da cor do material precursor é relevante pois as pastas geopoliméricas tem potencial de aplicação em substituição ao cimento Portland e para esse a indústria evita cores diferentes do tradicional cinza, uma vez que o consumidor normalmente atribui a colorações diferentes a presença de impurezas e termina por preterir o produto em face ao tradicional. Segundo Lacerda (2010) o processo de mudança de cor das amostras é relacionado a desidratação da goethita (FeO (OH)) que no processo de calcinação é transformada em hematita (Fe2O3). A intensidade do pigmento vermelho reflete a maior proporção de ferro na amostra de filito rosa que na de filito cinza. A coloração inicial escura do filito cinza pode segundo Oliveira, Vetter e Petrick (2010), estar relacionada ao tamanho dos grãos e a presença de cátions que entram na estrutura cristalina da goethita e substituem o Fe, produzindo assim a coloração da amostra observada. Estudos de Neto (2007) mostram que os filitos em estado natural apresentam-se em cores claras após calcinação a 950ºC tornam-se rosa-claro, a 1.250ºC cinza e a 1.450ºC fundem parcial ou totalmente chegando a tons de cinza-escuro, marrom ou preto.

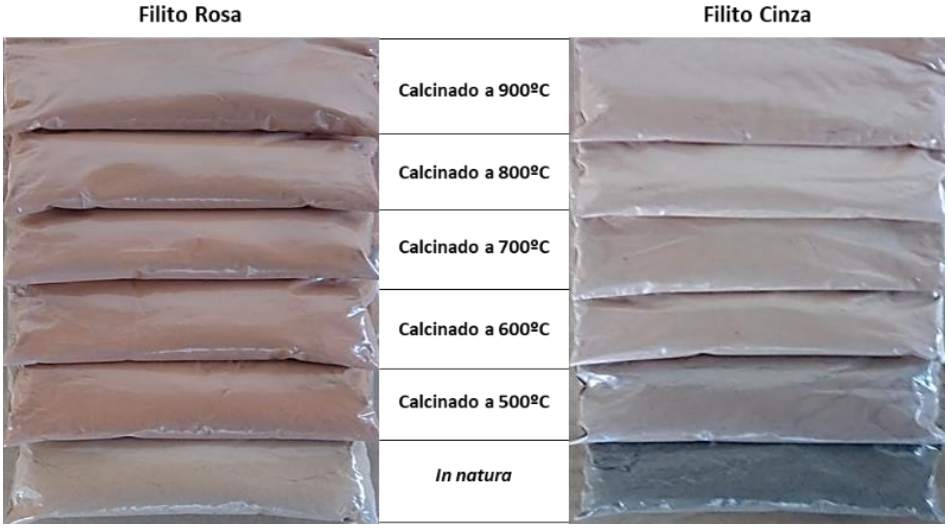


Figura 4 – Aspecto dos filitos *in natura* e após a calcinação em diferentes temperaturas a) filito rosa e b) filito cinza

A Figura 5 apresenta comparativamente os difratogramas das amostras calcinadas a diferentes temperaturas. Observa-se que para a amostra filito rosa e cinza as fases de quartzo (Q) e muscovita (M), presente na amostra *in natura*, permanece em todas as temperaturas de calcinação. No caso das amostras de filito rosa há o desaparecimento da fase Goethita (G) e o surgimento da fase Hematita (H), Seerig (2019) afirma que é esperado que os teores de goethita passem por desidroxilação e apresentem-se como hematita. Essa transformação é perceptível ao observar a mudança de cor. No filito cinza, é observada a presença de caulinita (C) apenas na amostra de 500ºC. Sabe-se que a caulinita diante da exposição a temperatura torna-se amorfa (DE SOUZA *et al.*, 2014). Não se observa na amostra de filito cinza a presença de goethita ou hematita, no entanto a mudança de coloração é atribuída a essas fases. Uma possível explicação seria a substituição do ferro por outros cátions

presentes, dissimulando a presença da goethita ou a baixa concentração do óxido, essa substituição pode inclusive justificar a cor mais escura observada no filito cinza (OLIVEIRA, VETTER e PETRICK, 2010). Não se observa a amorfização dos filitos com a calcinação. Segundo Seerig (2019), na calcinação do filito é observado amorfização decorrente apenas da transformação da caulinita em metacaulinita, permanecendo inalterada a porção de quartzo. Assim como observado no difratograma das amostras Santos *et al*. (2014) observaram que o tratamento térmico não foi efetivo para amorfização do material. O que indica a necessidade de moagem das amostras (BENEZET e BENHASSAINE, 1999; DEFÁVERI *et al*., 2019).

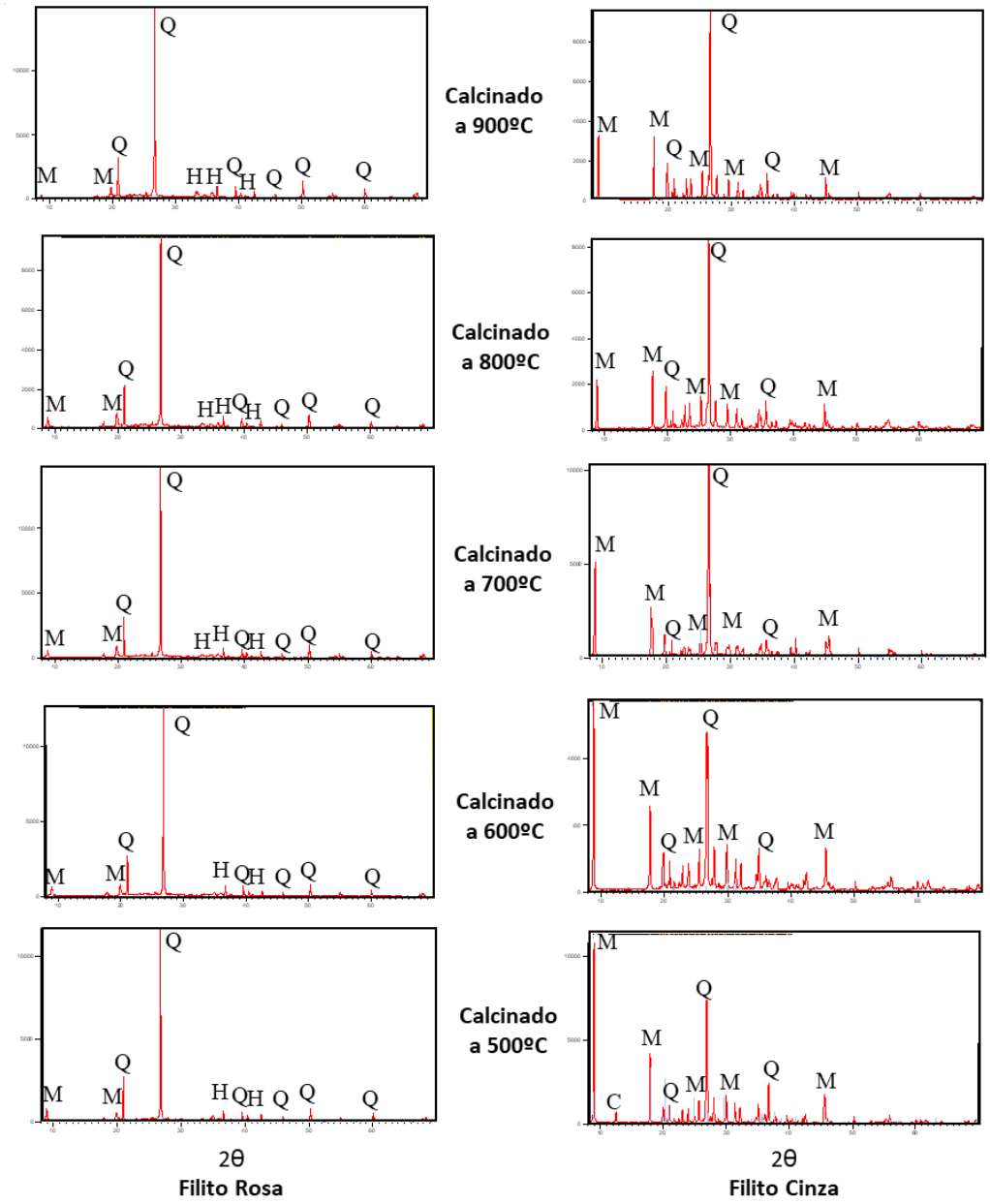


Figura 5 – Difratograma dos filitos *in natura* e após calcinação em diferentes temperaturas por 2h

A Figura 6 apresenta comparativamente o espectro obtido por FTIR de todas as amostras sem e com calcinação. No espectro de FTIR da amostra filito cinza calcinado a 700ºC é perceptível o desaparecimento do sinal que caracteriza a presença de Al-O VI que é menos reativo (DE SOUZA *et al*.,

2014). Isto melhora a reatividade e amplia a possibilidade de geopolimerização na amostra. Nas amostras de filito rosa a partir dos 600ºC essa banda também não é mais perceptível. Sendo acentuada e estendida a banda que indica a presença de Si-O ou Al-O e a que indica Si-O-Si.

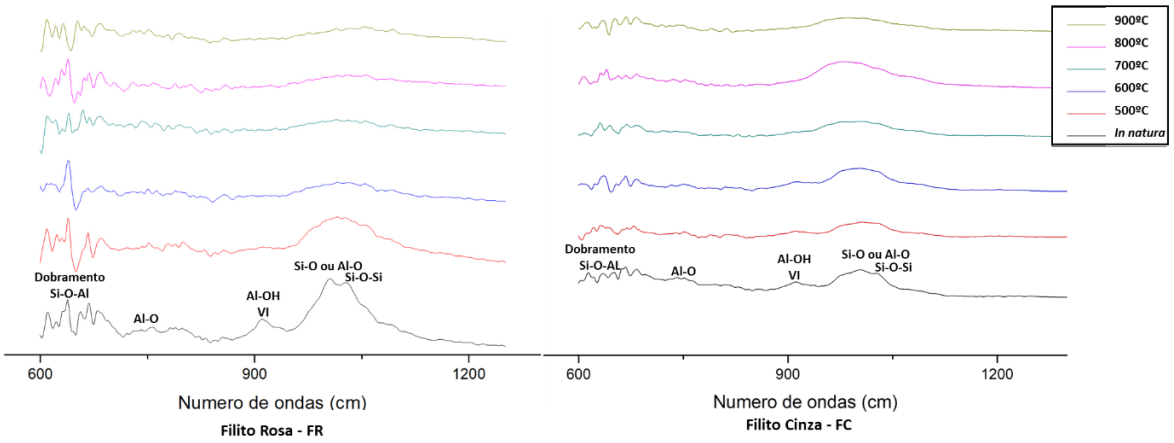


Figura 6 – Espectro de absorbância FTIR das amostras de filito rosa e cinza antes e após calcinação

3.3 RESISTENCIA Á COMPRESSÃO

Os dados de resistência à compressão após 24 horas de cura das misturas geopoliméricas produzidas com diferentes traços para os filito rosa e cinza são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6 respectivamente. A Tabela 5 mostra as pastas que foram preparadas tendo como precursor FRT. Em 24h o traço FRTS2 apresentou resistência a compressão de 2,0MPa. As demais pastas não estavam endurecidas em 24h, o que não permitiu o desmolde e consequentemente a avaliação da resistência mecânica na idade. Todos os traços de FRT contam com fonte adicional de alumina, na forma de óxido de alumínio, uma vez que o precursor conta com uma relação SiO_2/Al_2O_3 de 6,44 considerada superior a faixa ideal para geopolímeros. Nota-se que entre as pastas que contam apenas com FRT como precursor a que endureceu é a que apresenta maior teor de adição de óxido de alumínio e menor relação SiO_2/Al_2O_3. Uma possível explicação seria que a ativação alcalina não foi capaz de ativar o precursor, especialmente no que tange a disponibilização de Al_2O_3, sendo o endurecimento da pasta em sua maior parte responsabilidade da fonte adicional de óxido de alumínio.

Tabela 5 – Resistência à compressão após 24 horas de cura das misturas geopoliméricas produzidas com filito rosa tratado.

	Traço	FRTS1	FRTS2	FRTS3	FRTS4	FRTS5	FRTS6
Materiais	Filito Rosa Tratado (%)	80,0	75,7	70,4	69,0	66,7	60,0
	Óxido de Alumínio (%)	8,8	12,1	10,0	10,9	10,7	10,0
	Silicato de Sódio (%)	-	-	-	13,6	16,0	20,0
	Hidróxido de Sódio (%)	11,2	12,2	19,6	7,5	6,7	10,0
Relações	Água/ Sólido	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5
	SiO_2/ Al_2O_3	3,9	3,3	3,5	3,9	3,9	4,1
	Na_2O/ Al_2O_3	1,0	0,9	1,6	0,9	0,9	1,3
	Na_2O/ SiO_2	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3
	H_2O/ M_2O	8,1	10,6	5,8	7,4	9,1	10,0
Resistência à Compressão (MPa)		-	2,0	-	-	-	-
Desvio padrão		-	0,6	-	-	-	-

A Tabela 6 apresenta as pastas que foram preparadas tendo como precursor FCT. O traço FCTS3, apresentou resistência mecânica à compressão de 2,0MPa. Observa-se que as pastas que utilizaram como fonte de SiO_2 e Al_2O_3 apenas filito cinza não endureceram em 24 horas, não sendo possível o desmolde para avaliação da resistência mecânica nessa idade. No entanto o uso de alumina adicional promoveu efeito similar ao observado no filito rosa.

Tabela 6 – Resistência à compressão após 24 horas de cura das misturas geopoliméricas produzidas com filito cinza tratado.

Traço		FCTS1	FCTS2	FCTS3	FCTS4	FCTS5	FCTS6
Materiais	Filito Cinza Tratado (%)	84,7	79,0	78,5	75,2	70,0	68,0
	Óxido de Alumínio (%)	-	-	2,4	-	-	-
	Silicato de Sódio (%)	4,2	4,8	14,5	18,8	20,0	28,6
	Hidróxido de Sódio (%)	11,8	16,2	4,5	6,0	10,0	3,4
Relações	Água/ Sólido	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
	SiO_2/ Al_2O_3	3,3	3,3	3,4	3,9	4,0	4,5
	Na_2O/ Al_2O_3	1,2	1,6	0,8	1,2	1,6	1,2
	Na_2O/ SiO_2	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3
	H_2O/ M_2O	8,1	6,4	10,1	8,7	7,4	8,1
Resistência Compressão (MPa)		-	-	2,0	-	-	-
Desvio padrão		-	-	0,9	-	-	-

As resistências observadas para ambos os filitos nos traços FRTS2 e FCTS3 mostram a estabilização dos filitos com correção o que indicaria o potencial da utilização da ativação alcalina para produção de peças de solo cimento, com aplicação na arquitetura de terra. Barbosa e Ghavami (2014) e Félix (2016) ao avaliarem amostras estabilizadas alcalinamente com precursor de resíduos de cerâmica e metacaulim encontraram em sete dias resistências a compressão equivalentes às encontradas em 1 dia, respectivamente entre 3,5 e 4MPa (BARBOSA e GHAVAMI, 2014) e 1,0 a 3,6MPa (FÉLIX, 2016).

4 CONCLUSÕES

A caracterização dos filitos ricos em fero e potássio indicaram que os materiais se beneficiariam de tratamentos térmicos e mecânicos quanto a melhoria da reatividade (amorficidade e finura). Considerando os óxidos presentes como reativos, indicados por FRX, a composição química apontou a necessidade da correção dos teores de sílica e da alumina presente nos filitos. Assim, com base nos resultados indicados por DRX e FTIR optou-se pela ativação dos filitos tratados a 700°C, moídos por 2h e com correção dos teores de sílica e alumina, pela adição de silicato de sódio e alumina em pó. O ensaio de resistência a compressão em 24 horas nos materiais ativados mostrou que a ativação *one part* de filitos tratados e com correção promoveu a estabilização alcalina dos materiais. Tal resultado indica o potencial uso de ambos os filitos para arquitetura de terra, em especial adobe ou solo cimento, desde que submetidos aos tratamentos e correções indicados, dando uma contribuição importante para o avanço sustentável da sociedade humana.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG APQ-04155-23), à Rede Mineira de Desenvolvimento Científico e Inovação (FAPEMIG RED-00191-23) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq-

PQ- 308343/2022-0) pelo apoio financeiro. Também agradecem à CAPES e aos Programas de Pós-Graduação em Construção Civil da UFMG e Engenharia de Materiais da REDEMAT.

6 REFERÊNCIAS

ACEVEDO, N. I. A.; ROCHA, M. C. G.; BERTOLINO, L. C. Determinação da área superficial específica e da porosidade de duas amostras de argilas provenientes da bacia de Taubaté- São Paulo. Brazilian Applied Science Review, 2021.

AMRAN, Y. H. M. *et al*. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production, 2019.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Construção em terra crua e sustentabilidade. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014.

BENEZET, J. C.; BENHASSAINE, A. Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. Powder technology, 1999.

CATAURO, M. *et al*. Geopolymer/PEG Hybrid Materials Synthesis and Investigation of the Polymer Influence on Microstructure and Geopolymer/PEG Hybrid. Materials Research, v. 18, n. 4, p. 698-705, 2015.

CHOI, S. C.; LEE, W. K. Effect of Fe2O3 on the physical property of geopolymer paste. Advanced Materials Research, p. 126-129, 2012.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Chemistry and Applications. 3. ed. Saint-Quentin, France: Institute Géopolymère, 2011.

DE SOUZA, C. M. G. *et al*. Evaluation of pozzolanic reactivity of calcined kaolinite. International Journal of Research In Engineering and Technology, p. 209-213, 2014.

DEFÁVERI, K. C. S. *et al*. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. Construction and Building Materials, 2019.

DEROUICHE, R.; BAKLOUTI, S. Phosphoric acid based geopolymerization: Effect of the mechanochemical and the thermal activation of the kaolin. Ceramics International, 2021.

DUAN, P. *et al*. Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. Construction and Building Materials, v. 118, p. 76-88, 2016.

FÉLIX, A. S. Ativação alcalina de blocos de terra crua. , 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

KE, X. *et al*. One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends. Journal of the American Ceramic Society, p. 5 - 11, 2015.

KRIVEN, W. M. *et al*. Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution. Journal of the American Ceramic Society, 2024.

LACERDA, M. L. Avaliação geológica e tecnológica de argilas pozolânicas do Distrito Federal e entorno, Brasília - DF, 2010.

LOUATI, S.; BAKLOUTI, S.; SAMET, B. Acid based geopolymerization kinetics: effect of clay particle size. Applied Clay Science, 2016. 571 - 578.

MELO, L. G. A.; THAUMATURGO, C. Filito: um material estratégico para fabricação de novos cimentos. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, p. 10 - 24, 2012.

MULAZZANI, R. P.; GUBIANI, P. I. Modelo de estimativa da área superficial específica do solo por meio da curva granulométrica. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2016.

NETO, G. S. Estudo de Matérias-Primas do Rio Grande do Norte para Uso em Revestimento Poroso: Influência do teor de dolomita e temperatura de calcinação nas propriedades físico-mecânicas, 2007.

OLIVEIRA, P.; VETTER, L.; PETRICK, S. Identificación de pigmentos empleados en cerámica Nasca ornamental por difracción y fluorescencia de rayos X. Informe Científico Tecnológico, 2010.

PERALTA SÁNCHEZ, M. G. Estudo da viabilidade do uso de matérias de baixo valor econômico do quadrilátero ferrífero na fabricação de materiais cerâmicos. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 97. 2015.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Reflexões sobre distribuição granulométrica e sua correlação com a reologia de concretos refratários. Ceramic News Special South America, 1999. 6-13.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, 2017.

RIBEIRO, A. P. *et al*. Caracterização físico-química de filitos brancos da região de Itapeva, SP. Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro, São Paulo, p. 4901-4913, junho 2000.

SANTA, R. A. A. B. Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos, 2016.

SANTOS, E. A. *et al*. Obtenção de Zeólita empregando filito e metacaulim como material de partida. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá - MT, Novembro 2014.

SEERIG, T. Estéreis em minas de minério de ferro: sua caracterização como material pozolânico após calcinação em forno flash, 2019.

SILVA, K. D. S.; RABELO, A. A.; FAGURY NETO, E. Desenvolvimento de Geopolímeros a partir de filito e caulim do estado do Pará. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 884 - 891, 2014.

STEFANINI, L. *et al*. Characterization of calcined waste clays from kaolinite extraction in alkali-activated GGBFS blends. Materials Today Communications, 2024.

TOME, S. *et al*. Structural and Physico-mechanical Investigations of Mine Tailing-Calcined Kaolinite Based Phosphate Geopolymer Binder. Silicon, 2022.

TORRES-CARRASCO, M.; PORTAS, F. La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. Rev. ing. constr., Agosto 2017.

ZHANG, Y. *et al*. Properties of Sustainable Earth Construction Materials: A State-of-the-Art Review. Sustainability, v. 16, n. 2, p. 670, 2024.

ZHANG, Z. *et al*. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. Construction and building Materials, p. 113 - 127, 2014.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARGAMASSA COM REUSO DE PLÁSTICO CONTAMINADO COM CIMENTO PORTLAND NA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA

Ricardo Soares[a]; Poliana Bellei[b,c]; Inês Flores-Colen[b]; Albano Neves e Sousa[b]

[a]Instituto Federal do Alagoas, Rua Odilon Vasconcelos, 57035-660, Maceió, Alagoas, Brasil, ricardo.soares@ifal.edu.br

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt; ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt; albano.n.e.sousa@tecnico.ulisboa.pt

[c]CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt.

RESUMO

Tendo em vista a possibilidade do esgotamento de recursos naturais e a destinação inadequada de resíduos sólidos na construção civil, este trabalho apresenta uma metodologia que visa minimizar o impacte ambiental e incovenientes causados pela disposição do plástico do interior dos sacos de cimento Portland. O plástico de proteção encontrado no interior dos sacos é um subproduto polimérico, o qual foi adaptado para ser reaproveitado na substituição da areia para a produção de argamassas. O subproduto foi caracterizado e uma argamassa de referência para revestimento manual foi produzida e comparada com argamassas contendo 0,2% e 0,4% de substituição em massa da areia por "fiapos plásticos" com aproximadamente 2,5cm de comprimento. As propriedades no estado fresco e endurecido foram testadas para as argamassas produzidas. Os resultados demonstram que o uso do plástico contaminado com cimento *Portland* reduz o consumo de areia e pode ser uma alternativa sustentável e técnica, principalmente na resistência à flexão, onde alcançou a resistência média de 2,40MPa, sendo a relação entre resistência de compressão e flexão com diferença de 14% quando comparada com a argamassa de referência. A proposta potencializa a minimização da disposição inadequada dos plásticos e emissões de gases como o CO_2 da habitual incineração.

PALAVRAS-CHAVE

Argamassas, polímeros, resíduos sólidos, reuso, sacos de cimento.

Formatted: Font:

Formatted: Space After: 4 pt, Line spacing: At least 14 pt

1 INTRODUÇÃO

O papel kraft contaminado com o cimento *Portland* apresenta um grande problema ambiental quanto à quantidade descartada, logística reversa e os custos para destinação adequada (ALVES, 2016), mas a situação ainda piora quando a embalagem de cimento contém plástico, o qual pode ter tempo de decomposição centenas de vezes maior do que o do papel, sendo estimado em até mais de 500 anos (Tokarchuk *et al.*, 2019). Ao mesmo tempo, a alta demanda do consumo de recursos naturais pode tornar a areia um material escasso no mundo, pois segundo o relatório do Programa da Organização das Nações Unidas (ONU) para o Meio Ambiente (PNUMA, 2019) são extraídas 50 bilhões de toneladas de areia por ano, chegando a ser o segundo recurso mais consumido do mundo.

Atualmente, em Portugal, os Operadores de Gestão de Resíduos (OGR) estabelecem meios para reuso apenas de resíduos de construção e demolição e, no seu processamento, em agregados para aplicações de menor exigência. Por outro lado, o Pacto Ecológico Europeu (COM, 2019) encoraja a busca de novas tecnologias para a prevenção da poluição no descarte de resíduos sólidos da construção civil.

Os números de resíduos gerados não são tão precisos de modo que identifiquem os tipos descartados sem ampla opção de reutilização, sendo exemplo as películas plásticas dos sacos de cimento *Portland*. A disposição de resíduos sólidos é um problema também em outros países, por exemplo, no Brasil, onde o setor da construção civil é o maior consumidor dos plásticos produzidos no país, chegando a uma proporção de aproximadamente 1/4 do total, onde o índice de reciclagem para a maioria dos tipos de plásticos é inferior a 30% (ABIPLAST, 2022). Adicionalmente, segundo os estudos de Ma *et al.* (2019), os sacos de cimento de plástico são os que mais emitem CO_2 em seu ciclo de vida.

O desempenho eficiente da argamassa, utilizando resíduos da própria produção, pode gerar valor económico, menor consumo dos recursos naturais existentes e redução da poluição, contribuindo ainda para a sustentabilidade da indústria da construção. Esta investigação apresenta métodos e resultados da reutilização da película plástica dos sacos de cimento *Portland* nas próprias argamassas e compara esses resultados com uma argamassa de referência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO POLIMÉRICO

Os sacos de cimento foram obtidos no Laboratório de Construção (LC) do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa entre julho e agosto de 2022. Cerca de 10 sacos foram separados para tratamento e estudos de reaproveitamento. Recortes de plásticos da parte interna dos sacos de cimento foram separados em tiras com larguras de aproximadamente 1cm, que foram retorcidas e alongadas manualmente, sendo então recortados novamente em partes de comprimento aproximado de 2,5cm, obtendo o subproduto polimérico chamado nesta investigação de “fiapos plásticos” (Fig. 1).

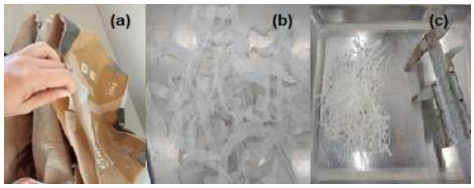


Figura 1 - Plástico interno dos sacos de cimento (a); recortados em tiras com largura de aproximadamente 1 cm (b); fiapos plásticos com ≈ 2,5cm de comprimento (c).

Como o tipo de plástico não estava identificado no saco, e para possibilitar uma caracterização do material, o plástico foi testado em laboratório de acordo com dois critérios: (1) Espectroscopia por Infravermelho, utilizando espectrofotômetro com Transformação de Fourier – FTIR modelo IRAffnity-1 Shimadzu, baseado nos parâmetros estabelecidos por Pavia *et al.* (2010) e comparando os resultados com os modelos gráficos de Neves *et al.* (2016); e (2) Avaliação do material por combustão e densidade, sendo esta avaliação realizada pelo método proposto por Harper *et al*. (2008).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Foram produzidos três tipos diferentes de argamassas para revestimento manual. A argamassa de referência (com identificação "R") possuiu uma dosagem padrão na proporção em volume de 1:4 (cimento *Portland* CEM I 42,5: areia média calibrada), adotando-se um fator água/cimento de 0,55. Para as outras argamassas, as proporções de 0,2% e 0,4% da massa da areia na dosagem padrão foram substituídas pela massa de fiapos plásticos, sendo estas argamassas nomeadas de P02 e P04, respectivamente. Estas proporções de fiapos foram adotadas com base nos experimentos realizados por Konar *et al.* (2018). A quantidade de água nas misturas com os fiapos plásticos manteve-se constante com a do traço referência.

A areia foi disponibilizada pelo LC do IST e as suas características foram avaliadas de acordo com as seguintes normas: NP EN1097-3 (baridade); NP EN 1097-6 (massa volúmica e absorção de água); e NP EN 933-1:2014 (granulometria método de peneiração).

Os ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido foram realizados de acordo com as normas técnicas da União Europeia (Quadro 1).

Quadro 1 – Principais normas de referência da UE para argamassa

Norma	Título	Ano
EN 1015-3	*Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*	1999
EN 1015-6	*Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*	1998
EN 1015-10	*Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of bulk density of hardened mortar*	1999
EN 1015-11	*Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.*	2019

No estado fresco, foram verificados os resultados de cada argamassa quanto à massa volúmica aparente através da utilização de uma balança com precisão de 0,1g e um recipiente com capacidade de 140cm³. Para a consistência, foi utilizada uma mesa de espalhamento com altura de queda de 12,5mm e um paquímetro digital (6 Pol. - Digimess-100.174BL). Ainda no estado fresco, foram moldados três provetes de 4x4x16cm de cada tipo de argamassa para serem ensaiados no estado endurecido.

Depois de completados 28 dias de cura das argamassas, foram realizados os seguintes ensaios: massa volúmica aparente, resistência à flexão e resistência à flexão. O método de moldagem e cura dos provetes seguiu as recomendações da norma EN 1015-11. As massas das amostras foram verificadas na balança com precisão de 0,1g e divididas pelo volume dos provetes. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados numa prensa hidráulica - tração e compressão - Perta - Form Test.

3 RESULTADOS

3.1 CARATERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO POLIMÉRICO

Foram implementados os dois critérios de avaliação, um baseado na espectroscopia e o outro de combustão e densidade, permitindo a orientação quanto às características do material.

3.1.1 ESPECTROSCOPIA

O ensaio de Espectroscopia utilizando Infravermelho com Transformação de Fourier – FTIR - apreentou números de onda entre 3000 e 2850cm^{-1} (Fig.2), indicando características de Alcanos (grupo funcional C—H). Tais resultados foram comparados com os resultados dos gráficos de Neves *et al.* (2016), onde o Polipropileno (PP), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) também apresentaram números de onda no mesmo intervalo (Fig.3).

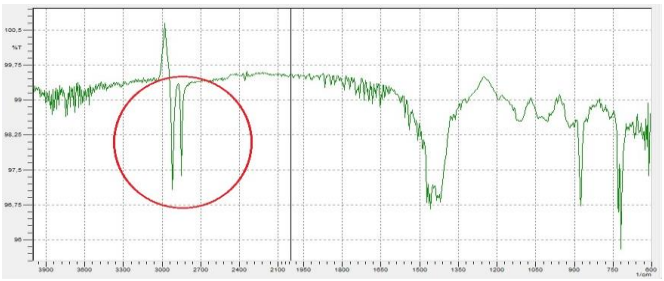


Figura 2 - Resultado de espectro com infravermelho da amostra com número de onda entre 3000 e 2850cm^{-1}

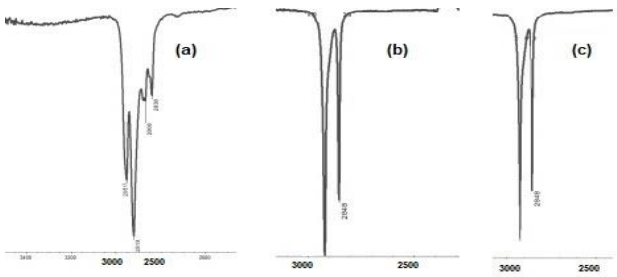


Figura 3 - Referência (Neves *et al.*; 2016) com número de onda entre 3000 e 2850cm^{-1}: (a) PP; (b) PEBD; (c) PEAD.

Comparando o resultado de espectro obtido no laboratório (Fig. 2), com os espectros de referência (Fig. 3), foi possível descartar outros tipos de polímeros. Apesar das curvas do PEBD e do PEAD se assemelharem mais à curva da amostra, os três tipos foram considerados para o critério de avaliação por combustão e densidade.

3.1.2 COMBUSTÃO E DENSIDADE

O plástico, observado como translúcido, não mudou de estado físico ao ser submetido à estufa na temperatura de 110°C. Durante a queima, o plástico emitiu chamas azuis com vértices amarelos, gotejando como vela e apresentando odor característico de vela queimando, em concordância com os

critérios estabelecidos por Harper *et al.* (2008). Por fim, na avaliação da densidade, os fiapos plásticos apresentaram-se menos densos do que a água e mais densos do que a solução de etanol a 38% e 52% (Fig. 4) (Quadro 2).

Figura 4 - Fiapos plásticos mais densos do que a solução com etanol (52%)

Quadro 2 - Resultados da verificação de acordo com Harper *et al.* (2008)

Aparência	Ponto de fusão	Característica na queima	Densidade
Translúcido	> 110 °C	Chama amarela com base azul. Pinga como vela, emitindo odor de vela queimando	< Água (0,997 g/cm³)
			> Etanol 38% (0,941 g/cm³)
			> Etanol 52% (0,911 g/cm³)

De acordo com estes critérios e as propriedades exibidas, os resultados demostraram que o plástico se apresentou com características mais próximas de um PEAD, o qual apresenta densidade entre 0,952 e 0,965g/cm³, segundo Franchetti e Marconato (2003).

3.2. ARGAMASSAS

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO (AREIA)

Após os ensaios de caracterização da areia, a baridade calculada apresentou o valor de 1467kg/m³. Já a massa volúmica das partículas saturadas e secas na estufa apresentou um resultado médio de 2587kg/m³, sendo possível calcular uma absorção de 0,5%. A curva granulométrica (Fig. 5) apresentou predominância entre partículas com tamanhos de 0,25mm e 2mm.

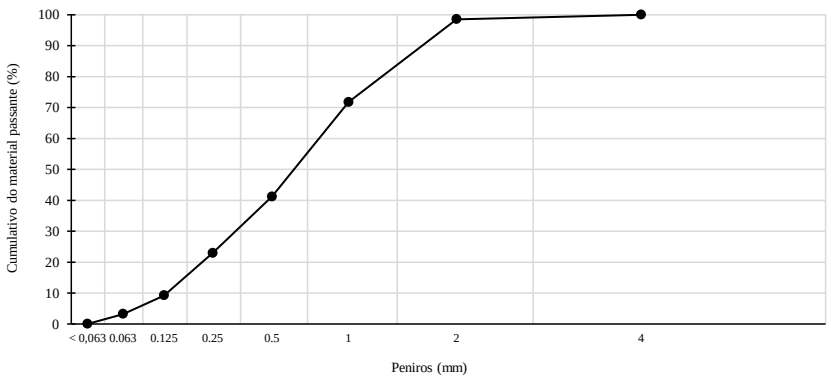


Figura 5 - Curva granulométrica da areia utilizada no estudo

Considerou-se que a areia utilizada apresentou características granulométricas e físicas adequadas, assegurando o tipo de areia proposto na dosagem da argamassa. A areia foi composta por quatro areias do tipo calibrada (FPS120, APAS14, APAS30 e APAS60).

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Os resultados de espalhamento na mesa de consistência dos três tipos de argamassa se apresentaram de forma similar para a mesma razão água/cimento. Os resultados médios para consistência e massa volúmica, respetivamente, são:

- R = 179mm e 2270kg/m³ (referência);
- P02 = 175mm e 2220kg/m³ (com 0,2% de fiapos plásticos);
- P04 = 172mm e 1770kg/m³ (com 0,4% de fiapos plásticos).

Os resultados seguem a norma EN 1015-2 (1998), a qual recomenda para argamassas frescas (valor de espalhamento de 175 ± 10mm para massa volúmica aparente > 1200kg/m³).

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.3.1 MASSA VOLÚMICA

Os valores de massa aparente no estado endurecido estão apresentados no Quadro 3. As argamassas com fiapos plásticos demostraram ser mais leves em comparação com a argamassa de referência.

Quadro 3 - Resultados de massa no estado endurecido

Tipo	Massa volúmica média (kg/m³)	Desvio padrão
R	2192,44	13,84
P02	2112,76	12,07
P04	1669,14	16,60

A redução de massa volúmica no estado endurecido foi previsível por conta da menor densidade dos fiapos plásticos em relação à areia. A argamassa P04 foi a que se apresentou mais leve, com uma redução na ordem de 23,87% em relação à argamassa de referência, o que pode ser considerado uma vantagem se a busca por uma argamassa mais leve for um requisito. Os resultados desta análise apresentaram valores consistentemente baixos do desvio padrão, indicando uma baixa dispersão dos dados em torno das médias calculadas.

3.2.3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nos resultados da avaliação da resistência à flexão obtidos por meio de ensaio mecânico, observou-se que as argamassas P02 e P04 atingiram as médias de 2,22 e 2,40MPa, respetivamente. Dessa forma, esses resultados foram ligeiramente mais elevados do que os da argamassa R, a qual alcançou a média de 2,21MPa.

Na resistência à compressão, a amostra P02 alcançou a maior média, ou seja, um resultado igual a 23,92MPa, seguida da amostra R com o valor de 22,89MPa, enquanto a amostra P04 apresentou resistência média de compressão de 21,37MPa (com desvio padrão de 2,6 MPa).

Os resultados dos ensaios mecânicos encontram-se no Quadro 4.

Quadro 4 - Resultados dos ensaios de resistência na flexão e compressão

Tipo	Flexão (MPa)	Desvio padrão	Compressão (MPa)	Desvio padrão
R	2,21	0,07	22,89	1,02
P02	2,22	0,03	23,92	0,98
P04	2,40	0,07	21,37	2,60

As argamassas com fiapos plásticos (P02 e P04) apresentaram uma leve melhoria no ensaio de resistência à flexão. A argamassa tipo P04 apresentou uma menor relação entre as resistências à compressão e flexão, calculando-se o resultado de 8,9, o qual traduz uma redução de 14% em relação à argamassa de referência (R), para a qual se teria um resultado de 10,35.

Os resultados acima sugerem que os fiapos plásticos funcionaram como fibras, com potencial de melhorar a resistência à flexão (resultados com dispersão não significativa). Porém, as argamassas com maior proporção de fiapos plásticos apresentaram declínio na resistência à compressão (apresentando também maior desvio padrão). Contudo, os resultados enquadram-se nos parâmetros da EN 998-1 (2013).

4 Discussão e estudos futuros

Foi verificada a viabilidade técnica para o reuso dos plásticos contaminados com cimento Portland, reduzindo o consumo de areia sem afetar significativamente a resistência à compressão e a massa volúmica e mantendo os valores graduais de resistência à flexão da argamassa. Foi observada uma produção limpa e eficaz na medida em que o cimento *Portand,* que contaminou o plástico, pode ser um dos componentes da argamassa. Nesta investigação, a argamassa P04, com maior proporção de fiapos plásticos, destacou-se desempenho apresentado com perdas não significativas. Esta argamassa apresentou a menor relação entre resistência de compressão e flexão, exibindo maior resistência à flexão, apesar de ser mais leve.

Em trabalhos futuros deverão estudar-se as proporções de 0,3% e 0,5% de fiapos plásticos e a aplicação *in loco* das argamassas de revestimento. Deverá também avaliar-se a absorção de água por capilaridade e o módulo de elasticidade. A produção do fiapo plástico (Fig. 6) também pode ser otimizada, pois no ensaio de resistência à flexão alguns fiapos romperam e outros poderiam possuir maior alongamento. Através desta investigação, criou-se a expectativa de desenvolvimento de um possível componente polimérico fibroso proveniente dos plásticos contaminados com cimento e não necessariamente para substituir componentes como a areia, o qual também pode ser estudado como reforço de fibras poliméricas em outros materiais, tais como: betão, *grout* e placas cimentícias.

Figura 6 - Fiapos plásticos em detalhe

Os resultados demostraram que o plástico apresentou configurações mais próximas de um Polietileno de Alta Densidade (PEAD), com forma inerte e boa resistência à tração, a qual pode chegar a 31MPa, além de boa resistência à temperatura (IAP, 2017). Uma investigação futura poderá identificar o tipo de plástico mais viável para utilização na comercialização do saco de cimento, de modo que a sua reutilização seja favorável na composição da argamassa. Esta otimização poderia ser amplamente discutida com as cimenteiras na busca de processos mais sustentáveis.

A proporção da substituição em até 0,4% da massa da areia apresentada neste estudo é pouco significativa, porém, se em cada processo que consome areia, fosse possível poupar pelo menos os 0,2% propostos neste trabalho, o consumo anual indicado pelo relatório do Programa da ONU para o Meio Ambiente (PNUMA, 2019) poderia apresentar uma queda anual de cerca de 100 milhões de toneladas de areia do tipo utilizado neste estudo, o que corresponde a um volume de mais de 68 milhões de m³. A proposta também apresenta tecnologia que pode contribuir com os planos para reuso de resíduos sólidos, como por exemplo: o Pacto Ecológico Europeu (COM, 2019), ou os índices de reuso dos tipos de plásticos observados pela ABPLAST (2022). A implementação desta proposta poderia reduzir os impactos avaliados nos estudos de Ma *et al.* (2019) sobre as emissões de CO_2 no ciclo de vida dos sacos de cimento de plástico.

5 Conclusões

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou uma análise e adaptação do plástico contaminado e proveniente dos sacos de cimento para a produção de argamassas de base cimentícia, realizando diferentes ensaios através de normativos técnicos. Os resultados foram analisados e verificou-se a viabilidade quanto ao reuso dos plásticos na argamassa e redução do consumo de areia. O resíduo de cimento e o tempo de decomposição são os problemas destes plásticos para o meio ambiente, mas podem ser uma solução técnica e econômica para o reuso em argamassas. A metodologia deste estudo pode ser aperfeiçoada nos próximos ciclos da pesquisa.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao CERIS (UIDB/04625/2020; DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020), CERENA (UID/ ECI/04028/2019) unidades de investigação do IST, a FCT pela bolsa de doutoramento da aluna Poliana Bellei (UI/BD/151151/2021; DOI: 10.54499/UI/BD/151151/2021), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - www.capes.gov.br), ao IFAL (Instituto Federal de Alagoas - www.ifal.edu.br) e a UFBA (Universidade Federal da Bahia – www.ufba.br).

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Preview 2022. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/publicacoes/preview-2022/. Acessado em 05 de maio de 2023.

ALVES, L. D. S. Influência da adição de fibras de celulose (papel Kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. Brasília, p. 150. 2016.

COM/2019/640final, Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Pacto Ecológico Europeu. Comissão Europeia (2019).

EN 998-1:2013 - Standard Rendering and Plastering Mortar, Brussels: CEN (2013).

EN 1015-2:1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars, Brussels: CEN (1998).

EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Brussels: CEN (1999).

EN 1015-6:1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, Brussels: CEN (1998).

EN 1015-11:2019 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Brussels: CEN (1999).

FRANCHETTI, S.M.M.; MARCONATO, J.C. Propriedades físicas dos polímeros na reciclagem. Química Nova na Escola, 18, 42-45, 2003.

Harper, A.; Nickels, K. Identifying Polymers. Queensland University of Technology. 2008.

IAP - Instituto Avançado do Plástico. Reciclagem de plástico. Vol. I. disponível em: https://www.planetaplastico.com.br/. Acesso em 12 maio de 2023.

Konar, P.; Das S, Paul.; Maity, J. Effect of randomly mixing of waste plastic cement bag Strips. International Research Journal of Engineering and Technology. 2018. 05. May. ISSN: 2395-0056. https://www.irjet.net/archives/V5/i5/IRJET-V5I5340.pdf. Acesso em 12 abril de 2023.

Ma X., Li C., Lee B. Carbon emissions from cement packaging in China: Life Cycle Assessment, Sustainability, 11(20), 5554, 2019.

Mattana, A; Costa, M. Estudo da influência de aditivo dispersante no comportamento reológico de argamassas de revestimento, Universidade Federal do Paraná (2010).

Neves, M.A.F.S; JORGE, F.E. Comparação entre técnicas simples e a análise de espectroscopia no infravermelho na caracterização de polímeros recicláveis. Perspectivas da Ciência e Tecnologia, v.8, n.1 (2016).

NP EN 933-1:2014. Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade. 2014

NP EN 13139:2005/AC :2010. Agregados para argamassas. Instituto Português da Qualidade. 2010.

ONU News. UN warns that between 40 and 50 billion tons of sand are extracted per year. https://news.un.org/pt/story/2019/05/1671251

Pacheco, J.; de Brito, J.C.; L. Evangelista. Bond of recycled coarse aggregate concrete: model uncertainty and reliability-based calibration of design equations, Engineering Structures, 2021.

Pavia, D. L. et al. Introdução à Espectroscopia. Cengage Learning; 1ª edição, 2010.

TOKARCHUK, D; PRYSHLIAK, N. Economic and Environmental Benefits of Using Waste Potential as a Valuable Secondary and Energy Resource. Journal of Environmental Management and Tourism · March 2019. Doi: 10.14505/jemt.v10.1(33).15

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DE MISTURAS SOLO-CIMENTO PORTLAND PARA IMPRESSÃO 3D

Sérgio Gonçalves da Silva Júnior[a]; Thiago da Silva Vicente[b]; Ilana Maria Da Silva Barros[c]; Leonardo De Souza Dias[d]; Fernanda Karolline De Medeiros[e]; Marcos Alyssandro Soares dos Anjos[f] ; Ulisses Targino Bezerra[g]

[a]Instituto Federal da Paraíba, Av. Primeiro de Maio-720, 58015-435, Jaguaribe, João Pessoa, Brasil, goncalves.sergio@academico.ifpb.edu.br

[b]Instituto Federal da Paraíba, Av. Primeiro de Maio-720, 58015-435, Jaguaribe, João Pessoa, Brasil, thiago.vicente@academico.ifpb.edu.br

[c] (Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), ilana.barros@academico.ufpb.br

[d] (Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), leonardodiaspb@gmail.com

[e] (Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), fernanda_karolline@hotmail.com

[f] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB / Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), marcos.anjos@ifpb.edu.br

[g] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, Brasil), dartarios@yahoo.com.br

RESUMO

A manufatura aditiva para construção civil se baseia na impressão em camadas de misturas cimentícias, essa técnica vem se destacando por proporcionar vantagens como a automação do sistema construtivo, por reduzir desperdícios de materiais e tempo de construção. Todavia, as misturas de impressão 3D não apresentam bom desempenho quanto a sustentabilidade, devido a elevada emissão de CO2 associado aos elevados teores de cimento Portland, na maioria das misturas 3D imprimíveis. Desta forma, para fazer uso da manufatura aditiva para a construção de forma mais sustentável, o presente trabalho analisa a impressão 3D em terra crua estabilizada com menores teores de cimento Portland. O desenvolvimento de misturas terra-cimento partiu inicialmente da caracterização física e química do solo, seguida da avaliação da quantidade de cimento na mistura 3D-Terra crua (3DTC) onde foi avaliada uma mistura de referência, apenas com solo e água, e mais duas misturas com solo-cimento e água. As misturas foram analisadas no estado fresco quanto ao espalhamento na mesa de consistência, viscosidade no viscosímetro rotacional e capacidade de construção utilizando uma impressora 3D para concreto, totalmente automatizada nos seus três eixos de impressão, projetada e montada pelo grupo de pesquisa em materiais sustentáveis do IFPB. No estado endurecido foi avaliada a resistência à compressão e à flexão, e os índices físicos das misturas, como a massa específica, o índice de vazios, e a absorção de água. Verificou-se que para obter misturas 3DTC imprimíveis é necessário ter um volume de pasta (cimento Portland) compatível com o sistema de impressão, que impõem uma relação de volume de material granular (solo) (Vs) e volume de pasta (Vp) entre 0,75 e 1,06. As misturas com maior teor de cimento apresentaram melhor desempenho quanto a capacidade de construção e resistência.

Palavras-chave: 3D terra-crua, solo-cimento 3D, capacidade de construção, capacidade de impressão.

1 INTRODUÇÃO

Construções em terra são diferentes técnicas construtivas utilizadas há séculos pela humanidade (Figura 1). Segundo Silva (2000), esse é o método mais utilizado em todo o mundo apesar da crescente industrialização e até informatização na área da construção civil. Hoje, pelo menos 1/3 da população mundial habita em construções feitas usando terra crua como material principal (Minke 2022).

Além disso, a indústria da construção civil passa por um movimento de mecanização dos processos construtivos, visando uma maior eficiência, seja ela energética ou ecológica, e uma alternativa que surge para agregar a essa nova fase é a manufatura aditiva.

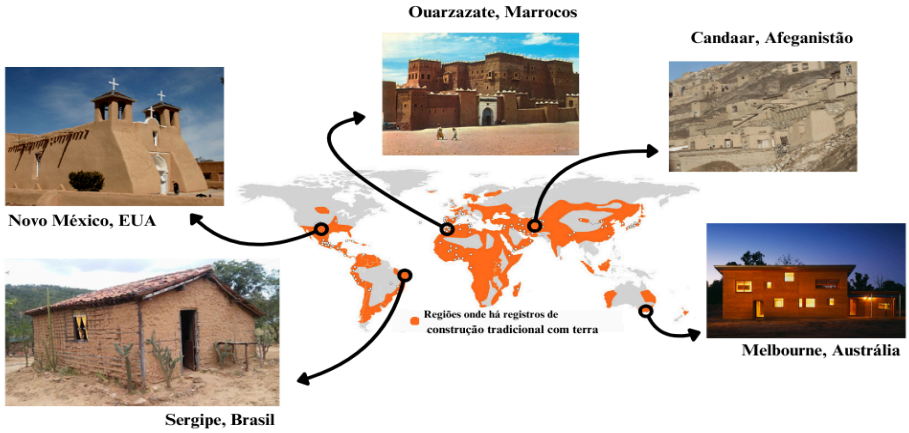


Figura 1 - Exemplos de construção com terra ao redor do mundo

Fonte : Adaptado de Faleschini *et al.*, (2023)

A manufatura aditiva na construção civil envolve o uso de tecnologias de impressão 3D para criar componentes e estruturas arquitetônicas. Ela se baseia na impressão em camadas de misturas cimentícias e essa técnica vem se destacando por proporcionar vantagens como o aumento da complexidade arquitetônica que o sistema proporciona, redução de custos, entre eles os relacionados ao uso de fôrmas e do tempo de produção; condições ligadas à segurança dos trabalhadores; além de fatores de sustentabilidade como a diminuição de desperdícios (Dias 2022).

Todavia, as misturas de impressão 3D não apresentam bom desempenho quanto a sustentabilidade, devido à elevada emissão de CO2 associado aos elevados teores de cimento Portland, na maioria das misturas 3D imprimíveis, assemelhando-se às práticas tradicionais de construção, uma vez que a emissão deste gás poluente ainda continua elevada.

Ao mesmo tempo, de acordo com Curth *et al.* (2024), estima-se que a indústria da construção contribui com 11% das emissões anuais globais de carbono, um número que deverá crescer nos próximos 50 anos, e dos quais 8% surge de um efeito direto da produção de cimento para materiais cimentícios como o concreto, atualmente o material de construção mais onipresente no mundo.

A manufatura aditiva na construção civil está cada vez mais popular devido à sua capacidade de inovar e transformar a indústria da construção. A aplicação da manufatura aditiva na construção civil utilizando materiais à base de terra ainda está em desenvolvimento, como nos trabalhos de Faleschini *et al.* (2023) e Asaf *et al.* (2023). A ideia é utilizar impressoras 3D especializadas para criar estruturas

sobre camadas de forma rápida e eficiente, permitindo a construção de casas e edifícios de maneira mais sustentável e econômica.

O duplo desafio da rápida urbanização e do seu impacto climático pode ser enfrentado a partir do desenvolvimento de novos sistemas para combinar materiais de construção de baixa emissão de carbono com tecnologias de automação de construção em grande escala (Curth *et al.* 2024).

Essa abordagem poderia reduzir a dependência de materiais de construção tradicionais e acelerar o processo de construção, especialmente em áreas onde a terra crua é um recurso local abundante. No entanto, desafios como a formulação de materiais de impressão 3D adequados e a otimização dos processos de construção ainda precisam ser superados para que essa tecnologia se torne mais amplamente adotada na construção civil.

Desta forma, para fazer uso da manufatura aditiva para a construção de forma mais sustentável, o presente trabalho analisa a impressão 3D em terra crua estabilizada com menores teores de cimento Portland, buscando alinhar o material de construção mais antigo do mundo com a mais nova tecnologia da construção civil. Portanto, este artigo tem como objetivo mostrar que é possível imprimir uma estrutura com material à base de terra-água e terra-água-cimento. Para atingir esse objetivo foram produzidas misturas com traços em massa para impressão em escala laboratorial e realizados ensaios no seu estado fresco e endurecido seguindo normas brasileiras.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E METODOLOGIA

Quanto aos procedimentos práticos o estudo estabeleceu as seguintes etapas: (1) obtenção e caracterização dos materiais, (2) análise e ajuste da dosagem das composições da manufatura aditiva, (3) realização e avaliação dos ensaios no estado fresco e endurecido.

2.1. Caracterização dos materiais

2.1.1 Impressora

Para a criação de blocos a serem analisados, foi utilizada uma impressora 3D de concreto estruturada em pórtico com dimensões de 1 m x 1 m x 1,5 m (eixo X, Y e Z) que possui um sistema de extrusão com bico circular de 20 mm.

2.1.2 Cimento

Para a produção das misturas de manufatura aditiva utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V) com diâmetro médio da partícula de 9,95 µm, segundo dados do fabricante.

2.1.3 Água

Utilizou-se água potável do sistema de abastecimento de água fornecida pela CAGEPA - Companhia de Abastecimento de Água e Esgoto do Estado da Paraíba, em João Pessoa.

2.1.4 Solo

O material usado foi uma terra bruta originária de uma escavação para a construção de um prédio da região central da cidade de João Pessoa no estado da Paraíba, Brasil.

Os ensaios para a caracterização do Solo foram seguidos de acordo com as normas brasileiras as quais foram: Solo - Análise granulométrica pela NBR 7181 (ABNT 2016), onde obteve-se uma quantidade de 1% de pedregulho (d > 2,0mm), 25% de areia grossa (0,42mm < d ≤ 2 mm), 44% de areia fina (0,074 mm < d ≤ 0,42 mm) e 31% de silte + Argila (d ≤ 0,074 mm) sendo assim, classificado como areia silto-argilosa, Solo - Determinação do Limite de plasticidade pela NBR 7180 (ABNT 2016), que foi classificado onde foi classificada como com plasticidade média, Solo - Determinação do Limite de Liquidez pela NBR 6459 (ABNT 2017), e a Fluorescência de Raio X - FRX (Quadro 1).

Todo o solo utilizado nas impressões e nos outros ensaios citados acima, com exceção dos descritos pela NBR 7180 e pela NBR 6459, foram secados previamente em uma estufa de secagem com temperatura variando entre 100°C e 106°C em um intervalo de tempo de 24h. Após esse tempo, foi esperado um período de tempo de 30 minutos para a terra esfriar, depois o solo foi peneirado na peneira número 8 (2,36 mm).

Quadro 1 - Fluorescência de Raio X (FRX)

Composto Químico	SiO2	Fe2O3	Al2O3	TiO2	CaO	ZrO2	K2O	Cr2O3	Outros
(%)	51,887	21,281	17,399	7,616	0,611	0,480	0,270	0,120	0,334

2.2 Análise e ajuste da dosagem das composições da manufatura aditiva

As misturas analisadas para impressão 3DTC estão representadas no Quadro 3 (traços em massa).

Quadro 3 - Traços das Misturas em Massa

Material	Solo	Água	Cimento
Terra-Água	1	0,25	0
Solo-Cimento 1	1	0,3	0,1
Solo-Cimento 2	1	0,325	0,2

2.2.1 Mistura Terra-Água

Para realização da impressão terra-água, foram utilizados 30 quilos do solo armazenado e 7,5 quilos de água fornecidos pela concessionária local. A pasta foi misturada no misturador de eixo inclinado por 1 minuto. Após esse tempo, houve uma pausa para homogeneização manual da pasta, tendo em vista que ainda havia uma quantidade significativa de solo seco no fundo do misturador. Em seguida, a pasta foi misturada, novamente, por mais 1 minuto, conforme a esquematização (Figura 2).

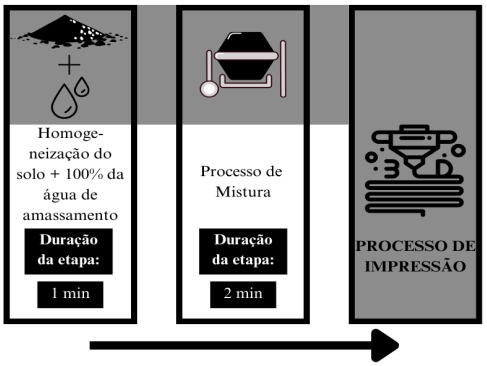
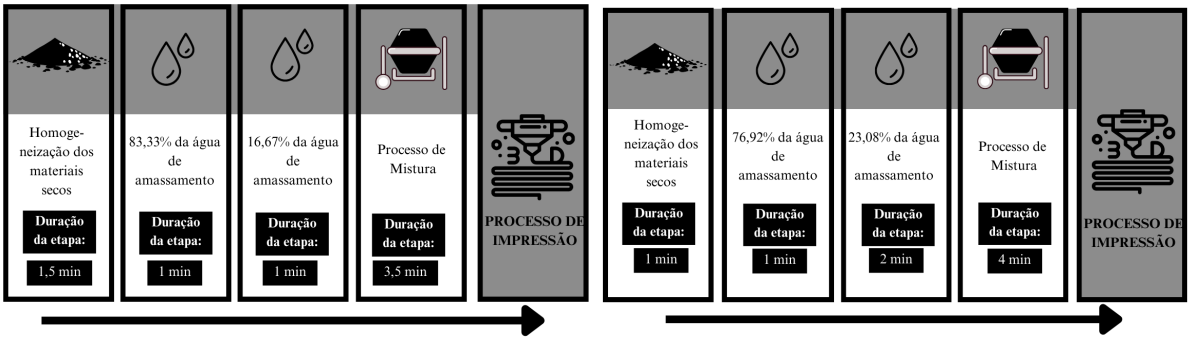


Figura 2 - Esquematização do processo de mistura até a impressão

Fonte - Adaptado de Barbosa (2022)

2.2.2 Misturas Solo-Cimento 1 e 2

Para ambas as misturas tomou-se como base a combinação de referência terra-água com proporção em massa de 1:0,25 (Quadro 2), seguindo o mesmo procedimento de secagem e peneiramento de solo, além disso estas foram produzidas por meio de um misturador de eixo inclinado, seguindo a sequência metodológica proposta por Barbosa (2022) com algumas adaptações, tais como a homogeneização dos materiais secos e introdução da água em duas etapas (Figura 3a e 3b). Nas duas misturas com cimento, houve uma necessidade de realizar-se uma homogeneização manual do material após a introdução da primeira quantidade estimada de água – tendo em vista que ainda havia material seco no fundo da betoneira – mesmo após o movimento rotacional do misturador, fenômeno este que também aconteceu na combinação terra-água.



a) b)

Figura 3 - a) Esquematização do Processo de Mistura (Solo-Cimento 1); b) Esquematização do Processo de Mistura (Solo-Cimento 2)

Fonte - Adaptado de Barbosa (2022)

Para a mistura Solo-Cimento 1, foram utilizados 30 quilos de solo, 3 quilos de cimento e 9 quilos de água – totalizando 42 quilos de mistura - , conforme a proporção em massa citada anteriormente no Quadro 2. Após a homogeneização dos materiais secos, percebeu-se que ainda havia uma quantidade de solo aglutinada na superfície interna do misturador de eixo inclinado, e por este motivo, foi necessário mais 30 segundos de homogeneização mecanizada – totalizando 1,5 minuto para esta etapa, conforme a esquematização da Figura 3 a.

Já na mistura Solo-Cimento 2, foram utilizados 20 quilos de solo, 4 quilos de cimento e 6,5 quilos de água, totalizando 30,5 quilos nesta combinação. Neste caso, a quantidade de massa total foi menor, em comparação a outra mistura com cimento, pois percebeu-se que era possível realizar a impressão do bloco com uma quantidade total de massa menor. Também foi necessário, após a adição da segunda quantidade de água prevista para essa mistura, aumentar em 1 minuto a homogeneização mecanizada, porque o material ainda não estava totalmente uniformizado, conforme a esquematização da Figura 3 b.

2.3 Realização e avaliação dos ensaios no estado fresco e endurecido

2.3.1 Fluidez e Abatimento

A verificação da fluidez foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT 2016), que prescreve o referido ensaio para argamassas, através dos testes de abatimento do mini-tronco de cone e espalhamento na mesa de consistência.

2.3.2 Viscosidade

A viscosidade de cada mistura contida neste artigo foi realizada por meio de um viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I(IKA®), utilizando uma palheta de comprimento de 104 mm, com quatro pás contendo comprimento equivalente a 25,4 mm e diâmetro de 12,7 mm. Para medição no aparelho, a mistura foi disposta em um becker de 600 ml.

Segundo Nunes (2022), visando permitir que a mistura entre em fluxo e minimize o efeito da tixotropia para assim obter resultados mais consistentes, foi realizado o ciclo de histerese com a velocidade angular aplicada de forma crescente equivalente a 8 rpm, 12 rpm, 15 rpm, 17 rpm, 20 rpm, 30 rpm, 40 rpm, 50 rpm e 84 rpm e de forma decrescente com os mesmos valores de velocidade. Após a aplicação do ciclo de acréscimo e decréscimo de cisalhamento, a viscosidade da mistura foi determinada na curva decrescente e na rotação que a viscosidade atingiu o equilíbrio com baixa taxa de erro. Todas as medições foram realizadas em temperatura constante de 24°C.

2.3.3 Massa Específica

O cálculo da densidade de massa no estado fresco foi realizado de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT 2005). A mistura foi introduzida em um recipiente de alumínio com três camadas de alturas aproximadamente iguais, sendo cada uma golpeada 20 vezes por uma espátula na posição vertical**.** Por fim, rasando a mistura com uma espátula formando um ângulo de 45° e efetuada 3 quedas do recipiente com uma altura aproximada de 3 cm de altura, logo após foi registrado a massa do molde em seu estado fresco.

2.3.4 Resistência à Flexão e Compressão

Para os ensaios mecânicos, foram realizadas somente nas misturas com adição de cimento, uma vez que a mistura terra-água (Figura 4) é uma mistura muito frágil e leva um tempo excessivo para o processo de endurecimento do bloco, que durou em média 120 horas.

Figura 4 - Bloco impresso da mistura Terra-Água

Os blocos solo-cimento foram armazenados em um laboratório em recipiente aberto até a realização dos ensaios de resistência à compressão e flexão, bem como os de absorção de água e índice de vazios, após 28 dias.

Os corpos de prova foram submetidos a flexão na direção Z, conforme Barbosa (2022): A orientação de carga do ensaio em relação à disposição dos filamentos possui grande influência no comportamento mecânico dos compósitos impressos. Sabendo disso, se faz necessário definir um sistema de coordenadas. A Figura 5 descreve a direção utilizada para a realização do ensaio para este estudo. A norma utilizada para esse ensaio foi a NBR 13279 (ABNT 2005).

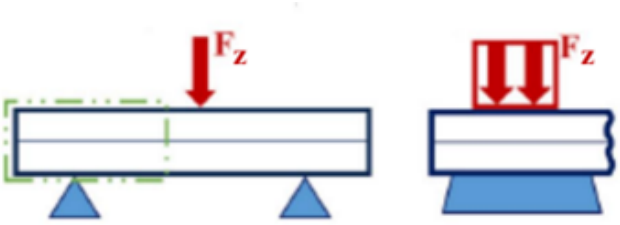


Figura 5 - Direção do Carregamento adotada para esta pesquisa

Fonte - Barbosa (2022)

Já o ensaio de resistência à compressão foi realizado com as metades derivadas do ensaio de flexão após rompimento (já que a amostra se rompe em duas partes de tamanhos de 4 x 4 x 16 cm).

2.3.4 Absorção de Água e Índices de Vazios

Após a cura de 28 dias as peças ficaram na água por imersão ao longo de 72 horas para verificar sua porosidade e capacidade de absorção. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Estado fresco

3.1.1 Fluidez e Abatimento

A figura 6 demonstra os resultados dos ensaios. Estudos como o de Ma *et al.* (2018) demonstram que para a obtenção de misturas imprimíveis, os resultados estão nas faixas de 174 a 210 mm de espalhamento e de 4 a 8 mm de abatimento.

Entretanto, não deve-se tomar esses intervalos como referência, tendo em vista que isso seria aplicado a misturas cimentícias, e este presente trabalho baseia-se no uso majoritário de terra (3DTC). Além disso, outros fatores também devem ser levados em consideração como a velocidade de impressão, taxa de bombeamento, tipo e tamanho do bico de impressão (Barbosa 2022).

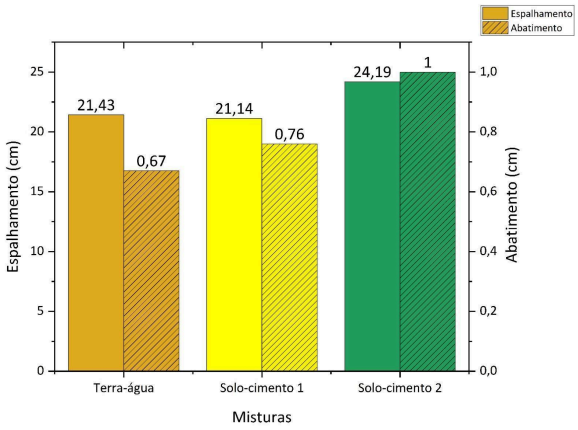
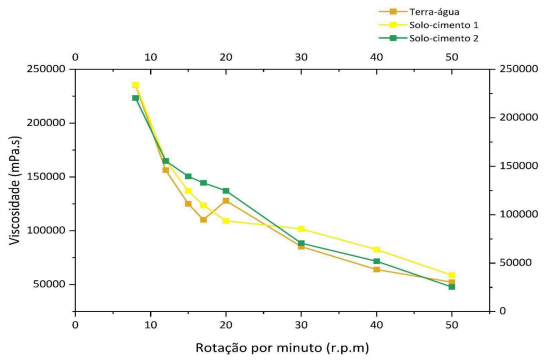


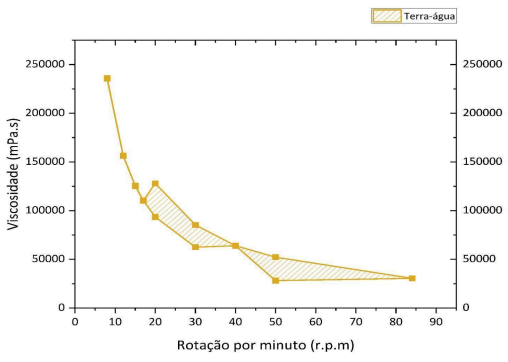
Figura 6 - Espalhamento e abatimento das composições de análise

3.1.2 Viscosidade

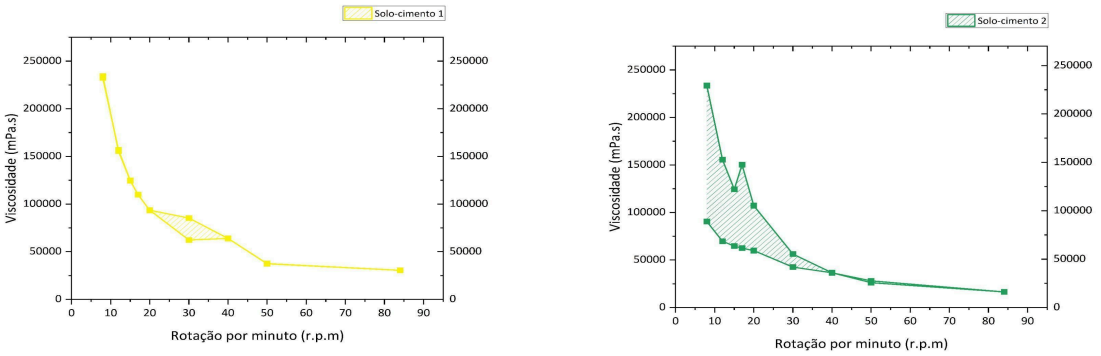
Observa-se na Figura 7 que a mistura 3DTC comportou-se de forma esperada aos estudos realizado por Nunes em que: a viscosidade diminuiu à medida que se aumentou na taxa de cisalhamento, e de forma contrária, ao reduzir a rotação, a força cisalhante nos aglomerados foram menores, e assim houve o aumento da viscosidade.



a)



b)



c) d)

Figura 7 - a) comportamento da viscosidade das 3 mistura; comportamento da viscosidade na aceleração e desaceleração das misturas b)Terra-água; c)Solo-cimento 1; e d) Solo-cimento 2

3.1.3 Massa Específica

Os resultados de massa específica estão demonstrados na Figura 8. Verifica-se que a massa específica das misturas apresentou valores aproximados entre si. Porém, Wolfs, Bos e Salet (2018) e Barbosa *et al.* (2022) encontraram valores de massa entre 2111 e 2229,5 kg/m³, valores diferentes aos apresentados na Figura 8.

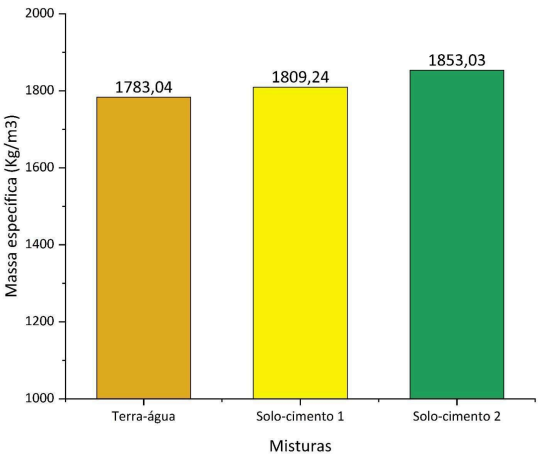


Figura 8 - Massa específica das misturas.

Com esses resultados, podemos concluir que a massa específica de compostos cimentícios 3DCP não são parâmetros para as misturas com terra 3DTC, uma vez que estes encontraram valores de massa entre 1783 e 1853 kg/m³.

3.2 Estado endurecido

3.2.1 Resistência à compressão e Flexão

Os resultados de resistência à compressão e flexão das amostras em análise são apresentados na Figura 9, na qual verifica-se a anisotropia das misturas em relação à direção dos ensaios, onde o carregamento aplicado na direção perpendicular ao sentido de impressão (direção Z). Como esperado, a mistura solo-cimento 2 (Figura 10 b) apresentou maior resistência à compressão do que a

mistura solo-cimento 1 por conter maiores índices de cimento adicionado à mistura. Porém, justifica-se também a baixa resistência a falhas na impressão da peça solo-cimento 1 como podemos verificar na (Figura 10 a). Onde alguns vazios causados pela extrusão, altura e diâmetro do bico da impressora influenciam na resistência mecânica do bloco.

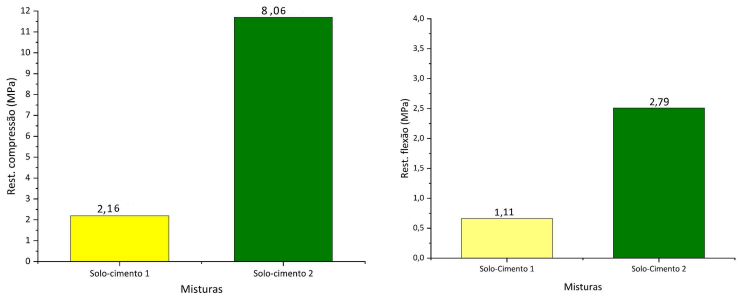


Figura 9 - Resistência à compressão e flexão

a) b)

Figura 10 - a) bloco impresso solo-cimento 1 b) bloco impresso solo-cimento 2

3.2.2 Absorção de água e Índices de Vazios

A Figura 11 mostra os resultados da absorção de água e índices de vazios, na mistura solo-cimento 2 apresentou menor absorção de água, uma justificativa para a baixa absorção em relação à mistura solo-cimento 1 é que, tendo em vista que o maior consumo de cimento nessa mistura, existe uma maior formação de hidratados diminuindo a estrutura porosa. Já que como nos ensina Olivver (2014): os espaços entre os grãos de cimento que são ocupados pela água de amassamento, vão progressivamente sendo ocupados pelos produtos hidratados que se precipitam e conduzem à redução da porosidade.

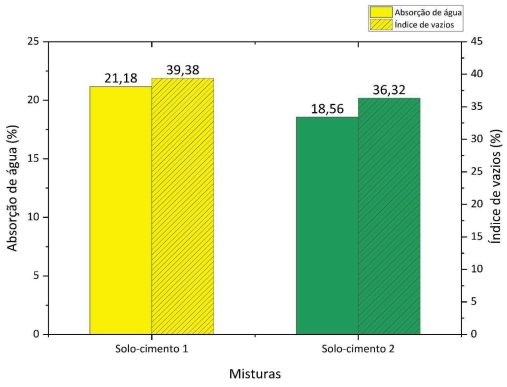


Figura 11 - Absorção de água e índices de vazios

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse estudo, podemos concluir que a pesquisa atingiu seu objetivo inicial proposto de provar que é possível imprimir uma estrutura sustentável com baixo teor de cimento com material à base de terra.

Porém a impressão 3DTC precisa encontrar seus próprios parâmetros de impressão que são divergentes da impressão com compósitos cimentícios - 3DCP.

De uma forma geral podemos concluir que:

Para mistura com terra-água para impressão teve um processo lento de endurecimento e cura, quando comparada à mistura com cimento.

Quanto maior for a quantidade de cimento Portland na mistura impressa, maiores índices resistência mecânica e menores a absorção de água.

Proposta para estudos futuros: Utilizar um solo mais arenoso visto que um solo mais argiloso tende a grudar mais nas paredes internas dos instrumentos utilizados nos ensaios, desde os processos do estágio inicial da mistura assim como na etapa final, a impressão. Além disso, o solo arenoso é mais pesado do que o argiloso que ajudaria na extrusão da mistura para impressão; Usar outros materiais, além do cimento Portland, como a Cal, o Metacaulim, o Fíler calcário, para contribuir nas propriedades de durabilidade, trabalhabilidade entre outros.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ, CAPES, FAPESQ, IFPB (PRPIPG e DIPPED/JP) pelo apoio financeiro e concessão de bolsas.

6. REFERÊNCIAS

ASAF, O., BENTUR, A,. LARIANOVSKY, P., SPRECHER, A. (2023). From soil to printed structures: A systematic approach to designing clay-based materials for 3D printing in construction and architecture. Journal of Construction and Building Materials. 408 (2023) 133783. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133783.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

BARBOSA, M. S. (2022). Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo de cimento reduzido por meio de adições minerais. Dissertação de Mestrado (PPEC) - UFRN, Natal.

COURTH, A., PEARL, N., CASTRO-SALAZAR, A., MUELLER, C., SASS, L. (2024). 3D Printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and Life Cycle Assessment. Journal of Construction and Building Materials. 421 (2024) 135714. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135714.

DIAS, L. S. (2022). Metodologia de dosagem com base em relações construtivas básicas de misturas para impressão 3D em concreto (3DCP). Dissertação de Mestrado (PPEC) - UFRN, Natal.

FALESCHINI, F., TRENTO, D., MASOOMI, M., PELLEGRINO, C., ZANINI, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. Journal of Construction and Building Materials. 398 (2023) 132496. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. Construction and Building Materials, 162, p. 613-627, 2018.

MINKE, Gernot. Manual de construção com terra - a terra como material de construção e seu uso na arquitetura. Editora Solisluna. 2022.

NUNES, G. M. (2022). Avaliação do comportamento mecânico de misturas 3DCP com substituição parcial do cimento por filer calcário e metacaulim em comparação aos materiais para alvenaria estrutural. Dissertação de Mestrado (PPEC) - UFRN, Natal.

OLLIVIER, J. P., TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: OLLIVIER, J. P., VICHOT, A. (Eds.).. Durabilidade do concreto: bases científicas para a formação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.

WOLFS, R. J. M., BOS, F. P., SALET, T. A. M. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. Construction and Building Materials, 181, p.447-454, 2018.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE REOLÓGICA DO COMPORTAMENTO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM UTILIZAÇÃO DE PÓ DE VIDRO

Caio Múcio de Lacerda Marques[a]; José Henrique Maciel de Queiroz[b]; Leonardo Ferreira Alves[c]; Victor Vinícius de Oliveira Ferreira[d]; Aline Figueirêdo da Nóbrega[e]; Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro[f]

[a]Universidade Federal da Paraíba, Campus 1. Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil, caioengcivil1985@gmail.com

[b]Universidade Federal da Paraíba, Campus 1. Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil, jhmq@academico.ufpb.br

[c]Universidade Federal da Paraíba, Campus 1. Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil, leoferalves@hotmail.com

[d]Universidade Federal da Paraíba, Campus 1. Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil, victorvoferreira@gmail.com

[e]Universidade Federal da Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário, 58429-900, Campina Grande, Brasil, alinefnobrega@hotmail.com

[f]Universidade Federal da Paraíba, Rua da Universidade, 4710-057 Braga, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

RESUMO

O presente estudo buscou analisar parâmetros reológicos de pastas cimentícias com substituição parcial de cimento Portland CPV-ARI por pó de vidro. Foram realizados os ensaios de espalhamento com mini cone e reômetro de placas paralelas em pastas cimentícias com substituição parcial do cimento por pó de vidro em teores de 25%, 35% e 50% em massa. Essas misturas continham teor constate de 0,5% de aditivo plastificante e relação água/sólidos de 0,5. Também foram analisadas duas pastas de referência para comparação dos resultados, uma contendo cimento e água, e a outra acrescentando o mesmo teor de aditivo das misturas anteriores. No ensaio de mini cone, a pasta de referência sem aditivo obteve espalhamento de 55 mm e com aditivo 155 mm. As pastas com substituição do cimento pelo pó de vidro apresentaram espalhamentos entre 160 e 168 mm. Nos resultados do reômetro de placas paralelas, observou-se maiores tensões de escoamento na mistura de referência sem aditivo em relação às utilizadas com a incorporação do aditivo. A substituição do cimento pelo pó de vidro não alterou consideravelmente a fluidez das pastas e os resultados obtidos com o reômetro e com o mini cone apesentam consistência entre si.

Palavras-chave: Reologia de Materiais, Sustentabilidade, Pastas Cimentícias.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem participação fundamental na economia mundial, setor este em crescimento constante que, por outro lado, ocasiona um desequilíbrio no meio ambiente, pois, os resíduos de construção civil causam degradação ambiental. Atualmente, a produção anual de resíduos de vidro na China é de até 7 milhões de toneladas, representando cerca de 6% dos resíduos urbanos. A maioria desses resíduos de vidro são enterrados cobrindo o solo, o que não só tem um impacto negativo no meio ambiente, mas também desperdiça recursos naturais terrestres (Yang *et al.* 2024). Trentin *et al.* (2020) indicaram que, o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, ocupando cerca de 45 % de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Em 2010, apenas 47 % do total de embalagens utilizadas no Brasil foram recicladas, ou seja, mais da metade dessas embalagens tem um destino inadequado.

Por isso, mais que uma preocupação, existe a necessidade de reinserção de produtos no ciclo de produção de que saíram ou em ciclos de outros setores. A gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam impactos socioambientais, muitas vezes irreversíveis (Santos e Ferrari 2019). Para os autores, os temas sustentabilidade e construção civil são claramente interdependentes na atualidade. A preocupação com o meio ambiente e com os resíduos gerados por todo tipo de indústria tem sido crescente. Um dos maiores desafios da sociedade moderna consiste no equilíbrio do consumo e exploração de recursos naturais e, também, na geração excessiva e disposição final dos resíduos sólidos. Uma alternativa viável seria a substituição em pastas cimentícias, como também em parte de agregado por materiais reciclados ou alternativos. No entanto, para que essas substituições sejam consideradas viáveis, diversos fatores devem ser analisados, buscando conhecer o material e o seu comportamento frente à nova aplicação (Borges 2021).

No Brasil, o vidro é um produto com produção em larga escala mas com baixo reaproveitamento. O vidro é um material comum feito a partir de recursos naturais, como a areia. Embora grande parte do lixo seja reciclado para fazer novos produtos de vidro, uma grande proporção ainda está sendo enviada para aterros sanitários. O vidro é um recurso útil que não é biodegradável, ocupando valioso espaço em aterros sanitários. Para minimizar os resíduos que se dirigem para os aterros, é necessário investigar formas alternativas de reciclagem (Harrison *et al*. 2020). Neste contexto, inúmeras pesquisas vêm abordando adições nos compósitos cimentícios a fim de substituir frações de cimento na produção de argamassas e concretos. É válido ressaltar que estas adições geralmente são oriundas de resíduos provenientes de outras indústrias, assim, além de diminuir a quantidade de materiais descartados, reduz os danos causados pelo destino inapropriado desses resíduos.

De acordo com Soares (2021), todo produto deve proporcionar bom desempenho do ponto de vista mecânico e de durabilidade, ser ecologicamente correto frente ao desenvolvimento sustentável e à disponibilidade de recursos naturais e ser economicamente viável para ser inserido em um mercado altamente competitivo. Dentro desta perspectiva, diversas pesquisas vêm sendo referenciadas à utlização do pó de vidro, como material viável na substituição de parte do cimento.

Segundo Soares (2021), o pó de vidro apresenta-se como uma boa alternativa devido à sua natureza rica em sílica e grande quantidade disponível que, em muitos casos, é descartada em aterros sanitários ou não, de maneira inadequada. O uso de resíduos de pó de vidro como um substituto parcial para o cimento é uma prática emergente para a construção sustentável à base de cimento.

Vários estudos demonstraram que o vidro finamente moído em pó poderia ser um Material Cimentício Suplementar (SCM) interessante. No entanto, o desempenho de tal material é influenciado pela composição química do vidro e sua reatividade pozolânica (Kameche *el al.* 2023). Segundo Harrison *et al.* 2020, reduzir a quantidade de cimento necessário, substituindo-o parcialmente por diferentes materiais pozolânicos, é outra opção viável para reduzir as emissões na indústria da construção. O mesmo autor conclui que o vidro residual tem o potencial de ser utilizado em todas as formas de construção.

Desta forma, o presente estudo buscou analisar parâmetros reológicos de pastas cimentícias com substituição parcial de cimento Portland CPV-ARI por pó de vidro, buscando contribuir com o conhecimento científico sobre a utilização de soluções sustentáveis para os materiais de construção atuais. O trabalho foi conduzido com metodologia experimental utilizando o pó de vidro como substituto parcial do cimento Portland, em teores de 25%, 35% e 50% em massa. Foram analisadas apenas as propriedades do material no estado fresco, mais especificamente sua fuidez e tensões de cisalhamento obtidas para determinados intervalos de taxas de cisalhamento, propriedades que influenciam na viscosidade e trabalhabilidade das pastas.

2 DADOS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida utilizando o método experimental com abordagem quantitativa, embasada por análise estatística de dados.

Foram realizados os ensaios de espalhamento com mini cone e reômetro de placas paralelas, modelo Discovery HR-1 (Figura 1). Para confecção das amostras foram utilizados os seguintes materiais: Cimento do tipo CPV – ARI – 32 MPa, pó de vidro, água potável e aditivo plastificante (MELTEX F-10).

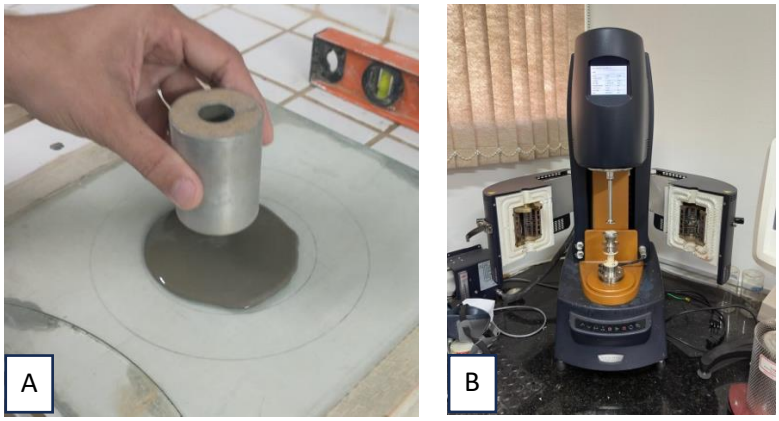


Figura 1 – Ensaios realizados com a pasta de cimento. A: mini cone, B: reômetro, modelo Discovery HR-1.

Para todas as pastas, foi utilizada uma relação água/sólidos de 0,5. A substituição do pó de vidro pelo cimento foi em massa, em teores de 25%, 35% e 50%. O teor de aditivo foi mantido constante em 0,5%. Portanto, foram realizadas cinco misturas: referencia sem aditivo (REF), referencia com aditivo (REFA), substituição de 25% (S25), substituição de 35% (S35) e substituição de 50% (S50).

As pastas foram produzidas em um misturador mecânico com velocidade angular de 1000 rpm. O procedimento de mistura foi conduzido da seguinte maneira: para a pasta de referência (REF), o

cimento foi misturado na água por dois minutos. No ensaio de referência com aditivo (REFA), após um minuto de mistura do cimento com a água, o aditivo foi adicionado e misturou-se a pasta por mais um minuto. Para a pasta com a substituição do cimento pelo pó de vidro, inicialmente, o cimento, o pó de vidro e a água foram adicionados e misturado por um minuto, em seguida foi adicionado o aditivo e a pasta foi misturada por mais um minuto.

A mistura para o ensaio do mini cone foi conduzida no Laboratório de Reologia, localizado na Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Para a realização do ensaio, o mini cone foi preenchido com a pasta e, em seguida, foi levantado na vertical. Após a estabilização da pasta e com o auxílio de uma trena, foram realizadas três medições do diâmetro e, por fim, a média das três medições foi calculada.

Para a realização do ensaio no reómetro, uma pequena quantidade da pasta foi colocada no reômetro de placas paralelas (Figura 2). O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

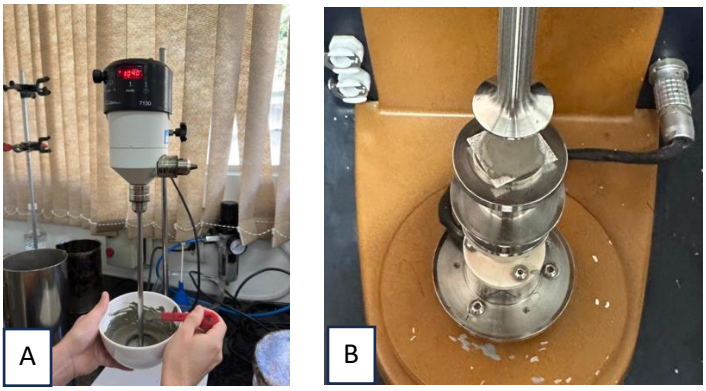


Figura 2 – A: misturador mecânico, B: ensaio no reômetro de placas paralelas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados nas pastas, foram obtidos os resultados apresentados a seguir. Primeiro, em relação ao espalhamento, obtido através do ensaio de mini cone, foi observado que a pasta de referência, sem a utilização do aditivo (REF) obteve um espalhamento de 55 mm. A mesma amostra de referência, porém com a adição do aditivo plastificante (REFA), apresentou um aumento no espalhamento na ordem 100 mm, totalizando 155 mm. Nas pastas em que houve a substituição do cimento pelo pó de vidro em suas devidas proproções S25, S35 e S50 obtiveram respectivamente, 162 mm, 168 mm e 160 mm de espelhamento. A Figura 3 apresenta graficamente os valores de espalhamento obtidos para cada pasta no ensaio, para melhor comparação dos valores.

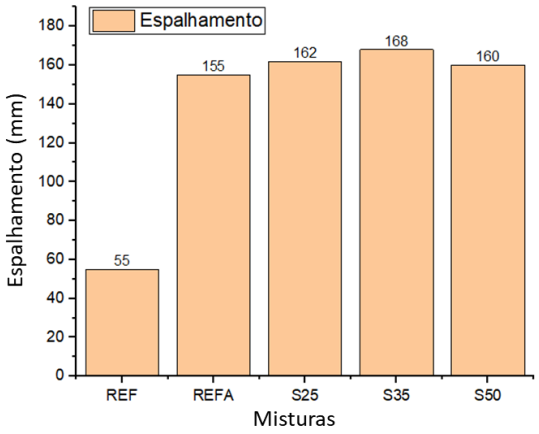


Figura 3 – Espalhamentos das misturas.

Durante a realização do ensaio de espalhamento com mini cone também foram realizados registros fotográficos dos resultados, para possibilitar uma análise visual das pastas. As fotografias obtidas são apresentadas na Figura 4 e na Figura 5:

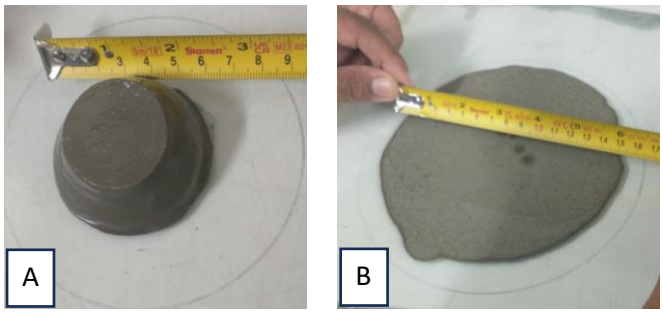


Figura 4 – Espalhamento das misturas A: REF e B: REFA

Figura 5 – Espalhamento das misturas A: S25, B: S35 e C: S50.

Pela Figura 3 e a Figura 4, observa-se que a mistura REF, por não conter aditivo, mostra-se bem menos fluida que as demais. As consistências das misturas com aditivo foram bem semelhantes, mesmo com a variação no teor de cimento e pó de vidro. Nesse sentido, percebe-se que o efeito do aditivo se sobressaiu em relação ao efeito da substituição do cimento pelo pó de vidro. Assim, o efeito da substituição não foi determinante no resultado de espalhamento medido no ensaio. Outro detalhe é que algumas misturas (REFA e S25) apresentaram irregularidades nas bordas do espalhamento, indicando a ocorrência de leve segregação dos seus componentes.

Já em relação aos resultados obtidos no ensaio realizado no reômetro de placas paralelas com as mesmas misturas, observou-se que a de referência, sem aditivo (REF), apresentou tensões de cisalhamento bem maiores se comparado as demais amostras (REFA, S25, S35 e S50), para os valores de taxa de cisalhamento do ensaio. Observa-se que as misturas contendo aditivo obtiveram resultados mais aproximados entre si de tensões de cisalhamento. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para as tensões de cisalhamento das amostras analisadas.

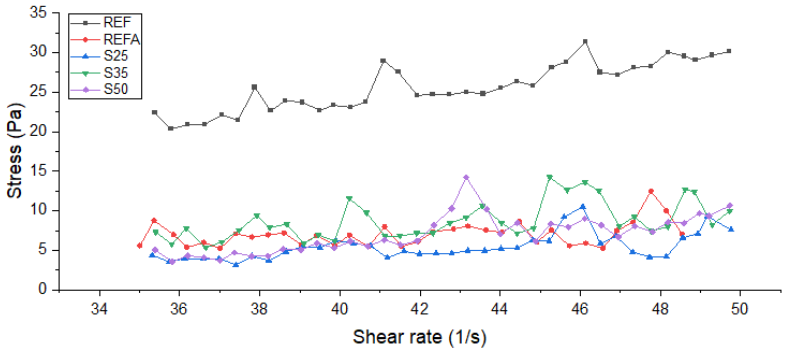


Figura 6 – Gráfico da tensão de escoamento das misturas analisadas.

Percebe-se que as tensões de cisalhamento da mistura REF variaram de 20 Pa a 32 Pa, nesse intervalo de taxas de cisalhamento entre 35 s^{-1} e 50 s^{-1}. As misturas com utilização do aditivo apresentaram tensões de cisalhamento entre 2,5 Pa e 15 Pa no mesmo intervalo de taxas de cisalhamento citado anteriormente, porém poucos valores obtidos superaram 10 Pa. Também nota-se que no geral a mistura S25 apresentou tensões de cisalhamento levemente menores que as demais, no entanto isso não ocorreu para todas as taxas de cisalhamento do intervalo.

Portanto, o ensaio com reômetro de placas paralelas confirmou o nível de fluidez semelhante entre as misturas contendo aditivo, pois para obter uma dada taxa de cisalhamento nas amostras, foram aplicadas tensões de cisalhamento com valores próximos. No entanto para a mistura REF foram aplicadas tensões de cisalhamento bem maiores para obter as mesmas taxas de cisalhamento das demais misturas.

Esses resultados indicam que o aditivo e o pó de vidro contribuíram com o aumento da fluidez dessas pastas. No entanto, não houve como distinguir o efeito individual do pó de vidro na fluidez somente com os ensaios realizados, uma vez que todas as misturas com o pó de vidro também contém o aditivo. Assim, é indicado realizar análises de misturas contendo o pó de vidro também sem o aditivo para mensurar melhor os efeitos. Nota-se que o pó de vidro não contribuiu para o aumento das tensões de cisalhamento no ensaio, o que é um indicativo de que ele pode ser um substituto do cimento portland, sendo necessárias análises mais aprofundadas para de fato afirmar a viabilidade da substituição.

4 CONCLUSÕES

Foi possível analisar nesse trabalho parâmetros reológicos de pastas cimentícias com substituição parcial de cimento Portland CPV-ARI por pó de vidro, evidenciando algumas das propriedades do material no estado fresco, como sua fuidez e tensões de cisalhamento obtidas para determinados intervalos de taxas de cisalhamento. Assim, o objetivo principal do trabalho foi alcançado.

Diante dos resultados, observa-se que a utilização do aditivo plastificante gerou grande espalhamento nas pastas em comparação com a pasta de referência. A substituição do cimento pelo pó de vidro não alterou consideravelmente a fluidez (espalhamento e tensão de cisalhamento) das pastas. Os resultados obtidos com o reômetro e com o mini cone se complementam, pois nota-se que em ambos os ensaios, a pasta de referência sem aditivo mostrou-se bem menos fluida que as demais misturas contendo aditivo.

Apesar de obter informações importantes sobre o comportamento das pastas estudadas, esse estudo não é suficente para afirmar totalmente a capacidade do pó de vidro em substituir o cimento portland nesta aplicação, uma vez que os resultados obtidos também foram influenciados pelo uso do aditivo plastificante. Recomenda-se para análises futuras realizar ensaios de pastas com outras constituições, por exemplo, com menor teor de aditivo e de pó de vidro.

REFERÊNCIAS

Borges, A. L. (2021). Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas. 144 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

Barati, K., Shen, X. (2016). Operational level emissions modelling of on-road construction equipment through field data analysis. Automation in Construction, 72(3):338-346. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.010

Benitez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J.E., Huerta-Guevara, O.F., García-León, A.M., Rueda-Avellaneda, J.F. (2021). Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context. Journal of the Air & Waste Management Association, 71(11):1415-1427. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040

Harrison, E., Berenjian, A., Seifan, M. (2020). Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. Environmental Science and Ecotechnology, v. 4.

Kameche, Z. E., Djelil, M., Dahmani, B. (2023). Effects of incorporating silica glass powder as a supplementary cementitious material on selected properties of portland cement mortar. Journal of Building Engineering, v. 78.

Santos, A. G., Ferrari, A. K. (2019). Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. Ambiente Construído, v. 19, n. 3, p. 39-51, Porto alegre.

Silva, A., Dias, J.L., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013a). Statistical models applied to service life prediction of rendered façades. Automation in Construction, 30:151–160. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.028

Silva, A., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013b). Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding directly adhered to the substrate. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2):227–235. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000588

Silva, A., Neves, R., De Brito, J. (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 50:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

Soares, S. M. (2021). Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos. 256 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

Trentin, P. O., Manica, J., Vanzetto, S. C., Marangoni, B., Zaleski, A. (2020). Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. Revista Matéria, v. 25, n. 1.

Yang, B., Li, Y., Liu, J., Shen, J., Lin, H., Gou, Q. (2024). Effect of glass powder on mechanical properties and electromagnetic transmission properties of high alumina cement paste. Journal of Building Engineering, v. 88, p. 1-16.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ADIÇÃO DE DIATOMITA SUPER-HIDROFÓBICA EM PASTAS DE GESSO

Jéssica Conceição Queiroz[a]; Cleber Marcos Ribeiro Dias[a]

[a] Pós Graduação em Engenharia Civil (PPEC), Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, n°02, Federação, 4040210-630, Salvador/BA, Brasil, jessica_queiroz22@outlook.com

[b] Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais (DCTM), Universidade Federal da Bahia - Rua Aristides Novis, n°02, Federação, 4040210-630, Salvador/BA, Brasil, clebermrd@gmail.com

RESUMO

O gesso de construção destaca-se como um aglomerante reciclável, caracterizado por um baixo consumo energético e emissão reduzida de CO_2 durante sua produção. No entanto, as misturas à base de gesso, após o processo de endurecimento, manifestam uma resistência limitada à ação da água, comprometendo sua integridade e durabilidade. A utilização de adições é uma alternativa com potencial de promover características hidrorrepelentes às pastas de gesso, visando a redução da susceptibilidade à ação da água. Neste estudo, investigaram-se os efeitos da incorporação de diatomita super-hidrofóbica nas propriedades físicas e mecânicas de pastas de gesso, empregando-se um projeto estatístico de mistura. As pastas foram submetidas a análises de módulo de elasticidade dinâmico (MOE), dureza (D), resistência à tração na flexão (R_T), resistência à compressão (R_C), porosidade (η) e ângulo de contato (θ_C). O tratamento da diatomita com o modificador de silano conferiu propriedades super-hidrofóbicas à diatomita (θ_C > 150°). O aumento da fração mássica de pasta de diatomita super-hidrofóbica e etanol nas formulações não promoveu o aumento do θ_C como esperado e, reduziu MOE, R_T e R_C, devido ao emprego de etanol nas pastas que resultou em alteração na estrutura cristalina e aumento da porosidade.

Palavras-chave: gesso, diatomita super-hidrofóbica, ângulo de contato.

1 INTRODUÇÃO

O gesso é um material de baixo consumo energético (LI; Yu; KIM, 2022), com uma temperatura de produção significativamente menor do que outros ligantes de construção (DOLEZELOVÁ *et al.*, 2022). Isso resulta em menores emissões de CO_2, uma vez que a temperatura de produção do gesso não ultrapassa 350°C, em contraste com o clínquer Portland (1.450°C) e a cal (800°C a 1.100°C). Além disso, o processo natural de hidratação e desidratação torna o gesso um recurso sustentável que pode ser reciclado indefinidamente (ARBELE *et al.*, 2010).

A utilização do gesso como material de construção, apesar das vantagens do uso, apresenta algumas limitações, como alta solubilidade, permeabilidade e porosidade, baixa resistência à compressão e à tração, que torna o uso desse material limitado a ambientes internos e em peças sem fins estruturais (WU *et al*., 2019; RAN; CHEN; SU, 2022). A susceptibilidade do gesso à ação da água representa um desafio significativo para a potencialização da sua utilização no mercado (DOLEZELOVÁ *et al*., 2022), pois pode ocasionar em sua deterioração (ABERLE *et al.*, 2010), comprometendo resistência e durabilidade ao longo do tempo. As propriedades mecânicas do gesso são altamente sensíveis à presença de água (CASELLE *et al*., 2022) e ao entrar em contato com água, as propriedades mecânicas (dureza, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade) reduzem (SCHUG *et al.*, 2017).

A incorporação de aditivos químicos ou materiais complementares às pastas de gesso tornou-se alternativa a produção de novos produtos à base de gesso, com o intuito de aprimorar ou modificar as propriedades físicas e mecânicas do material, conferindo-lhe características específicas para atender as demandas de utilização. Esses aditivos podem promover alterações significativas na resistência, plasticidade, tempo de endurecimento e durabilidade do material.

Neste contexto, pesquisas foram realizadas com a adição de diversos materiais, incluindo solo de turfa (RAN; CHEN; SU, 2022; MINISKOV, 2018), agente impermeabilizante de organossilício (LI *et al*., 2021), resíduos de plásticos (BARRIGUETE *et al*., 2020), emulsão de estireno-acrílico modificado com silano (WU *et al*., 2019), areia fina ou ultrafina, sílica ativa, sílica gel, casca de arroz, escória, carbonato de cálcio ou acetato de polivinila (PVA) (KHALIL *et al*., 2018) e modificador sintético com pó metalúrgico e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (PERVYSHIN *et al*., 2017) para melhorar a resistência à ação da água do gesso e seus produtos, tornando-os adequados para uso em ambientes externos e úmidos.

A diatomita é uma rocha siliciosa composta principalmente de esqueletos fossilizados de diatomáceas, quimicamente estável e inerte. Com base na química de sua superfície, possui micro e nano porosidade e nano rugosidade que pode aumentar a absorção ou repelir à água (SIMPSON; HUNTER; AYTUG, 2015). Devido à sua porosidade e baixa densidade, a diatomita é usada na fabricação de materiais de construção leves e isolantes térmicos (LI *et al*., 2022). Além disso, é empregada na produção de revestimentos duráveis com propriedades super-hidrofóbicas e resistência à abrasão, resultando em ângulos de contato com a água superiores a 150° (NGUYEN *et al*., 2021). Ainda segundo o autor, o tratamento com silano, conhecido como silanização, pode reduzir a energia superficial dessas superfícies.

A adição de diatomita super-hidrofóbica em pastas de gesso é uma alternativa ainda não explorada na literatura. A diatomita, após o tratamento, adquire propriedades super-hidrofóbicas que apresentam um grande potencial para melhorar a resistência do gesso à água. No entanto, os efeitos dessa interação entre os materiais, ainda são desconhecidos. Este artigo, avalia a influência da diatomita super-hidrofóbica nas propriedades mecânicas e físicas de pastas de gesso, empregando-se um projeto

estatístico de mistura. Os resultados buscam contribuir para desenvolver produtos à base de gesso com melhor resistência à água e desempenho mecânico.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram: a) gesso comercial de fundição para construção civil; b) a diatomita (in natura) a qual passou por um tratamento com o octiltrietoxissilano e etanol; e c) água. O octiltrietoxissilano é um alcóxido organossilano com quatro cadeias laterais de éster etílico que fornece um revestimento hidrofóbico com baixa energia de superfície, apresentando ângulo de contato com a água na faixa de 150 a 170° e apresenta fórmula molecular C14H32O3Si. O etanol absoluto etílico anidro 99,3° INPM foi utilizado como solvente.

O gesso apresentou densidade de 2,586 g/cm^3 ± 0,003 e a diatomita (*in natura*) 2,381 g/cm^3 ± 0,004 determinadas por meio da picnometria a gás hélio, utilizando um picnômetro Micromeritics AccuPyc II 1340. As áreas superficiais específicas do gesso 3,20 m^2/g e da diatomita (in natura) 14,45 m^2/g foram determinadas por meio do método B.E.T (Brunauer, Emmett, Teller) utilizando um analisador de área superficial da Micromeritics, modelo Gemini VII. As amostras foram secas em atmosfera com nitrogênio gasoso durante 24 horas a 50 °C.

As composições químicas do gesso e da diatomita foram determinadas por meio da técnica de fluorescência de raios-X (FRX), na forma de óxidos, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X, marca PNalytical, modelo MiniPal4. Os resultados encontrados para a amostra de gesso mostram que, conforme esperado, o material é constituído majoritariamente de SO_3 (52,53%) e CaO (39,24%), SrO (0,13%) e perda ao fogo por aquecimento a 1000 °C de 8,10% . Assim, verificou-se que a composição química do gesso está de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 13.207 (ABNT, 2017).

A diatomita (*in natura*) apresentou um alto teor de SiO_2 (85,55%), principal óxido presente na composição química da diatomita conforme literatura, CaO (2,29%), K_2O (0,36%), TiO_2 (0,13%), Fe_2O_3 (0,99%), Cl (0,48%) e perda ao fogo por aquecimento a 1000 °C de 10,20%.

A identificação das fases mineralógicas foi realizada por meio da difração de raios-X (DRX) utilizando um difratômetro de raios-X Bruker, modelo D2 Phaser, com tubo de alvo de cobre de 30 kV e 10 mA. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de 2θ de 5° a 90°, no modo contínuo, à taxa de 0,1º/s. A análise do difratograma do gesso, conforme ilustrado na Figura 1a, revela a presença de picos característicos da bassanita (B) ($CaSO_4.0,5H_2O$) e da anidrita (A) ($CaSO_4$). Os resultados indicam que a amostra consiste principalmente em hemidrato (bassanita), sendo que a anidrita é formada durante o processo de calcinação, quando o hemidrato é exposto a temperaturas acima de 180°C.

No difratograma da diatomita (*in natura*), ilustrado na Figura 1, foi observada a presença de picos característicos da fase cristalina da cristobalita, um polimorfo do dióxido de silício [SiO_2], principal composto constituinte da diatomita.

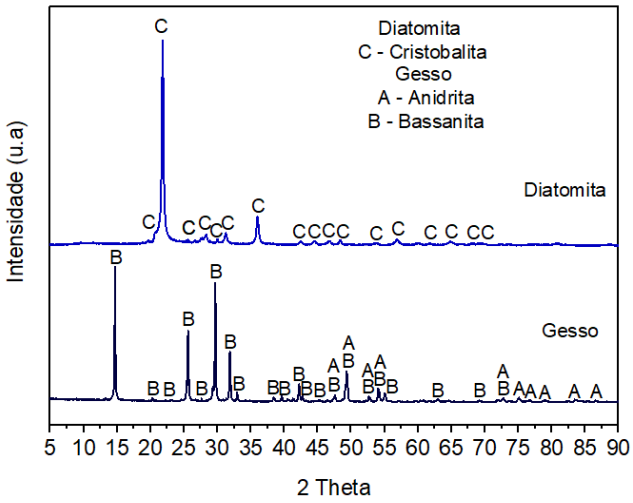


Figura 1 - Difratogramas de raios-X, com identificação de fases cristalinas da diatomita *in natura* e do gesso de fundição.

2.2 ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DA DIATOMITA SUPER-HIDROFÓBICA

Utilizando o software Design-expert® e a metodologia de superfície de resposta, foi elaborado um projeto estatístico com dezesseis séries, variando o tempo (T) entre 10 e 120 minutos e a concentração de octiltrietoxissilano (OTS) entre 10% e 50% em relação à massa de diatomita, com o intuito de analisar os efeitos principais e de interação entre esses fatores no ângulo de contato das formulações, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Experimentos do projeto estatístico para determinação do percentual de OTS e do tempo de tratamento para o estudo dos efeitos da diatomita nas propriedades de pastas de gesso.

Experimento	Tempo (min)	OTS (%)
1 e 15	120,00	45,18
2	39,15	21,40
3, 5, 6	65,00	30,00
4	10,00	50,00
7	120,00	10,00
8	10,00	28,80
9	98,55	34,60
10	118,35	23,20
11 e 16	67,20	50,00
12	37,50	40,00
13	73,25	10,00
14	23,75	10,00
Mínimo	**10,00**	**10,00**
Máximo	**120,00**	**50,00**

Obs.: As séries 3, 5 e 6 correspondem a formulação do centroide e as séries, 1 e 15, 11 e 16 representam a repetição de pontos no design.

As quantidades de diatomita e álcool foram mantidas constantes em 20 g e 100 ml, respectivamente, em todos os experimentos. A resposta experimental foi o ângulo de contato (θ_C), usado para caracterizar a hidrofobicidade da diatomita tratada.

O processo de mistura foi realizado em um misturador magnético Hamilton Beach Brands, modelo HMD200, com potência de 300 W e capacidade de 800 ml. Inicialmente, os líquidos (etanol e octiltrietoxissilano) foram misturados por 5 minutos e, em seguida, a diatomita foi adicionada e misturada por 120 minutos à temperatura ambiente. Após a mistura, a suspensão foi filtrada e a diatomita foi lavada com etanol para remover o excesso de silano, seguido por secagem em estufa a 80°C por 24 horas para remover o solvente.

2.3 PROJETO ESTATÍSTICO DE MISTURA

Foi elaborado um projeto estatístico de mistura utilizando o *software Design-expert®* com a metodologia *I-Optimal Design*, permitindo a criação de modelos de previsão das propriedades das pastas com base nas proporções dos ingredientes nas misturas, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 - Formulações do projeto estatístico de mistura para o estudo dos efeitos da diatomita tratada nas propriedades de pastas de gesso.

Formulações	**Frações mássicas**			X_{H2O}/X_G	X_{DT}	X_A	X_{DT}/X_G
	X_G	X_P	X_{H2O}				
1	0,5184	0,1016	0,3800	0,7330	0,0678	0,0338	0,1307
2	0,3925	0,2275	0,3800	0,9682	0,1518	0,0758	0,3867
3, 4, 10, 11 e 13	0,4850	0,1550	0,3600	0,7423	0,1034	0,0516	0,2132
5	0,6200	0,0000	0,3800	0,6129	0,0000	0,0000	0,0000
6 e 14	0,3500	0,2781	0,3719	1,0625	0,1855	0,0926	0,5301
7	0,3500	0,3100	0,3400	0,9714	0,2068	0,1032	0,5908
8	0,4425	0,2175	0,3400	0,7684	0,1451	0,0724	0,3279
9	0,5629	0,0571	0,3800	0,6751	0,0381	0,0190	0,0677
12	0,4585	0,1615	0,3800	0,8288	0,1077	0,0538	0,2349
15	0,3927	0,2673	0,3400	0,8658	0,1783	0,0890	0,4540
16 e 18	0,6200	0,0219	0,3581	0,5776	0,0146	0,0073	0,0235
17 e 19	0,5686	0,0914	0,3400	0,5979	0,0609	0,0304	0,1072
Mínimo	**0,3500**	**0,0000**	**0,3400**	**0,5776**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
Máximo	**0,6200**	**0,3100**	**0,3800**	**1,0625**	**0,2068**	**0,1032**	**0,5908**

Obs.: As séries 3, 4, 10, 11 e 13 correspondem a formulação do centroide e as séries, 6 e 14, 16 e 18 e 17 e 19 representam a repetição de pontos do projeto.

Devido às dificuldades na dispersão da diatomita super-hidrofóbica em água, foi necessário adicionar etanol como dispersante para facilitar sua incorporação na pasta de gesso, um desafio observado também no estudo de Predajas *et al*. (2022). Este estudo destacou que a incorporação homogênea de cargas hidrofóbicas em compósitos de gesso é desafiadora devido à presença de água, necessária para

a hidratação do gesso, o que pode resultar na aglomeração do material hidrofóbico. Os limites das frações mássicas dos três componentes gesso, pasta (diatomita super-hidrofóbica e etanol) e água são apresentados no Quadro 2, e foram definidos a partir de testes preliminares, uma vez que, não foram encontrados na literatura, estudos relacionados à utilização de diatomita super-hidrofóbica em pastas de gesso.

2.4 PRODUÇÃO DAS PASTAS DE GESSO COM ADIÇÃO DE DIATOMITA SUPER-HIDROFÓBICA

Inicialmente, o gesso foi espalhado sobre a água por um minuto e deixado em repouso por dois minutos. Enquanto isso, a diatomita tratada foi misturada ao etanol para ser adicionada à pasta de gesso após o período de repouso. A mistura foi continuamente agitada por um minuto para assegurar sua homogeneização, sendo então transferida rapidamente para um molde prismático de dimensões (25 x 25 x 90) mm. Após o início do endurecimento do gesso, a superfície da amostra foi nivelada com uma espátula, sem alisar. Após completa solidificação da pasta, o desmolde foi realizado. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram colocados e mantidos em uma estufa a 45 °C até alcançar constância de massa. Após a cura, as amostras foram submetidas às análises do módulo de elasticidade dinâmico (MOE), dureza superficial (D), resistência à tração na flexão (R_T), resistência à compressão (R_C), porosidade (η) e ângulo de contato (θ_C).

2.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Após a estabilização das massas, aos 8 dias em estufa a 45 °C, os corpos de prova foram submetidos a ensaios para determinar suas propriedades mecânicas. A dureza superficial (D) foi medida em uma prensa universal de ensaios INSTRON, modelo 23-5D, com célula de carga de 5 kN, seguindo procedimentos adaptados NBR 12129 (ABNT, 2019).

Para calcular o módulo de elasticidade dinâmico (MOE), foi utilizada a técnica de excitação por impulso com o equipamento Sonelastic® da ATCP, modelo AS-BC, empregando o modo de vibração flexional (módulo de elasticidade longitudinal) conforme procedimentos da ASTM E 1876:2015 e ASTM-C215:2014.

A resistência à tração na flexão (R_T) foi determinada com adaptações da NBR 13.279 (ABNT, 2005), utilizando uma máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 23-5D, com célula de carga de 5 kN. O ensaio de flexão de três pontos foi aplicado, com carga no centro do corpo de prova bi-apoiado em um vão de 56 mm, e taxa de carregamento de 50 kN/s.

A resistência à compressão (R_C) foi avaliada conforme adaptações NBR 13.279 (ABNT, 2005), em uma máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 23-200, com célula de carga de 200 kN. Foi aplicada carga axial em ambas as partes do corpo de prova prismático, rompido à flexão, e o valor médio obtido entre os lados foi considerado como resistência à compressão. A taxa de carregamento utilizada foi de 500 N/s.

2.6 POROSIDADE

A porosidade dos corpos de prova de gesso foi determinada através da Equação 1.

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}}\right).100 \quad (1)$$

Sendo: η a porosidade, ρ_{ap} a massa específica aparente e ρ_{real} a massa específica real do corpo de prova.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi calculada utilizando a relação entre a massa do corpo de prova e o volume aparente, obtido pela média de três determinações da largura, espessura e comprimento. Já a massa específica real (ρ_{real}) foi determinada por picnometria a gás hélio, utilizando um picnômetro Micromeritics, modelo Accu Pyc II 1340. Amostras passantes na peneira de malha 150 µm foram utilizadas após moagem dos fragmentos dos corpos de prova em almofariz e secagem em estufa a 45°C até a estabilização de suas massas.

2.7 ÂNGULO DE CONTATO

O ângulo de contato (θ_C) foi medido utilizando a técnica da gota séssil. Uma gota de água com volume de 100 µl foi depositada nas superfícies laterais e inferior das amostras, enquanto vídeos em resolução 4K foram gravados por um smartphone com câmera dupla de 12 megapixels. Os vídeos registraram o contato inicial da gota com a superfície sólida, permitindo a medição do ângulo de contato por meio do software ImageJ, que possui um plugin para essa finalidade. Para análises estatísticas, o valor de θ_C utilizado foi a média dos ângulos de contato das superfícies da amostra, medidos no momento inicial de contato entre a gota e a superfície, ou seja, quando t = 0 s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DA DIATOMITA SUPER-HIDROFÓBICA

O Quadro 3 resume os ângulos de contato (θ_C) de cada experimento. Os experimentos 1 e 15, com um tempo de tratamento de 120 minutos e uma concentração de modificador de silano de 45,18%, resultaram em superfícies super-hidrofóbicas ($\theta_C > 150°$), enquanto os demais experimentos no projeto estatístico exibiram superfícies classificadas como hidrofóbicas ($90° < \theta_C < 150°$).

Quadro 3 - Experimentos do projeto estatístico para determinação do percentual de OTS e do tempo de tratamento da diatomita e a propriedade ângulo de contato analisada.

Experimento	Tempo (min)	OTS (%)	θc
1	120,00	45,18	150,70
2	39,15	21,40	136,48
3*	65,00	30,00	138,25
4	10,00	50,00	*Outlier*
5*	65,00	30,00	140,12
6*	65,00	30,00	137,43
7	120,00	10,00	132,78
8	10,00	28,80	132,11
9	98,55	34,60	140,69
10	118,35	23,20	137,15
11	67,20	50,00	132,44

Experimento	Tempo (min)	OTS (%)	θc
12	37,50	40,00	136,63
13	73,25	10,00	128,31
14	23,75	10,00	126,07
15	120,00	45,18	151,87
16	67,20	50,00	135,22
Mínimo	**10,00**	**10,00**	**123,58**
Máximo	**120,00**	**50,00**	**151,87**

Obs.: *As séries 3, 5 e 6 correspondem a formulação do centroide.

O gráfico na Figura 2 revela que os ângulos de contato mais altos ocorrem em áreas com maior concentração de OTS e tempos de tratamento mais longos. Assim, foi decidido utilizar uma concentração de 45,18% de OTS em relação à massa de diatomita e um tempo de tratamento de 120 minutos. Após o tratamento (Figura 5), a hidrofobicidade da diatomita foi avaliada pelo ângulo de contato, que atingiu 151,92°, classificando-a como super-hidrofóbica ($\theta_C > 150°$).

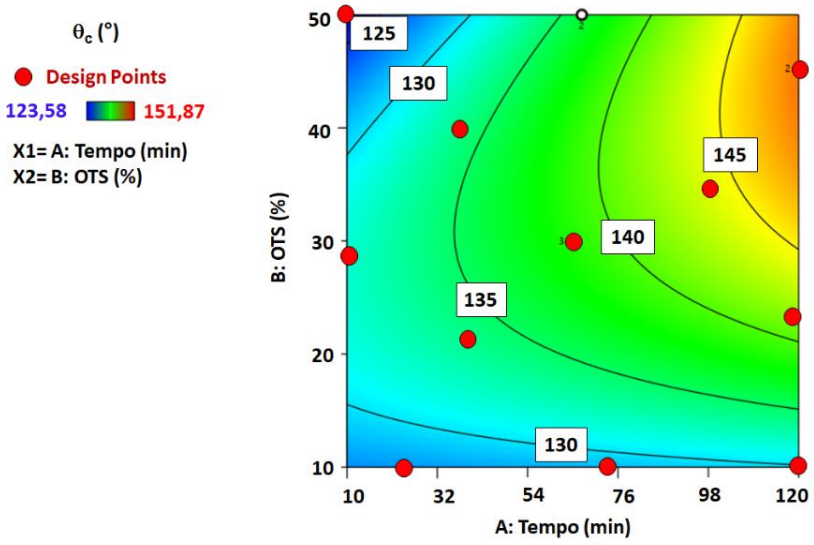


Figura 2 - Diagrama para influência do tempo de tratamento (T) e do percentual de modificador de silano (OTS) no ângulo de contato (θ_C) da diatomita tratada.

3.2 EFEITOS DA DIATOMITA SUPER-HIDROFÓBICA NAS PROPRIEDADES DAS PASTAS DE GESSO

A Quadro 4 resume as propriedades das formulações base. A variação das frações mássicas dos ingredientes resultou em variações nas propriedades no estudo experimental. O módulo de elasticidade (MOE) dos corpos de prova variou de 2,19 a 7,38 GPa. A dureza (D) variou de 10,62 N/mm^2 a 41,90 N/mm^2. A resistência à tração (R_T) variou de 1,27 MPa a 5,96 MPa, enquanto a resistência à compressão (R_C) variou de 1,0 MPa a 11,86 MPa. A porosidade (η) variou de 50,45% a 65,92%, enquanto o ângulo de contato (θ_C) variou de 22,51° a 85,75°. Todas as formulações exibiram ângulos de contato inferiores a 90°, caracterizando-as como hidrofílicas ($\theta_C < 90°$).

De acordo com os resultados obtidos, há correlações lineares positivas significativas entre a fração mássica X_G e as propriedades mecânicas MOE (0,98), D (0,97), R_T (0,97) e R_C (0,99), refletindo que um

aumento na fração mássica de gesso está associado ao aumento dessas propriedades. Além disso, uma correlação linear negativa forte é observada entre a fração mássica X_G e η (-0,99), indicando que um aumento na fração mássica de gesso reduz a porosidade. De acordo com Chen *et al*. (2022), aumentar o teor de gesso cria uma estrutura interna mais compacta, com mais ligações intercristalinas e menos poros, resulta em redução da porosidade e aumento da resistência do material. Os autores citados, enfatizam a importância da compacidade estrutural e organização cristalina na resistência do gesso. Quanto mais densa a estrutura, maior a resistência.

Quadro 4 - Formulações do projeto estatístico de mistura com os ingredientes gesso, água e pasta de diatomita super-hidrofóbica e etanol e as propriedades analisadas do gesso conformado.

Formulações	**MOE (GPa)**	**D (N/mm^2)**	**R_T (MPa)**	**R_C (MPa)**	**η (%)**	**θ (°)**
1	4,66	15,85	3,28	7,15	57,31	72,46
2	2,72	6,77	1,63	2,81	64,86	74,82
3	4,55	14,92	3,46	6,33	59,59	60,74
4	4,38	14,32	3,35	6,09	58,56	65,27
5	6,83	26,11	5,38	11,86	51,24	22,51
6	2,36	5,74	1,41	*Outlier**	65,41	85,75
7	2,52	6,14	1,50	1,97	65,10	77,78
8	3,68	11,64	2,66	4,99	60,24	72,11
9	5,49	21,41	4,18	8,84	55,01	51,40
10	4,26	14,86	3,39	6,45	59,14	80,36
11	4,42	14,59	4,15	6,53	58,63	56,48
12	3,57	10,74	2,54	4,82	61,89	76,47
13	4,37	13,92	3,34	6,24	59,28	37,73
14	2,19	5,88	1,27	1,00	65,92	75,72
15	3,17	8,12	1,78	3,32	62,62	60,28
16	7,38	30,15	5,96	11,52	50,45	82,15
17	6,44	25,95	4,87	10,58	52,87	79,84
18	7,25	32,51	5,62	11,85	50,81	63,23
19	6,10	25,43	5,42	9,78	52,78	79,80
Mínimo	**2,19**	**5,74**	**1,27**	**1,00**	**50,45**	**22,51**
Máximo	**7,38**	**32,51**	**5,96**	**11,86**	**65,92**	**85,75**

Obs.1: As séries 3, 4, 10, 11 e 13 correspondem a formulação do centroide e as séries, 6 e 14, 16 e 18, 17 e 19 representam a repetição de pontos no design.

Em relação à influência da diatomita super-hidrofóbica, foram observadas correlações lineares negativas entre a fração mássica X_P e propriedades mecânicas (MOE, D, R_T e R_C) de -0,95, -0,93, -0,94 e -0,96, respectivamente, indicando que o aumento de X_P está associado à redução dessas

propriedades. Além disso, uma forte correlação positiva de 0,95 entre X_P e η sugere um aumento na porosidade com o aumento de X_P, relacionado à diminuição das propriedades mecânicas. O aumento da porosidade e a consequente redução das propriedades mecânicas, devido à adição da pasta de diatomita super-hidrofóbica e álcool nas misturas, podem ser atribuídos a mudanças na estrutura cristalina do gesso, resultando em uma estrutura menos compacta e mais porosa.

A adição de etanol à mistura, juntamente com a água presente, provavelmente reduziu a solubilidade do gesso, impactando o processo de cristalização e crescimento dos cristais, resultando em uma matriz mais porosa. Estudos anteriores (GOMIS *et al*. 2013; PEARSON *et al*. 2015; SASSONI *et al*. 2018), corroboram essa observação, indicando que o etanol adicionado a soluções aquosas pode diminuir a solubilidade do gesso em até 30% quando presente em uma proporção de 30% em peso na água. Além disso, a evaporação do etanol pode ter contribuído para o aumento da porosidade da matriz, gerando vazios na estrutura.

Foram encontradas correlações negativas significativas entre a relação X_{H2O}/X_G e propriedades mecânicas (MOE, D, R_T e R_C) de -0,95, -0,93, -0,94 e -0,96, respectivamente. Isso confirma que o aumento da relação água/gesso está inversamente ligado à resistência mecânica, resultando em sua redução. Além disso, uma correlação positiva (0,96) foi observada com a porosidade, indicando que um aumento na relação X_{H2O}/X_G está associado a um aumento na porosidade. O acréscimo de água na mistura amplia o espaçamento intercristalino, afastando os cristais e resultando em maior espaçamento entre os núcleos de cristalização, o que leva a uma maior porosidade. Durante o processo de cristalização, a evaporação do excesso de água também contribui para a formação de poros, aumentando ainda mais a porosidade e reduzindo a resistência mecânica.

Os modelos empregados para ajuste das propriedades das pastas em função das frações mássicas dos componentes são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Modelos empregados para ajuste das propriedades das pastas em função das frações mássicas dos componentes.

Equações dos modelos	***R^2 adj.***	***R^2 pred***
$\mathrm{MOE} = 23{,}90\mathrm{X_G} - 8{,}92\mathrm{X_P} - 20{,}98\mathrm{X_{H2O}} - 25{,}84\mathrm{X}_G\mathrm{X_P} + 65{,}10\mathrm{X_P X_{H2O}}$	0,9951	0,9932
$\mathrm{D} = 147{,}77\mathrm{X_G} - 144{,}92\mathrm{X_P} - 169{,}13\mathrm{X_{H2O}} - 204{,}64\mathrm{X}_G\mathrm{X_P} + 746{,}62\mathrm{X_P X_{H2O}}$	0,9930	0,9864
$\mathrm{R_T} = 16{,}64\mathrm{X_G} + 0{,}30\mathrm{X_P} - 13{,}04\mathrm{X_{H2O}}$	0,9593	0,9505
$\mathrm{R_c} = 33{,}64\mathrm{X_G} - 5{,}03\mathrm{X_P} - 25{,}24\mathrm{X_{H2O}}$	0,9904	0,9858
$\eta = 10{,}81\mathrm{X_G} + 49{,}71\mathrm{X_P} + 117{,}13\mathrm{X_{H2O}} + 50{,}93\mathrm{X}_G\mathrm{X_P}$	0,9929	0,9899
$\theta_\mathrm{C} = 113{,}87\mathrm{X_G} + 75{,}53\mathrm{X_P} + 110{,}65\mathrm{X_{H2O}} - 115{,}02\mathrm{X}_G\mathrm{X_P} - 705{,}64\mathrm{X_P X_{H2O}} + 1403{,}07\mathrm{X}_G\mathrm{X_P X_{H2O}}$	0,5940	0,4121

3.3 OTIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA E VALIDAÇÃO DOS DADOS

Foram selecionadas três formulações otimizadas visando maximizar o ângulo de contato, resistência à compressão, tração e dureza superficial. Nessas formulações, a quantidade de pasta de diatomita foi

minimizada devido à sua redução das propriedades mecânicas, e o aumento da fração de XP não resultou no aumento desejado do ângulo de contato.

Na otimizada 1 (OTM 1), a variável X_{H2O} foi minimizada, enquanto na otimizada 2 (OTM 2), foi estabelecido um valor-alvo para a fração mássica de água de 0,36, e na otimizada 3 (OTM 3), foi maximizada. As frações mássicas X_G foram mantidas dentro de limites definidos. A desejabilidade global foi de 1,0 para OTM 1, 0,96 para OTM 2 e 1,0 para OTM 3, com o objetivo de alcançar ângulos de contato mais altos e resistência mecânica superior, tornando as formulações adequadas para ambientes úmidos. Esses critérios também garantiram a conformidade dos projetos estatísticos de mistura com as condições estabelecidas. A Quadro 6 apresenta as frações mássicas dos materiais nas três formulações otimizadas selecionadas, junto com suas respectivas relações água/gesso.

Quadro 6 - Frações mássicas das formulações otimizadas em função dos parâmetros requeridos para a pasta de gesso.

Formulações	**Frações mássicas**			**X_P**		**X_{H2O}/X_G**
	X_G	**X_P**	**X_{H2O}**	**X_{DT}**	**X_A**	
OTM 01	0,6200	0,0400	0,3400	0,0267	0,0133	0,5484
OTM 02	0,6200	0,0200	0,3600	0,0133	0,0067	0,5806
OTM 03	0,5820	0,0380	0,3800	0,0253	0,0127	0,6529

Os resultados das propriedades das formulações estão resumidos no Quadro 7, mostrando que os modelos otimizados foram eficazes na previsão das propriedades, com uma margem de erro baixa. Os valores medidos para as propriedades mecânicas (D, R_T, R_C) e θ_C estão dentro do intervalo de confiança para um nível de 95% de confiabilidade.

Na Figura 8, as imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostram a formulação de referência (a/g = 0,61) e as otimizadas 1, 2 e 3. Na formulação de referência, composta apenas por gesso puro, os cristais alongados em formato de agulha estão interligados de forma aleatória, com alguns vazios entre eles. As análises microscópicas revelam alterações na morfologia dos cristais de gesso devido à adição de pasta de diatomita super-hidrofóbica e etanol. Nas formulações otimizadas, que incluem diatomita tratada com silano, os cristais de sulfato de cálcio dihidratado são irregulares, em formato de agulhas mais curtas e menos interligados, com presença de cristais em forma de placas e vazios entre eles, aumentando a porosidade da matriz.

Na OTM 3, os cristais em forma de agulhas diminuem significativamente, tornando-se mais curtos e menos definidos, enquanto outros cristais sem geometria definida e em forma de placa estão desordenados. Vazios entre os cristais indicam uma menor interligação. Nas otimizadas, a forma de discos da diatomita tratada não é claramente visível devido à minimização da pasta de diatomita tratada e à presença de etanol nas formulações, sugerindo possível ocorrência de lixiviação química durante a mistura, reduzindo os cristais para tamanhos menores.

Quadro 7- Valores previstos e medidos da propriedade ângulo de contato (θ_C) para as formulações otimizadas das pastas de gesso.

Formulações otimizadas	Respostas	Valor previsto pelo modelo	Intervalo de confiança (95%)		Resultado experimental	Erro (%)
			Limite Inferior	Limite Superior		
OTM 1	D (N/mm^2)	33,40	32,19	34,60	33,62	0,66
	R_T (MPa)	5,90	5,55	6,24	5,94	0,68
	R_C (MPa)	12,08	11,69	12,46	12,08	0,00
	θ_C (°)	96,00	78,11	113,88	96,03	0,03
OTM 2	D (N/mm^2)	30,67	29,85	31,49	31,42	2,45
	R_T (MPa)	5,63	5,35	5,90	5,74	1,95
	R_C (MPa)	11,67	11,38	11,96	11,71	0,34
	θ_C (°)	70,15	59,42	80,89	75,91	8,21
OTM 3	D (N/mm^2)	22,54	21,71	23,38	22,95	1,82
	R_T (MPa)	4,75	4,46	5,03	4,83	1,68
	R_C (MPa)	9,81	9,52	10,10	10,11	3,06
	θ_C (°)	47,07	36,75	57,40	48,44	2,91

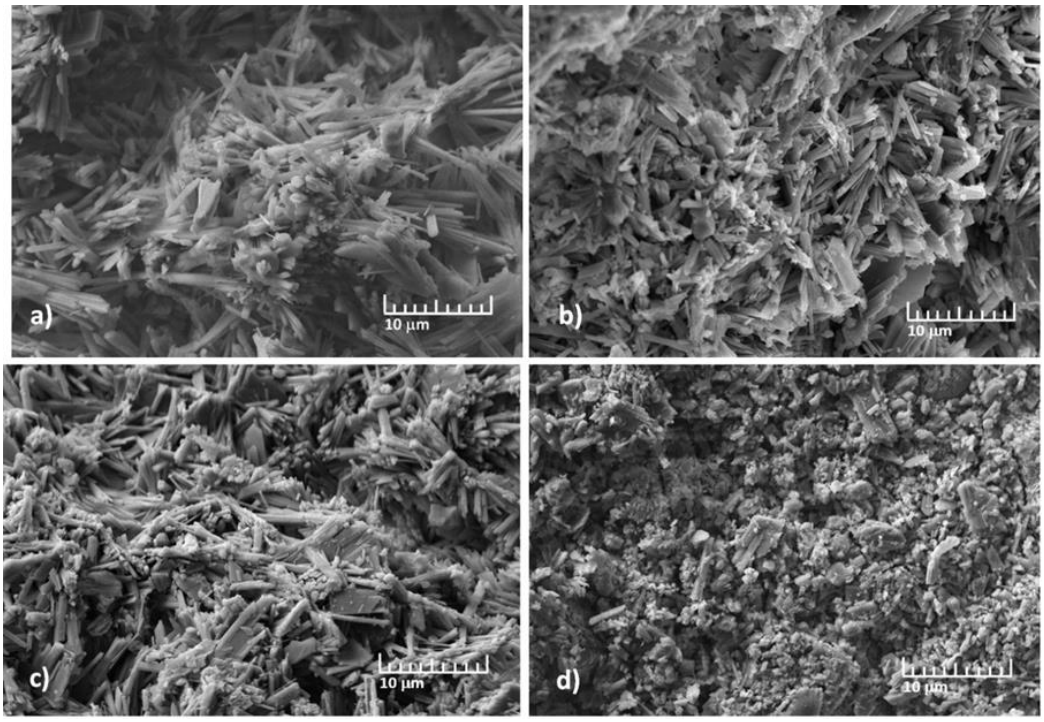


Figura 3 - Micrografias obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura: a) formulação referência; b) OTM 1; c) OTM 2; e d) OTM 3.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da diatomita super-hidrofóbica com modificador de silano (OTS), possibilitou concluir que maior concentração de OTS e maior tempo de tratamento conferiu a diatomita propriedades super-hidrofóbicas como repelência à água e ângulo de contato de 151,92° > 150°.

O estudo dos efeitos da diatomita tratada nas propriedades da pasta de gesso, possibilitou concluir que o aumento da fração mássica da pasta de diatomita tratada e etanol resulta na redução das propriedades mecânicas e no aumento da porosidade das pastas de gesso devido às mudanças na morfologia dos cristais, ao aumento da porosidade e a presença de etanol nas misturas.

O efeito esperado no aumento do ângulo de contato com o aumento da fração mássica da pasta de diatomita super-hidrofóbica não aconteceu, os ângulos de contato obtidos ainda classificaram o material como hidrofílico ($\theta_C < 90°$), possivelmente devido ao aumento da porosidade do material e da presença de etanol nas pastas tornando-as mais porosas. Dessa forma, se faz necessário o estudo de outras formas para melhorar a miscibilidade da diatomita super-hidrofóbica nas pastas de gesso. Os modelos otimizados demonstraram eficiência na previsão das propriedades e revelam mudanças na morfologia dos cristais de gesso.

REFERÊNCIAS

Arbele, T., Emmenegger, P., Vallée, F., Herschke, L. (2010). New Approaches to Increase Water resistance of Gypsum based building Materials. Drymix Mortar Yearbook.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 12.128. Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 12.129. Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). NBR 13.279. Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2015). ASTM E 1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2014). ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken.

Barriguete, A. V., Sánchez, E. A., Merino, M. D. R., Ramírez, C. P. (2020). Analysis of the improved water-resistant properties of plaster compounds with the addition of plastic waste. Construction and Building Materials, 230:116956. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116956

Caselle, C., Baud, P.; Kushnir, A. R. L., Reuschlé, T.; Bonetto, S. M. R. (2022). Influence of water on deformation and failure of gypsum rock. Journal of Structural Geology, 163:104722. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104722

Chen, C., Ma, F., He, T., Kang, Z., Wang, Y.; Shi, C. (2022). Improved water and efflorescence resistance of flue gas desulfurization gypsum-based composites by generating hydrophobic coatings. Journal of Cleaner Production, 371:133711. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133711

Doleželová, M., Krejsová, J., Scheinherrová, L., Keppert, M., Vimmrová, A. (2022). "Investigation of environmentally friendly gypsum based composites with improved water resistance". Journal of Cleaner Production, 370:133278. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133278

Gomis, V., Saquete, M. D., García-cano, J. (2013). $CaSO_4$ solubility in water–ethanol mixtures in the presence of sodium chloride at 25°C. Application to a reverse osmosis process. Fluid Phase Equilibria, 360:248-252. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.09.063

Khalil, A. A., Tawfik, A., Hegazy, A. A. (2018). Plaster composites modified morphology with enhanced compressive strength and water resistance characteristics. Construction and Building Materials, 167:55-64. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165

Li, Z., Xu, K., Peng, J., Wang, J., Zhang, J., Li, Q. (2021). Study on mechanical strength and water resistance of organosilicon waterproofing agent blended recycled gypsum plaster. Case Studies in Construction Materials, 14:e00546. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00546

Li, X., Yu, T., Park, S., KIM, Y. (2022). Reinforcing effects of gypsum composite with basalt fiber and diatomite for improvement of high-temperature endurance. Construction and Building Materials, 325:126762. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126762

Misnikov, O. (2018). Thehydrophobic modification of gypsum binder by peat products: physico-chemical and technological basis. Department of Geotechnology and Peat Production, Tver State Technical University, Russian Federation, Russia, 21:1-14. https://doi.org/10.19189/MaP.2017.OMB.300

Nguyen, H. H., Tieu, A. K., Tran, B. H., Wan, S., Zhu, H., Pham, S. T. (2021). Porosity-induced mechanically robust superhydrophobicity by the sintering and silanization of hydrophilic porous diatomaceous earth. Journal of Colloid and Interface Science, 589:242-251. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.101

Pearson, M. J., Monteith, S. E., Ferguson, R. R., Hallmark, C. T., Hudnall, W. H., Monger, H.C., Reinsch, T.G., West, L.T. (2015). A method to determine particle size distribution in soils with gypsum. Geoderma, 237-238: 318-324. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.016

Pedrajas, D. L., Franco, M. C., Sáenz, I. G., Mellado, F. J. R., Romero, J. F. R., Simón, A. M. B. (2022). Polystyrene nanoparticles slurry as an additive for developing insulating and waterproof gypsum composites. Applied Thermal Engineering, 217:119271. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119271

Pervyshin, G. N., Yakovlev, G. I., Gordina, A. F., Keriene, J., Polyanskikh, I. S., Fischer, H. B., Rachimova, N. R., Buryanov, A. F. (2017). Water-resistant Gypsum Compositions with Man-made Modifiers. Procedia Engineering, 172:867-874. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087

Ran, J., Chen, J., Su, X. (2022). Hydrophobic modification of building gypsum by peat soil: An in-depth analysis of characterization, mechanism, and mechanical properties. Construction and Building Materials, 338:127526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127526

Sassoni, E., Graziani, G.; Franzoni, E., Scherer G. W. (2018). Conversion of calcium sulfate dihydrate into calcium phosphates as a route for conservation of gypsum stuccoes and sulfated marble. Construction and Building Materials, 70:290-301. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.075

Schug, B., Mandel, K., Schottner, G., Shmeliov, A., Nicolosi, V., Baesed, R., Pietschmann, B., Biebl, M., Sextl, G. (2017). A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster. Cement and Concrete Research, 98:122-129. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.012

Simpson, J., Hunter, S. R., Aytug, T. (2015). Superhydrophobic materials and coatings: A review. Reports on progress in physics, 78(8):086501. https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/8/086501

Wu, Q., Ma, H., Chen, Q., Huang, Z., Zhang, C., Yang T. (2019). Preparation of waterproof block by silicate clinker modified FGD gypsum. Construction and Building Materials, 214:318-325. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.053

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DAS FIBRAS DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA SOBRE A ADERÊNCIA FIBRA-MATRIZ CIMENTICIA

Cleidson Carneiro Guimarães[a]; Paulo Roberto L. Lima[b] Gilberto Alves da Silva Neto[c]

[a](Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil), cleidsonguimaraes@ufrb.edu.br
[b] (Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil), prllima@uefs.br
[c] (Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil), gilbertoalveseng@gmail.com

RESUMO

O novo contexto ambiental tem exigido a substituição dos materiais convencionais por aqueles oriundos de fontes renováveis, tal como as fibras sintéticas por naturais. Vários tratamentos são utilizados para melhorar as propriedades das fibras vegetais tais como repetidos ciclos de umedecimento e secagem (hornificação) ou a imersão da fibra de solução alcalina de NaOH (tratamento químico). Este trabalho avaliou o efeito da hornificação e do tratamento químico nas propriedades das fibras do pseudocaule da bananeira (*Musa Sapientum*) e a influencia na ligação da fibra à matriz cimentícia. Foram realizados ensaio de tração direta nas fibras, arrancamento da fibra em matriz de cimento Portland, análise termogravimétrica, morfologia por meio do microscópio eletrônico de varredura e difração de raio X nas fibras naturais e tratadas. Os resultados indicaram que a tanto a hornificação quanto o tratamento alcalino interferiram na morfologia da fibra. Além disso, houve modificação no índice de cristalinidade e nos teores de hemicelulose e celulose. As alterações químicas e morfológicas promoveram alterações na aderência da fibra à matriz.

Palavras-chave: fibra da bananeira; hornificação e tratamento alcalino.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura alimenta um planeta cuja população mundial de 8 bilhões (2022) com previsão que chegue a 10 bilhões até 2050. As nações unidas projetam que a produção de alimentos de origem vegetal e animal precisa crescer em 70% até 2050 para atender a demanda dessa projeção de crescimento populacional (Strzyżyńska, 2022). Ao mesmo tempo que a agricultura alimenta, gera resíduos. As culturas de cereais geram cerca de 364,24 milhões de toneladas/ ano (Kumar et al., 2022).

A maior parte desses resíduos agrícolas é subutilizada ou queimada no campo gerando gases poluentes na atmosfera, teor de cinza que pode contaminar o solo e degradar a natureza biótica do solo (Kumar et al., 2022; Tagade et al., 2021). Entretanto, tais resíduos são constituídos por fibras naturais que apresentam grande potencial no uso de reforço de matrizes cimentícias em substituição as fibras sintéticas.

O uso de fibras vegetais, em sua forma natural, apresenta problemas que dificultam sua utilização tais como elevada absorção de água, variação dimensional, baixa aderência à matriz cimentícia e degradação química e biológica (Laverde et al., 2022). Existem diversas estratégias para minimizar esses problemas tais como alteração da composição da matriz cimentíca (Lima & Toledo Filho, 2008) ou alteração da fibra por meio da acetilação, impregnação por polímero, hornificação ou tratamento alcalino (Castoldi et al., 2022). Essas duas últimas estratégias de tratamento da fibra foi foco deste trabalho.

A hornificação consiste na alteração da morfologia da fibra por meio da utilização de ciclos de molhagem, com água, e secagem. Consistindo em um método simples e de baixo impacto ambiental. Esse simples processo, repetido 10 vezes, promoveu melhoria expressiva, em fibras de sisal, na aderência fibra-matriz, redução na absorção de água, redução na variação dimensional e aumento da tensão na aderência máxima nos ensaios de arranchamento (FERREIRA et al., 2012; DO AMARAL; RODRIGUES; POGGIALI, 2022; CLARAMUNT et al., 2011).

O tratamento químico consiste em submeter a fibra a uma solução com pH acima de 7 (geralmente hidróxido de sódio ou cálcio) para eliminar os grupos hidroxilas presentes na fibra vegetal. Nesse tratamento, os componentes não celulósicos como hemicelulose, pectina, lignina, óleos e ceras são removidos resultando em maior rugosidade superficial da fibra (Aravinth et al., 2022).

Embora o tratamento químico possa promover melhorias na constituição da fibra e potencializar a ligação entre a fibra e a matriz, é fundamental utilizar a concentração ótima de hidróxido, pois se a solução possuir maior teor de hidróxido pode ocorrer degradação excessiva, inclusive da celulose, resultado em danos a fibra vegetal (Castoldi et al., 2022). Todavia, empregando a solução em concentração ótima o tratamento alcalino aumenta a rugosidade superficial expondo a celulose na superfície da fibra (Arifuzzaman Khan et al., 2013).

As fibras do pseudocaule da bananeira são utilizadas no reforço de matrizes poliméricas (Gairola et al., 2020; Laxshaman Rao et al., 2021; Okafor et al., 2021; Prabhu et al., 2021) e apresenta potencial de utilização no reforço de matrizes cimentícias. Serão avaliadas as propriedades das fibras do pseudocaule da bananeira após o tratamento alcalino empregando hidróxido de sódio e por hornificação tendo em vista a utilização no reforço de matrizes cimentícias.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foi utilizada fibra do pseudocaule da bananeira da espécie *Musa Sapientum* (banana da prata).

Foi empregado hidróxido de sódio (PA) e água miliQ para preparar a solução a 1%, em massa.

A argamassa utilizada para o ensaio de arranchamento foi produzida empregando o mesmo traço e método de mistura utilizada por LIMA et al., (2018) .

O cimento empregado foi o CPV –ARI, superplasficante, VMA e areia quartzosa com dimensão máxima característica igual a 1,2 mm. A sílica ativa e a cinza volante utilizadas nesta pesquisa foram caracterizadas por meio da fluorescência de raio X por ROQUE, (2015).

2.2 MÉTODOS

Extração das fibras

As fibras utilizadas foram coletadas em plantação do curso de Agronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana (Bahia) e transportada para a cidade de Valente (Bahia) onde foram extraídas por uma máquina decorticadora. Neste processo as folhas são esmagadas uma roda girante contendo facas sem afiação no corte, promovendo corte que sobra apenas as fibras.

Após a extração, as fibras foram lavadas em água a 50°C durante 30 minutos para a remoção de resíduos do processo de extração, óleos e gorduras superficiais. Após a lavagem, as fibras foram secas ao sol durante 2 dias e separadas em três grupo: fibras naturais e tratadas por hornificação e por hidróxido de sódio.

Tratamento químico e por Hornificação

O tratamento químico consistiu na submersão das fibras naturais em solução de hidróxido de sódio (1%, em massa) por duas horas a temperatura de 23°C. Após esse tempo, as fibras foram removidas da solução e lavadas em água até que o pH da água após a lavagem fosse 7, metodologia similar a utilizada por Ezeamaku et al., (2022).

Para o processo de hornificação, as fibras foram mantidas submersas em água por 4 horas a 23°C. Em seguida, foram colocadas em estufa a 80°C por 24 horas. Ao remover da estufa, as fibras foram submetidas ao processo de resfriamento natural até a temperatura ambiente, antes de serem submersas em água, para evitar choque térmico. Esse ciclo foi repetido 10 vezes. Metodologia similar a empregada por Claramunt; Ardanuy; García-Hortal, (2010) e Ferreira et al., (2012).

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E DIFRAÇÃO DE RAIO X

As avaliações termogravimétricas das fibras foram realizadas empregando equipamento modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments. O ensaio foi realizado empregando 5 a 8 mg de fibra sob atmosfera de gás nitrogênio em um fluxo de gás constante de 20 ml/min, com uma taxa de aquecimento de 10 ºC/min, de 25ºC a 800ºC em procedimento similar ao empregado por Trivedi e Gupta (2023).

Para a caracterização mineralógica, utilizou-se a técnica de difração de raios-X (DRX), utilizando um difratômetro D2 Phaser, Bruker, com tubo alvo de cobre de 10mA e 30Kv, comprimento de onda (λ) igual a 0,15406nm, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de 2θ de 5° a 70°, modo contínuo a 0,02º/s.

DIÂMETROS DAS FIBRAS

O diâmetro das fibras foram avaliados empregando 10 amostras, de cada grupo, com 1 cm de comprimento e a medida do diâmetro de cada fibra foi realizado a 1 mm da extremidade cortada empregando microscópio ótico binocular com câmera acoplada, modelo Quimis Q7708S-4 e com lente de aumento de 4X.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

A avaliação da resistência a tração foi efetuada empregando 15 amostras (de cada grupo), com comprimento de 10mm, 30mm e 50 mm. O ensaio foi executado em uma máquina ensaio universal modelo Shimadzu AG-X com célula de carga de 1 kN e velocidade de deslocamento de 2 mm/min. O Diâmetro de cada fibra foi determinado por meio da média de três medidas distribuídas ao longo do comprimento da amostra. Para isso, foi empregado o mesmo microscópio utilizado na variação dimensional. Após a análise da resistência a tração, foi avaliada a distribuição de Weibull com o objetivo de identificar o grau de variabilidade dos resultados de resistência à tração, (Alves Fidelis et al., 2013).

A influência dos diferentes tipos de tratamento na aderência da fibra com a matriz de cimento Portland foi avaliada empregando o mesmo traço utilizado por Lima et al., (2018). Foram moldados 12 corpos de prova empregando cimento Portland CP V ARI e comprimento de embebimento de 20 mm. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida (umidade de 99%) e temperatura de 25ºC por 7 dias. Após esse período, o ensaio foi executado empregando texturômetro TA.XT Plus Analyzer com célula de carga de 50 Kg e taxa de deslocamento de 0,02mm/s.

Os resultados foram tratados de forma comparativa, ou seja, as propriedades mensuradas das amostras tratadas por hornificação e por NaOH foram comparadas com as amostras da fibra natural (tomada por referência). Para avaliar a significância da variação, foi empregado o teste ANOVA e Tukey, adotando grau de confiança de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Termogravimetria

A Figura 1 mostra as curvas termogravimétricas das fibras naturais e tratadas por hornificação e com NaOH. O processo de decomposição térmica dos componentes químicos importantes para morfologia da fibra pode ser compreendido como uma única etapa que começa a 200ºC t com perda progressiva da estabilidade térmica até 390ºC que interferem expressivamente nas propriedades (Fogue Matchum et al., 2024).

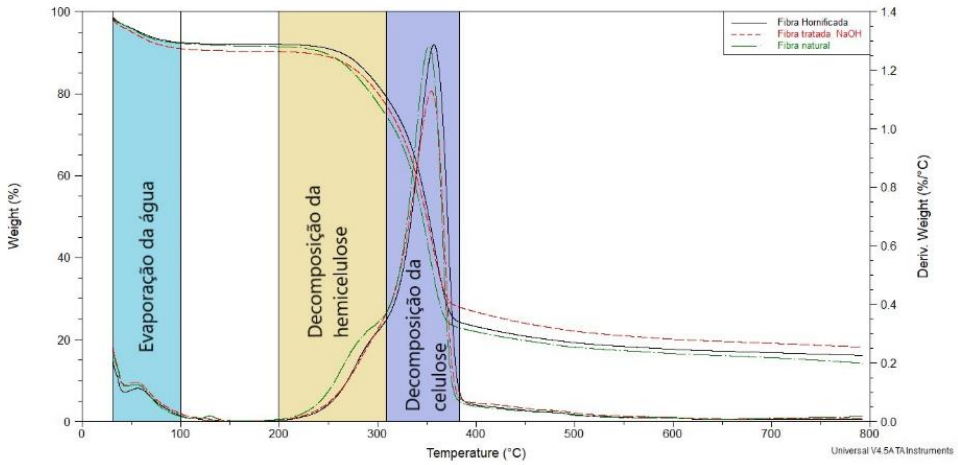


Figura 1 - Curva de degradação térmica das fibras naturais e tratadas por hornificação e com hidróxido de sódio

Os resultados demonstram que tanto o tratamento por hornificação quanto o químico reduzem (em relação a fibra natural) o teor de hemicelulose, pectina e ceras em 14,49% e 31,00%, respectivamente, entre 200 ºC e 300 ºC. Teor de celulose da fibra tratada por hornificação apresentou

teor de celulose maior do que a da fibra natural, isso ocorre porque durante o tratamento por hornificação há remoção de hemicelulose, consequentemente, há aumento da proporção de celulose, ou seja, é um fenômeno físico de proporcionalidade. Fenômeno similar de aumento percentual da celulose em função da diminuição da hemicelulose foi observado por Ronald Aseer et al., (2013) ao avaliar a composição da fibra de bananeira após tratamento com hipoclorito de sódio.

Entretanto, no tratamento por NaOH há maior redução de hemicelulose e celulose, pois as as soluções alcalinas promovem decomposição destas duas substâncias por meio da desidroxilação, ou seja, trata-se de um processo químico aos quais os grupos hidroxílicos da fibra sensíveis aos álcalis são quebrados e então reagem com a água e se movem para fora da fibra (KABIR et al., 2012;ARAVINTH et al., 2022;CASTOLDI et al., 2022; EZEAMAKU et al., 2022b).

Diâmetro das fibras

As fibras naturais e hornificadas apresentaram diâmetro médio de 0,181 mm e 0,180 mm, respectivamente. Enquanto, as fibras tratadas por solução alcalina apresentaram um diâmetro médio de 0,159 mm, ou seja, redução em 12,15% no diâmetro da fibra, em relação a fibra natural. Os resultados da análise de variância indicam que o tratamento químico altera significativamente o diâmetro das fibras, todavia, a hornificação não promove variação significativa.

A distribuição com a frequência de ocorrência do diâmetro das fibras tratadas por diferentes métodos é mostrada na Figura 2.

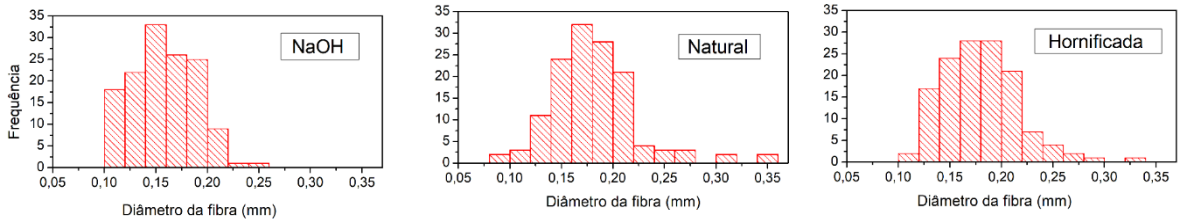


Figura 2 - distribuição da ocorrência de diâmetros das fibras com diferentes tratamentos

A análise desta distribuição permite indicar que tanto a hornificação quanto o tratamento por hidróxido de sódio interferem na distribuição de diâmetros das fibras do tronco da bananeira. Isso ocorre porque esses dois tratamentos interferem no teor de ligantes da fibra natural, ou seja, tanto a hornificação quanto o tratamento químico diminuem a quantidade de hemicelulose, lignina e pectina. Essas substâncias atuam como ligantes das fibrilas para constituir as fibras. Com a decomposição dessas substâncias, então há separação das microfibrilas que constituem as fibras diminuindo o diâmetro. Por isso, tanto maior a ação de decomposição dos agentes cimentantes, maior a tendência de distribuição de fibras com diâmetros menores.

Difração de raio X das fibras

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raio x para as fibras natural e tratadas. Apesar de uma das fibras ter sido tratada com uma substância inorgânica cristalina (NaOH) não foi identificado nenhum pico característico desta molécula na curva da fibra com tratamento alcalino. Isso indica a eficiência da lavagem empregando água por meio do acompanhameto do pH durante a lavagem, resultando na remoção do hidróxido a concentrações não detectáveis no DRX.

O índice de cristalinidade da fibra natural foi 54,2% e das fibras tratadas por NaOH e por hornificação foi de 61,3% e 63,3%, respectivamente. Ronald ASeer et al., (2013) indicam que o índice de cristalinidade da fibra do pseudocaule da bananeira varia de 40% a 60%. Tanto o tratamento alcalino quanto a hornificação, aumentam o ICr devido a diminuição das fases amorfas da fibra

(hemicelulose, lignina e ceras) e aumento relativo do teor de α-celulose. Tanto maior o índice de cristalinidade, maior a organização molecular em decorrência do maior empacotamento da celulose (GONÇALVES et al., 2015; VARMA; SARANGI, 2022) e estas propriedades interferem significativamente nas propriedades mecânicas (Sango et al., 2018). Quando uma carga é aplicada em uma estrutura fibrosa, então há transferência de esforços por meio da cadeia celulósica por meio de forças intermoleculares cujas interações mais intensas ocorrem nas regiões cristalinas (Mohamed et al., 2010).

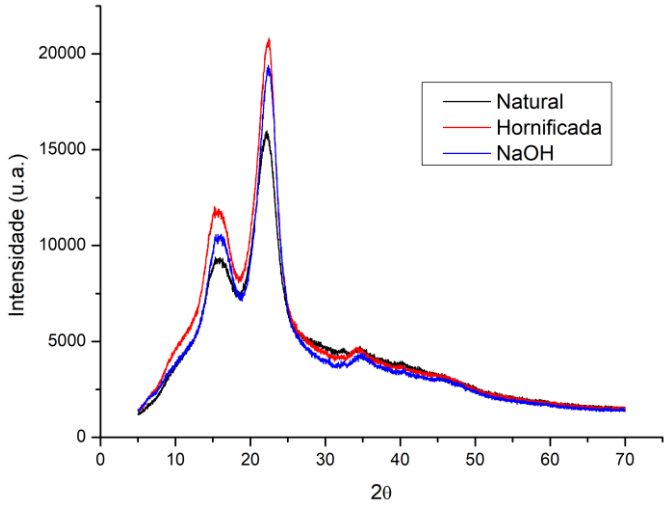


Figura 3 – Difratogramas de raio x das fibras

Propriedades mecânicas

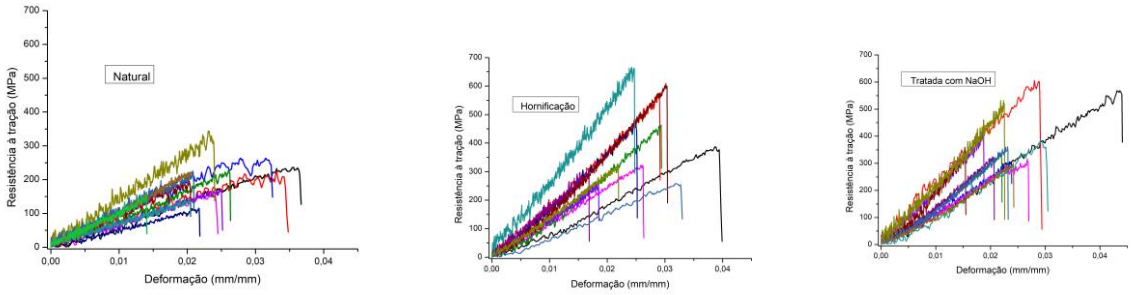
Resistência à tração

A Figura 5 mostra o comportamento tensão – deformação das fibras submetidas à tração direta. As fibras apresentam comportamento elástico linear até a ruptura. Por meio das curvas, foram obtidas a máxima resistência à tração direta e módulo de elasticidade. A Tabela 1 mostra os resultados da resistência à tração, módulo de elasticidade e Weibull para as fibras naturais, tratadas com hidróxido de sódio, por hornificação e os respectivos coeficientes de variação, entre parêntesis.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das fibras

Tipos de tratamento		**Comprimento da fibra (cm)**		
		10	**30**	**50**
Natural	Resistência à tração (MPa)	198,05 (33,99)	159,34 (38,65)	156,95 (29,09)
	Módulo de elasticidade (GPa)	6,77 (44,33)	7,59 (34,75)	9,02 (18,03)
	Módulo de Weibull	2,51	2,75	3,00
Tratamento com NaOH	Resistência à tração (MPa)	379,94 (32,27)	370,06 (29,44)	368,24 (36,94)
	Módulo de elasticidade (GPa)	11,86 (27,21)	15,70 (30,31)	17,66 (31,61)

	Módulo de Weibull	3,14	3,42	2,80
Hornificação	Resistência à tração (MPa)	377,94 (32,83)	415,4 (35,62)	406,06 (50,26)
	Módulo de elasticidade (GPa)	10,53 (3,25)	15,43 (29,71)	16,31 (39,93)
	Módulo de Weibull	3,21	2,36	1,80



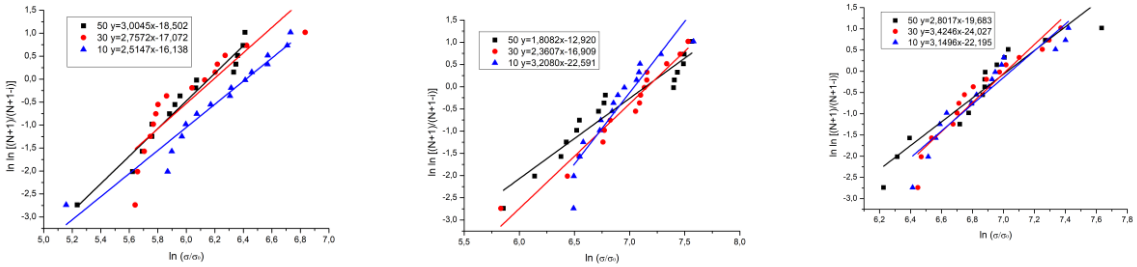
(A) (B) (C)

Figura 4 – Gráfico tensão deformação em fibras naturais (A), tratadas por hornificação (B) e com hidróxido de sódio (C)

Quando comparado o efeito do comprimento na resistência à tração por meio da análise de variância (ANOVA) em fibras que receberam o mesmo tratamento, os resultados demonstraram que a variação do comprimento não promove variação significativa sobre a resistência à tração das fibras. Entretanto, os resultados da análise de variância indicaram que os dois tratamentos por hornificação e com hidróxido de sódio promoveram aumento significativo na resistência à tração das fibras. O tratamento das fibras por hornificação, aumentou, em média, a resistência à tração em 236,75%, enquanto o tratamento com NaOH aumentou em 219,46% esses resultados refletem o aumento percentual do teor de celulose na fibra por meio dos tratamentos utilizados. O tratamento por meio de solução alcalina promove um aumento percentual menor do que o por hornificação em função da degradação celulósica em meio alcalino, já que a celulose desempenha papel significativo nas propriedades mecânicas das fibras fornecendo resistência mecânica, rigidez e estabilidade (Castoldi et al., 2022).

O módulo de elasticidade foi corrigido em função da flexibilidade da flexibilidade da máquina de ensaios universal. Após a correção, o módulo de elasticidade da fibra natural foi de 11,7GPa, enquanto para as fibras hornificadas e tratadas com hidróxido foi de 18,1 e 19,2, respectivamente.

Foi construído distribuição de sobrevivência da fibra durante o ensaio de tração direta por meio da estatística de falha de Weibull e representa a confiabilidade de sobrevivência, Figura 6.



(A) (B) (C)

Figura 5 - Gráfico para o cálculo do módulo de Weibull das fibras naturais (A), hornificadas (B) e tratadas com NaOH (C)

Aderência Fibra Matriz

A Tabela 2 apresenta os resultados da resistência de aderência das fibras naturais e tratadas.

Os resultados da análise de significância (ANOVA) e teste Tukey indicaram que o tratamento por hornificação não promoveu mudança significativa na resistência de aderência, entretanto o tratamento alcalino promoveu aumento significativo na resistência de aderência entre as fibras do pseudocaule da bananeira e a matriz de cimento Portland. O aumento promovido pelo tratamento alcalino, em relação a fibra natural, foi de 47,53%. Diversos autores (Castoldi et al., 2022; Reich et al., 2008) observaram melhorias na resistência de aderência de fibras vegetais após o tratamento químico. Esse fenômeno se deve a maior rugosidade superficial da fibra após o tratamento químico, devido a remoção controlada de alguns constituintes da fibra como hemicelulose, lignina, pectina, substâncias cerosas e óleos naturais que cobre a superfície da fibra vegetal (Castoldi et al., 2022).

Tabela 2 - Resultados do ensaio de arrancamento das fibras

	Natural (MPa)	**Hornificada (MPa)**	**Alcalina (MPa)**
DP	0,2065	0,0764	0,1919
CV	63,66	24,30	38,38
Média	0,324	0,314	0,478

A Figura 7 mostra o comportamento da tensão de aderência das fibras naturais e tratadas. Quando comparado o comportamento das fibras tratadas por hornificação com as naturais, observa-se a ausência da 4 fase. Provavelmente porque na hornificação aumenta a rigidez da fibra do pseudocaule da bananeira sem aumentar a rigidez superficial na mesma proporção. Logo, a ruptura da interface fibra-matriz se dá de forma mais abrupta (quando comparado com a fibra natural) e a rugosidade superficial da fibra não garante o intertravamento necessário para aumentar o atrito e promover o escorregamento desacelerado.

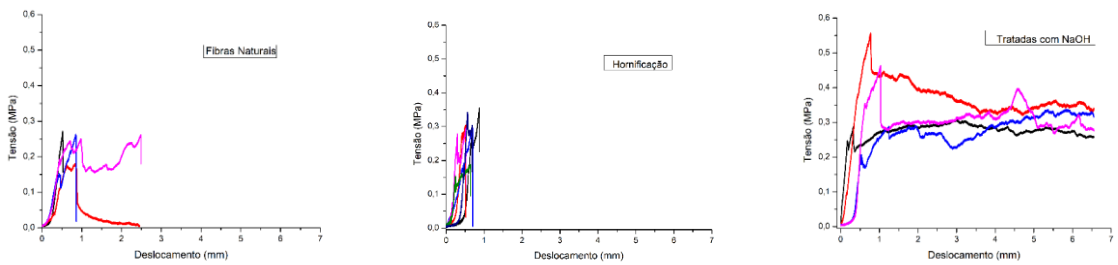


Figura 6 - Tensão de aderência das fibras do pseudocaule da bananeira em matriz de cimento portland

CONCLUSÕES

As fibras do tronco da bananeira apresentam propriedades que constitui alternativa no reforço de matrizes e, em particular as matrizes cimentícias. Tais fibras são abundantes no Brasil e no mundo constituindo resíduo de processo produtivo da banana. Além disso, apresenta estabilidade térmica, pois a decomposição ocorre em temperatura superiores a 200ºC.

O tratamento por meio de solução alcalina e hornificação aumentaram os índices cristalinidade das amostras e consequentemente, aumento nas resistências à tração e módulo de elasticidade.

Portanto, o uso de fibras do pseudocaule da bananeira pode ser uma alternativa viável no reforço de matrizes cimentícias e a utilização de tratamento por hornificação e em meio alcalino potencializa as propriedades desta fibra.

REFERÊNCIAS

Alex Borges Roque. (2015). Elementos construtivos de fibrcimento contendo resíduo de concreto e fibra de sisal para uso como enchimento em lajes prémoldadas. *Food and Nutrition Bulletin*, 210. https://www.google.com.my/#q=SHAKE+Technical+Package+for+Salt+Reduction+%0Ahttp://www.wcrf.org/int/policy/our-policy-work/curbing-global-sugar-consumption%0Ahttp://link.springer.com/article/10.1007/s11936-012-0182-9%5Cnhttp://link.springer.com/article/10.

Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. D. F. M., De Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, *2*(2), 149–157. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003

Aravinth, K., Ramakrishnan, T., Tamilarasan, V. D., & Veeramanikandan, K. (2022). A brief review on plant fibres composites: Extraction, chemical treatment and fibre orientation. *Materials Today: Proceedings*, *62*, 2005–2009. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.02.291

Arifuzzaman Khan, G. M., Alam Shams, M. S., Kabir, M. R., Gafur, M. A., Terano, M., & Alam, M. S. (2013). Influence of chemical treatment on the properties of banana stem fiber and banana stem fiber/coir hybrid fiber reinforced maleic anhydride grafted polypropylene/low-density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *128*(2), 1020–1029. https://doi.org/10.1002/APP.38197

Castoldi, R. de S., de Souza, L. M. S., Souto, F., Liebscher, M., Mechtcherine, V., & de Andrade Silva, F. (2022). Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices. *Construction and Building Materials*, *345*, 128363. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128363

Claramunt, J., Ardanuy, M., & García-Hortal, J. A. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, *79*(1), 200–205. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2009.07.057

Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., & Filho, R. D. T. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, *33*(5), 586–595. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.03.003

do Amaral, L. M., Rodrigues, C. de S., & Poggiali, F. S. J. (2022). Hornification on vegetable fibers to improve fiber-cement composites: A critical review. *Journal of Building Engineering*, *48*(December 2021). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103947

Ezeamaku, U. L., Onukwuli, O. D., Ezeh, M. E., Eze, I. O., Odimegwu, N. E., & Agu, C. P. (2022). Experimental investigation on influence of selected chemical treatment on banana fibre. *Industrial Crops and Products*, *185*, 115135. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.115135

Ferreira, S. R., Lima, ;, Silva, ;, & Filho, T. (n.d.). *Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices*.

Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., Silva, F. A., & Toledo Filho, R. D. (2012). Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. *Revista Materia*, *17*(2), 1024–1034. https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008

Fogue Matchum, S., Sikame Tagne, N. R., Huisken Mejouyo, P. W., Tido Tiwa, S., Wenga, B., Njeugna, E., Drean, J. Y., Bistac-Brogly, S., & Harzallah, O. (2024). Investigation of chemical, physical and morpho-mechanical properties of banana-plantain stalk fibers for ropes and woven fabrics used in composite and limited-lifespan geotextile. *Heliyon*, *10*(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29656

Gairola, S. P., Tyagi, Y. K., Gangil, B., & Sharma, A. (2020). Fabrication and mechanical property evaluation of non-woven banana fibre epoxy-based polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 3990–3996. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.103

Gonçalves, A. P. B., De Miranda, C. S., Guimarães, D. H., De Oliveira, J. C., Cruz, A. M. F., Da Silva, F. L. B. M., Luporini, S., & José, N. M. (2015). Physicochemical, mechanical and morphologic characterization of purple banana fibers. *Materials Research*, *18*(Suppl 2), 205–209. https://doi.org/10.1590/1516-1439.366414

Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, *43*(7), 2883–2892. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053

Kumar, D. P., Ramesh, D., Vikraman, V. K., & Subramanian, P. (2022). Synthesis of carbon molecular sieves from agricultural residues: Status, challenges and prospects. *Environmental Research*, *214*, 114022. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114022

Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, *340*, 127729. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729

Laxshaman Rao, B., Makode, Y., Tiwari, A., Dubey, O., Sharma, S., & Mishra, V. (2021). Review on properties of banana fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 2825–2829. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.558

Lima, P. R. L., Barros, J. A. O., Roque, A. B., Fontes, C. M. A., & Lima, J. M. F. (2018). Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs. *Construction and Building Materials*, *187*, 620–634. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.184

Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2008). Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. *Ambiente Construído*, *8*(4), 7–19.

Mohamed, A. R., Sapuan, S. M., Shahjahan, M., & Khalina, A. (2010). Effects of simple abrasive combing and pretreatments on the properties of pineapple leaf fibers (palf) and palf-vinyl ester composite adhesion. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, *49*(10), 972–978. https://doi.org/10.1080/03602559.2010.482072

Okafor, C. E., Onovo, A. C., Imoisili, P. E., Kulkarni, K. M., & Ihueze, C. C. (2021). Optimal route to robust hybridization of banana-coir fibre particulate in polymer matrix for automotive applications. *Materialia*, *16*(April), 101098. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101098

Prabhu, L., Krishnaraj, V., Sathish, S., Gokulkumar, S., Karthi, N., Rajeshkumar, L., Balaji, D., Vigneshkumar, N., Elango, K. S., Karpagam, J., Vijayalakshmi, V. J., Gowarthan, E. R., & Jayakumar, H. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of flax/banana/ industrial waste tea leaf fiber reinforced hybrid polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 8136–8143. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.111

Reich, S., El Sabbagh, A., & Steuernagel, L. (2008). Improvement of Fibre-Matrix-Adhesion of Natural Fibres by Chemical Treatment. *Macromolecular Symposia*, *262*(1), 170–181. https://doi.org/10.1002/MASY.200850217

Ronald Aseer, J., Sankaranarayanasamy, K., Jayabalan, P., Natarajan, R., & Priya Dasan, K. (2013). Morphological, Physical, and Thermal Properties of Chemically Treated Banana Fiber. *Journal of Natural Fibers*, *10*(4), 365–380. https://doi.org/10.1080/15440478.2013.824848

Sango, T., Cheumani Yona, A. M., Duchatel, L., Marin, A., Kor Ndikontar, M., Joly, N., & Lefebvre, J. M. (2018). Step–wise multi–scale deconstruction of banana pseudo–stem (Musa acuminata) biomass and morpho–mechanical characterization of extracted long fibres for sustainable applications. *Industrial Crops and Products*, *122*(December 2017), 657–668. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.050

Strzyżyńska, W. (2022). *Can the world feed 8bn people sustainably?* The Gardian. https://www.theguardian.com/global-development/2022/nov/15/can-the-world-feed-8bn-people-sustainably

Tagade, A., Kirti, N., & Sawarkar, A. N. (2021). Pyrolysis of agricultural crop residues: An overview of researches by Indian scientific community. *Bioresource Technology Reports*, *15*, 100761. https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100761

Trivedi, A. K., & Gupta, M. K. (2023). An efficient approach to extract nanocrystalline cellulose from sisal fibers: Structural, morphological, thermal and antibacterial analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, *233*(January), 123496. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123496

Varma, V. K., & Sarangi, S. K. (2022). Comprehensive Characterization of Novel Natural Fiber from Bauhinia Variegata Plant. *Journal of Natural Fibers*, *19*(17), 15585–15599. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2131679

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIGROSCÓPICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RCC

Thainá Y. Dessuy[a]; Jéssica D. Bersch[a,b]; Gabriela Yurgel[a]; Layse Ariotti[a];
Lais Zucchetti[a]; Angela B. Masuero[a]

[a]NORIE/PPGCI, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99, 7º andar, 90035-190, Porto Alegre, Brasil, dessuy.ty@gmail.com, jessica.bersch@ufrgs.br, gabrielayurgel@gmail.com, layseariotti@gmail.com, lais.zucchetti@ufrgs.br, angela.masuero@ufrgs.br

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento mecânico e higroscópico de argamassas de revestimento com substituição de agregado miúdo natural por reciclado de resíduos da construção civil (RCC), com composição baseada em argamassa de alta resistência (f_{cm} = 40 MPa). Foram realizados ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água em três diferentes composições de argamassas com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), em volume, contendo teores de substituição de 0%, 50% e 100% de RCC. Nos ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor, foi adicionalmente analisada a influência da aplicação de uma camada de tinta acrílica fosca sobre as argamassas. A permeabilidade ao vapor foi testada com exposição a umidades relativas médias de 50% e 85%. Quanto ao desempenho mecânico, a argamassa com 50% de agregado miúdo reciclado apresentou resistência à compressão superior. A argamassa confeccionada com 50% de RCC e com tinta apresentou o menor coeficiente de absorção de água por capilaridade. 100% de RCC, por outro lado, gerou o maior coeficiente de absorção quando sem pintura. Quanto à permeabilidade ao vapor, ficaram evidenciadas a influência das condições de exposição e da presença da tinta.

Palavras-chave: Comportamento mecânico; Desempenho higroscópico; Argamassa; Agregado Miúdo Reciclado.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção é um participante importante no desenvolvimento econômico de um país. Porém, este setor é um dos que mais consomem matérias-primas, especialmente nos países em desenvolvimento (UNEP, 2022), resultando na produção significativa de resíduos, estimada em 100 millhões de toneladas anuais no Brasil (ABRECON, 2022). Nesse contexto, a fim de minimizar os impactos ambientais decorrentes dessa situação, o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) visa auxiliar no planejamento da caracterização e da estimativa de resíduos gerados em obras brasileiras, no seu armazenamento e logística, na possibilidade de reutilização, e na sua destinação final, caso não seja possível a reciclagem (SCALONE, 2016).

Uma forma de reutilizar os resíduos da construção civil (RCC) consiste na sua incorporação em materiais compósitos, como argamassas e concretos, sendo utilizados como agregados, substituindo, assim, agregados naturais e reduzindo suas necessidades de extração. Dentre as possíveis consequências decorrentes da utilização destes agregados reciclados estão: a modificação na resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015; DESSUY, 2021), devido à sua granulometria (CARRIJO, 2005; MALTA, 2012); o aumento da absorção de água, devido à sua alta porosidade em comparação aos agregados naturais, a qual pode ser compensada na dosagem (LEITE, 2001; CORDEIRO, 2013; DESSUY, 2021); e a heterogeneidade do material, que pode ser controlada para obtenção das propriedades visadas (AMORIM, 2018; DESSUY, 2021).

A fim de contribuir com a comunidade científica no âmbito dos estudos de argamassas produzidas com RCC, este trabalho tem por objetivo analisar a influência da substituição de agregados naturais por agregados miúdos reciclados provenientes de argamassa de alta resistência (f_{cm} = 40 MPa), do ponto de vista mecânico e higroscópico. De acordo com a resolução número 307 do CONAMA (BRASIL, 2002), agregados miúdos reciclados provenientes de argamassa de alta resistência, como os utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, enquadram-se na classe A, podendo, assim, ser reutilizados ou reciclados. Foram efetuados ensaios para determinação da resistência à compressão e à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água, considerando argamassas com três diferentes proporções de substituição de agregado miúdo natural por reciclado, moldagem e a aplicação ou não de pintura nos corpos de prova destinados aos ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor. Foram produzidas amostras de argamassa somente com agregados miúdos naturais, com 50% de agregados miúdos naturais e 50% reciclados e, finalmente, somente com os reciclados, configurando uma substituição total (100%) do agregado miúdo natural pelo agregado reciclado.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

As argamassas foram produzidas com cimento Portland pozolânico brasileiro, tipo CP-IV, correspondente ao cimento americano C595 IP (MEHTA, MONTEIRO, 2014), com massa específica de 2,89 g/cm³ (NBR 16605, 2017) e massa unitária de 0,81 g/cm³ (NBR 16972, 2021). Nas moldagens, foi também utilizada cal hidratada do tipo CH-I, com mais de 90% em óxidos totais (CaO_t + MgO_t) (NBR 7175, 2003), apresentando massa específica de 2,50 g/cm³ (NBR 16605, 2017) e massa unitária de 0,58 g/cm³ (NBR 16972, 2021). O agregado miúdo natural foi caracterizado com massa específica de 2,55 g/cm³ (NBR 16916, 2021), massa unitária de 1,488 g/cm³ (NBR 16972, 2021) e absorção total de 1,71% (NBR 16916, 2021) e o agregado miúdo reciclado, com massa específica de 1,86 g/cm³ (NBR 16916, 2021) e absorção total de 13,17% (NBR 16916, 2021).

Visando à mitigação da influência do tamanho dos grãos de agregados nas matrizes cimentícias produzidas, utilizou-se a mesma composição granulométrica para os agregados miúdos natural e reciclado, conforme a curva granulométrica demostrada na Figura 1. Nela pode-se observar que a curva dos agregados miúdos encontra-se entre a zona utilizável superior e inferior, conforme a norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2022), classificando-se como ideal para utilização em concretos e argamassas.

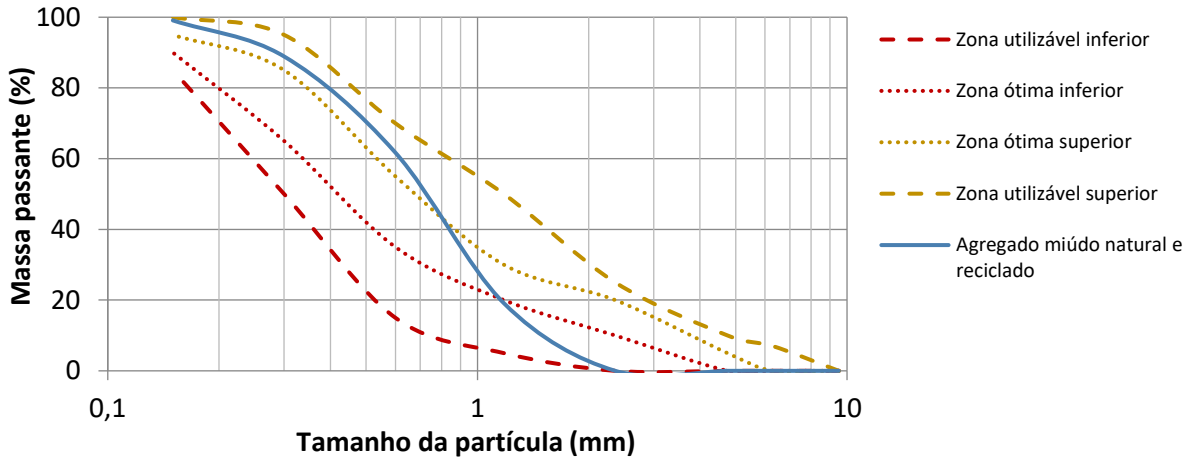


Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados

2.2 MÉTODOS

As argamassas foram produzidas com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia, em volume) em três configurações, 0% RCC, 50% RCC e 100% RCC, sendo 0% RCC composto apenas por agregados naturais (0% de agregado miúdo reciclado) e 50% RCC e 100% RCC combinações com substituição de 50% e 100%, respectivamente, do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de resíduos de argamassa com média de resistência à compressão em 40 MPa (f_{cm} = 40 MPa).

Para a confecção das argamassas 50% RCC e 100% RCC, realizou-se a compensação em volume dos agregados, de modo a manter o volume de material constante entre todos os traços, já que a massa específica do agregado miúdo reciclado é inferior à do agregado miúdo natural. O Quadro 1 apresenta informações a respeito da dosagem das argamassas, indicando que foi adicionada uma quantidade menor, em kg, de agregado miúdo reciclado às misturas, para ambos os traços. Nas configurações 50% RCC e 100% RCC, também se realizou, 24 h antes da moldagem, a compensação de água com 80% da água absorvida pelo agregado miúdo reciclado, conforme a metodologia de Brand, Roesler e Salas (2015). Essa compensação de água do agregado miúdo reciclado foi realizada para reduzir a perda de consistência da argamassa e evitar que parte da água de amassamento fosse absorvida pelo próprio agregado.

Quadro 1 – Dosagem das argamassas com 0%, 50% e 100% agregado reciclado (RCC)

Argamassa	0% RCC	50% RCC	100% RCC
Quantidade de Cimento (kg)	1,29	1,29	1,29
Quantidade de Cal (kg)	0,93	0,93	0,93
Quantidade de Agregado Miúdo (kg)	14,22	7,11	0,00
Quantidade de Agregado Miúdo reciclado (kg)	0,00	5,19	10,37
Relação Água/Cimento	2,18	1,72	1,84
Relação Água/Cimento Efetivo	-	2,35	2,69

A produção das argamassas seguiu a seguinte metodologia: 1. Mistura do agregado miúdo por um minuto no misturador de eixo vertical buscando sua homogeneização; 2. Mistura da cal e do cimento, primeiramente de forma manual e, logo após, mais trinta segundos de mistura mecânica; 3. Mistura mecânica da quantidade de água inicial por um minuto; 4. Homogeneização com colher de pedreiro; 5. Mistura mecânica por mais um minuto; 6. Teste da consistência da argamassa (flow table), conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). A relação água/cimento foi ajustada conforme a consistência da argamassa, delimitada no valor de 240 mm ± 10mm. A densidade de massa no estado fresco das argamassas, determinada seguindo recomendações da NBR 13278 (ABNT, 2005), resultou em 2014 kg/m³ para 0% RCC, 1865 kg/m³ para 50% RCC e 1652 kg/m³ para 100% RCC.

Foram moldados corpos de provas prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm para realização dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão (NBR 13279, 2005) e absorção de água por capilaridade (NBR 15259, 2005). Ainda, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura, destinados ao ensaio de permeabilidade ao vapor com base na NBR 13281-1 – Anexo B (ABNT, 2023). Para a desmoldagem, foram respeitadas as recomendações da norma NBR 13281-1 - Anexo A (ABNT, 2023) e, após a desmoldagem, as amostras foram levadas para cura em câmara com umidade relativa e temperatura controladas em 60% ± 5% e 23°C ± 1°˚C, respectivamente, até completarem 28 dias. Na sequência, foram realizados os ensaios para verificação de suas propriedades mecânicas e higroscópicas.

Nos corpos de prova destinados ao ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 15259, 2005) e em uma face das amostras testadas quanto à permeabilidade ao vapor (NBR 13281-1 – Anexo B (ABNT, 2023) e ISO 12572 (ISO, 2016), foi investigado o efeito da aplicação de uma camada de tinta acrílica fosca comparando-se, assim, os resultados entre as argamassas para revestimento pintadas e não pintadas. O ensaio de permeabilidade ao vapor foi conduzido considerando-se exposição a duas condições de umidade relativa distintas: conforme a própria NBR 13281-1 - Anexo B (ABNT, 2023), contemplando umidade relativa de 85% ± 5%, e, conforme a ISO 12572 (ISO, 2016), adicionando a exposição à umidade relativa de 50% ± 5%, para efeitos de comparação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização mecânica efetuados nos corpos de prova. Com os dados de caracterização mecânica, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para verificar a significância da variável independente (% de substituição) nas variáveis dependentes (resistência à tração na flexão (Quadro 2) e resistência à compressão (Quadro 3)).

Considerando os valores-p obtidos no Quadro 2, para um nível de significância de 5%, a variável “% de substituição” obteve efeito não significativo na variável de resposta (resistência à tração na flexão), indicando que as diferentes composições de argamassa não apresentaram diferença estatisticamente significativa para esta propriedade. No Quadro 3, por outro lado, houve efeito significativo da “% de substituição” na variável de resposta “resistência à compressão”, ou seja, há combinações de pares diferentes entre si. Como a “% de substituição” influenciou significativamente a resistência à compressão aos 28 dias, realizou-se uma complementação da análise de variância através da comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey. Com essa análise, concluiu-se que todas as médias obtidas são estatisticamente diferentes entre si, logo, a argamassa que obteve os melhores resultados para a análise de resistência à compressão foi a com 50% de substituição do agregado natural por reciclado.

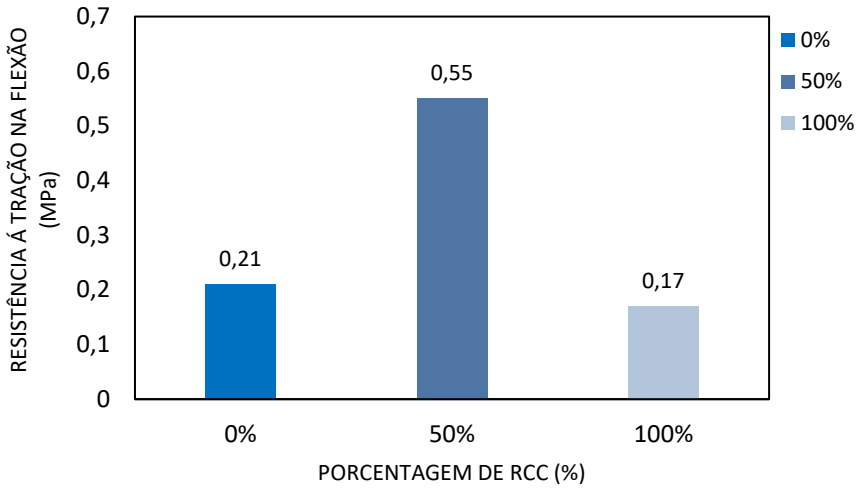


Figura 2 – Influência do teor de substituição de agregados na resistência à tração na flexão das argamassas

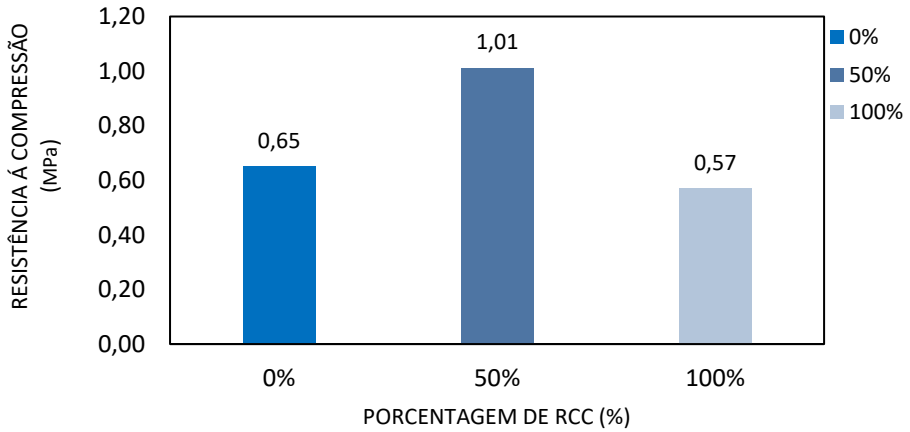


Figura 3 – Influência do teor de substituição de agregados na resistência à compressão das argamassas

Quadro 2 – ANOVA para variável dependente "resistência à tração na flexão" aos 28 dias

Variáveis	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor - p	Significância
Interseção	0,864900	1	0,864900	14,67590	0,008650	S
% de substituição	0,276200	2	0,138100	2,34333	0,176982	NS
Erro	0,353600	6	0,058933	-	-	-
Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo						

Quadro 3 – ANOVA para variável dependente "resistência à compressão" aos 28 dias

Variáveis	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor - p	Significância
Interseção	9,782939	1	9,782939	7882,04	0,000000	S
% de substituição	0,610344	2	0,305172	245,886	0,000000	S
Erro	0,018617	15	0,001241		-	-
Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo						

Apesar de não ter sido identificada diferença estatisticamente significativa na resistência à tração na flexão das argamassas, o comportamento indicado pela Figura 3 e pelo Quadro 3, ou seja, resistência à compressão superior para a composição com 50% de substituição do agregado miúdo natural por reciclado, pode ser justificado considerando-se a relação a/c dessa mistura, de 1,72 (Quadro 1), o menor dentre os três traços produzidos. A redução na demanda de água pode ter sido influenciada pela compensação com pré-molhagem realizada nos traços com agregado miúdo reciclado visando melhorar a aderência da interface e evitar com que a água da mistura fosse absorvida pelo agregado (LEITE, 2001; EVANGELISTA; BRITO, 2010; CARTUXO *et al.*, 2016, ECKERT; ANDRADE *et al.*, 2020). Ainda, o agregado reciclado pode ter agido como agente de cura interna, hidratando os possíveis grãos anidros existentes na mistura, gerando uma densificação da matriz e consequentemente o aumento dos valores de resistência mecânica (SOUZA *et al.*, 2020).

As características físicas de forma e textura do agregado miúdo natural pode ter gerado melhor empacotamento e desempenho mecânico na mistura de referência, com 0% de RCC, em comparação à 100% RCC (GARCIA et al., 2015; STRINGARI; SCHACKOW; EFFTING, 2016). De fato, a substituição de 100% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado resultou nos menores valores de resistência à compressão (Figura 3). Esse comportamento pode ser relacionado com o maior fator a/c.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade, onde pode-se observar que as argamassas que receberam a camada de tinta apresentaram um coeficiente de capilaridade inferior ao das argamassas sem pintura. Além disso, as argamassas com pintura e com agregado miúdo reciclado demonstraram coeficientes de capilaridade menores em comparação com as argamassas que utilizaram agregado miúdo convencional, destacando-se a argamassa com 50% de substituição, que obteve o menor coeficiente de absorção. Esse comportamento pode ser atribuído à maior porosidade das argamassas com agregado miúdo reciclado, conforme evidenciado nos testes realizados com argamassas sem pintura, que são menos porosas. A maior porosidade acaba sendo benéfica na presença de pintura, pois permite que a tinta penetre nos poros, dificultando o acesso da água na matriz cimenticia, proporcionando uma maior impermeabilização das argamassas.

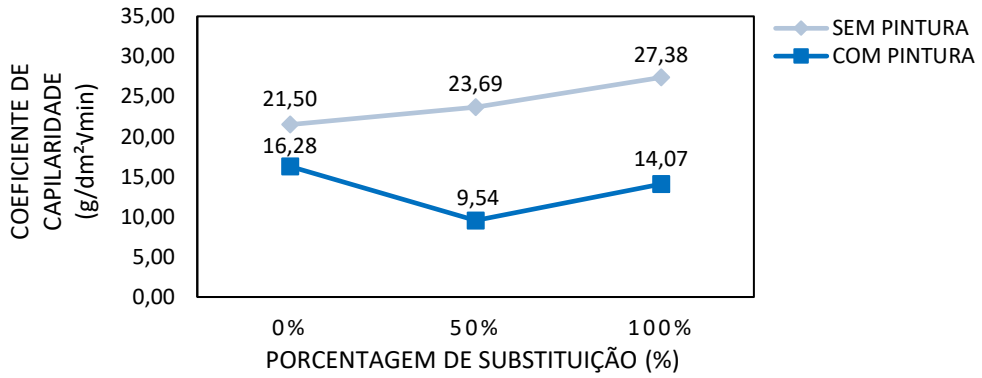


Figura 4 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas

Foi realizada uma ANOVA para avaliar a relevância das variáveis independentes (“% de substituição” e “condição (com e sem tinta)”) sobre a variável dependente (“coeficiente de capilaridade”). Conforme apresentado no Quadro 4, considerando os valores-p obtidos, para um nível de significância de 5%, todas as variáveis analisadas apresentaram efeito significativo na variável de resposta. É possível inferir que a variável que apresentou maior grau de influência no coeficiente de capilaridade das argamassas foi a “condição (com e sem tinta)” ($F_{calculado}$ = 266,678), seguida da interação entre as variáveis ($F_{calculado}$ = 18,294) e da “% de substituição” ($F_{alculado}$ = 12,577).

Quadro 4 – ANOVA para variável dependente "coeficiente de capilaridade (g/dm²√min)" aos 28 dias

Variáveis	SQ	GL	MS	Teste F	Valor - p	Significância
Interseção	6328,125	1	6328,125	3169,345	0,000000	S
% de substituição	50,223	2	532,467	12,577	0,0011135	S
Condição (com e sem tinta)	532,467	1	25,112	266,678	0,000000	S
Interação	73,064	2	36,527	18,294	0,000227	S
Erro	23,960	12	1,997	-	-	

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo

Para complementar a ANOVA, realizou-se a comparação múltipla de medias pelo teste de Tukey, para o coeficiente de capilaridade das argamassas. O teste de Tukey indicou que a argamassa com tinta e 50% de agregado miúdo reciclado obteve média estatisticamente diferente das demais argamassas, com o menor coeficiente de absorção por capilaridade, coerentemente com o resultado de resistência à compressão. Para os traços com pintura, as argamassas com 0% e 100% não apresentaram diferença estatisticamente significativa em seus resultados, bem como os pares de argamassas de 0% com 50% e 50% com 100% de substituição e sem pintura. Portanto, o maior valor de coeficiente de absorção de água por capilaridade, para as argamassas ensaiadas sem pintura, atrelado ao traço com 100% de agregado miúdo reciclado (100% RCC), possivelmente se deve ao seu maior fator a/c efetivo.

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor. Observou-se uma diferença no comportamento das argamassas considerando-se os diferentes ambientes de exposição. A Figura 5 evidencia a dependência da resistência à difusão ao vapor das argamassas com relação às condições de exposição e à presença da tinta.

O Quadro 5 apresenta os resultados da ANOVA conduzida para determinar a influência das variáveis "porcentagem de substituição", "ambiente de exposição (85% e 50% de UR)" e "condição (com ou sem pintura)" sobre o fator de resistência à difusão de vapor. Considerando os resultados obtidos de valor-p, para um nível de significância de 5%, todas as variáveis dependentes apresentaram, individualmente, efeito estatisticamente significativo sobre os resultados. A variável que teve maior influência na permeabilidade ao vapor foi a "condição (com e sem pintura)" ($F_{calculado}$=188,3286), seguida pelo "ambiente de exposição" ($F_{calculado}$=22,4179) e "% de substituição" ($F_{calculado}$=12,8001). Analisando as interações entre as variáveis, a combinação da "% de substituição" e da "condição (com e sem pintura)" também é significativa.

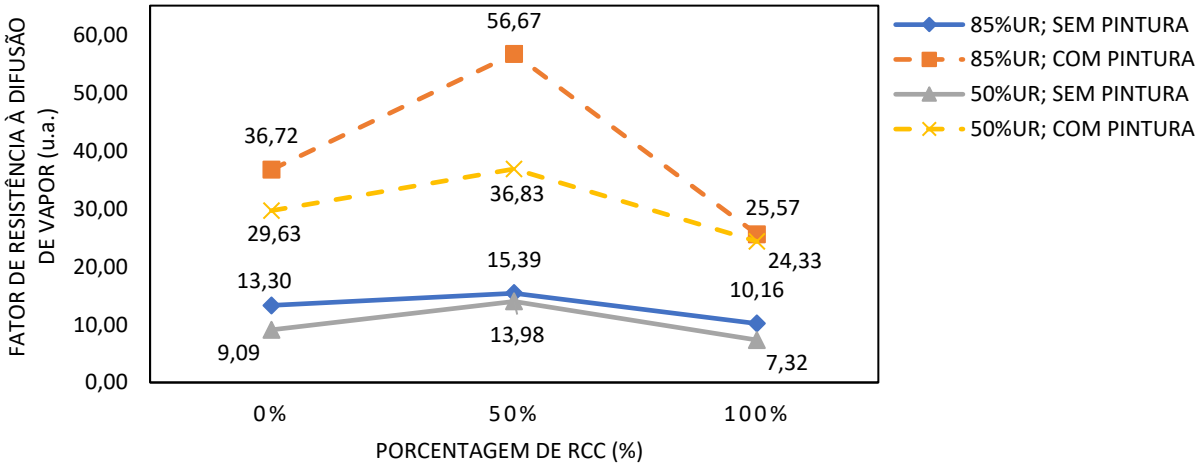


Figura 5 – Fator de resistência à difusão de vapor

Quadro 5 – ANOVA para variável dependente "fator de resistência à difusão de vapor"

Variáveis	SQ	GL	MS	Teste F	Valor - p	Significância
Interseção	32429,50	1	32429,5	742,5425	0,000000	S
% de substituição	559,03	1	559,03	12,8001	0,000804	S
Ambiente de exposição	1958,14	2	979,07	22,4179	0,000000	S
Condição (com e sem pintura)	8224,99	1	8224,99	188,3286	0,000000	S
% de substituição*ambiente de exposição	186,06	2	93,03	2,1310	0,129921	NS
% de substituição* Condição (com e sem pintura)	644,38	2	322,19	7,3773	0,001608	S
Ambiente de exposição*Condição (com e sem pintura)	162,17	1	162,17	3,7132	0,059915	NS
% de substituição*ambiente de exposição*condição (com e sem pitura)	276,35	2	138,18	3,1638	0,051201	NS
Erro	2096,33	48	43,67	-	-	-

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; S – Significativo; NS – Não significativo

Para complementar a ANOVA e identificar quais dos pares apresentaram diferença significativa entre si, foi conduzida uma comparação múltipla de médias utilizando o teste de Tukey, apresentada no Quadro 6. As amostras ensaiadas no ambiente com 85% de umidade relativa (UR) apresentaram um fator de resistência à difusão de vapor maior em comparação com aquelas expostas a um ambiente de 50% de umidade relativa (UR). Esse comportamento se deve à higroscopicidade das argamassas e aos gradientes de umidade, que geram, em um ambiente de exposição com maior umidade relativa, transmissão mais acentuada de vapor.

Quanto à substituição pelo agregado miúdo reciclado nas argamassas, identificou-se maior fator de resistência à difusão de vapor nas argamassas com 50% de RCC em comparação às com 100% RCC. Essa redução pode estar relacionada ao maior fator a/c efetivo da mistura, especialmente na condição "com pintura".

Quadro 6 – Teste de Tukey para o fator de resistência à difusão de vapor

#	Ambiente de exposição (UR%)	% de substituição	1	2	3	4	5	6
1	50	0	X					
2	50	50		X				
3	50	100			X			
4	85	0				X		
5	85	50					X	
6	85	100						X

Nota: Vermelho: diferença estatisticamente significativa; Azul: inexistência de diferença estatisticamente significativa

4 CORRELAÇÕES DE RESULTADOS

Para facilitar a visualização do comportamento das propriedades analisadas, foram criados as figuras 6, 7 e 8, onde os valores de desempenho mecânico (resistência à tração na flexão e resistência à compressão), coeficiente de absorção e fator de resistência à permeabilidade ao vapor foram comparados, permitido observar a influência das propriedades entre si.

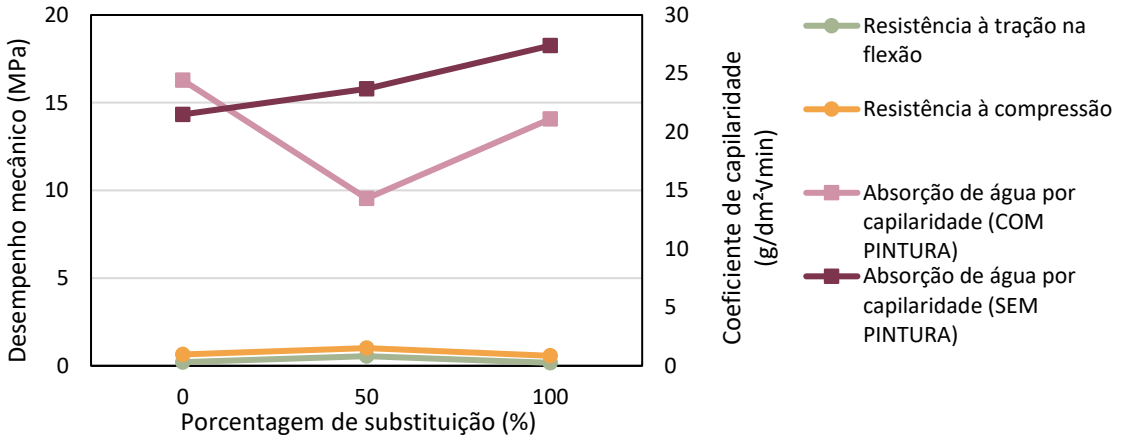


Figura 6 – Desempenho mecânico x Coeficiente de capilaridade

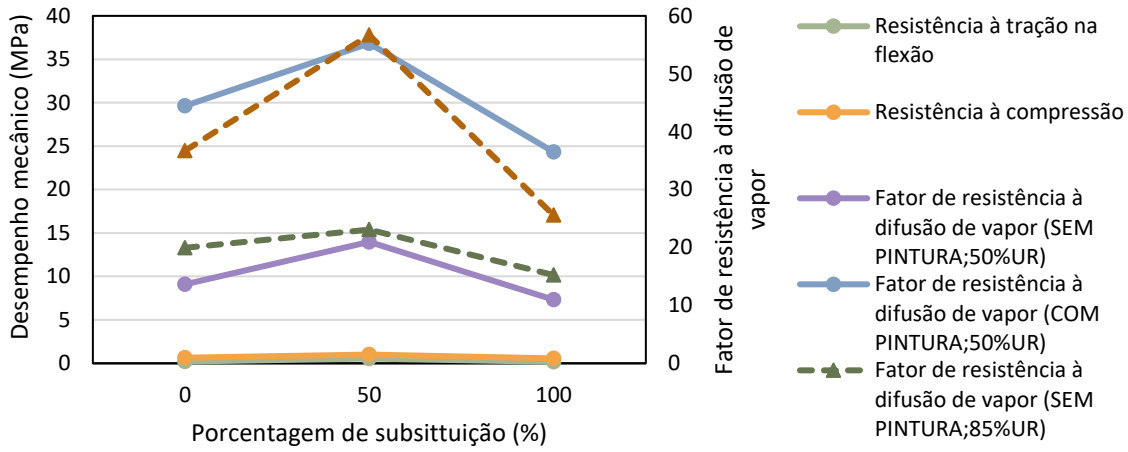


Figura 7 – Desempenho mecânico x Fator de resistência à difusão de vapor

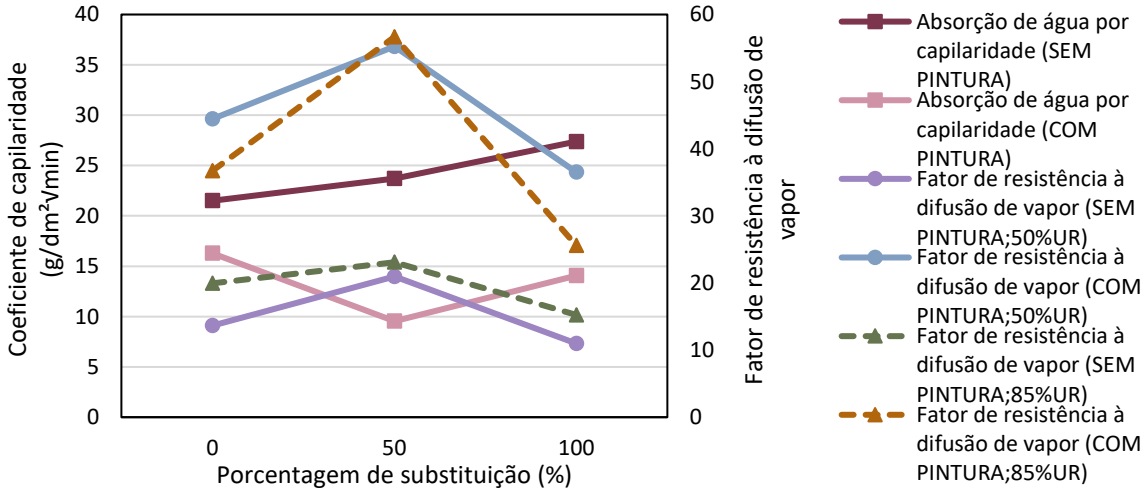


Figura 8 – Coeficiente de capilaridade x Fator de resistência à difusão de vapor

Para todas as correlações analisadas (figuras 6, 7 e 8) nota-se que a argamassa com substituição de 50% do agregado miúdo convencional pelo reciclado obteve resultados promissores e superiores aos demais, muitas vezes representada por picos.

Essa superioridade, pode estar relacionada à redução na demanda de água, para dosagem, em razão da pré-saturação realizada nos agregados miúdos reciclados para evitar que a água de amassamento fosse absorvida pelo agregado, obtendo fatores a/c efetivos menores (quadro 1). Outro aspecto que deve-se considerar é a metodogia de inserção dos materais reciclados na betoneira, já que ela permite a formação de uma fina camada de nata na supercíe do agregado, tornando este mais resistente e com possibilidades reduzidas de transferencia de água na interface agregado reciclado/ matriz cimenticia, isso pode ter contribuido para impedir a movimentação da água de pré-saturação do agregado.

Ainda, pode ter ocorrido uma melhora no empacotamento e compactação dessas argamassas devido aos diferentes formatos dos agregados, onde o convecional se apresenta com formato mais arredondado e o reciclado com formatos mais angulosos, proporcionando uma argamassa com menor quantidade de vazios. Além do formato, a própria textura do agregado reciclado pode ter influenciado dos resultados, proporcionando uma melhor aderência com a matriz de cimento. Além disso, sua maior porosidade, quando comparado com o agregado convencional, faz com que a matriz cimentícia adentre na estrutura interna do agregado reciclado e os cristais de hidratação precipitem nos seus poros.

Outro aspecto relevante é que como o agregado miúdo reciclado é composto apenas por argamassa de alta resistência (f_{cm} = 40 MPa), podem existir grãos anidros, que foram hidratados pela água de pré-saturação do agregado miúdo reciclado, agindo como um agente de cura interna, resultando em uma densificação da matriz.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios realizados, verificou-se que:

- **Quanto ao desempenho mecânico**: A argamassa produzida com substituição de 50% de agregado natural por reciclado não apresentou diferença estatística quanto aos resultados de resistência à compressão.

- **Quanto à absorção de água por capilaridade**: A argamassa com substituição de 100% de agregado miúdo reciclado apresentou maior coeficiente de capilaridade quando analisada sem pintura. Porém, com pintura, a argamassa com 50% de agregado miúdo reciclado gerou o menor coeficiente de absorção por capilaridade, enquanto 0% e 100% RCC não apresentaram diferença estatisticamente significativa. Esse comportamento pode, possivelmente, ser relacionado com as relações a/c destas argamassas.

- **Quanto ao fator de resistência à difusão ao vapor**: A argamassa com substituição de 100% de agregado miúdo reciclado obteve menor fator de resistência que a argamassa com 50% de substituição. Ainda, os valores de resistência à difusão de vapor foram superiores considerando a exposição das amostras em ambiente com umidade relativa de 85% em comparação a 50%.

Considerando a análise estatística realizada, os resultados obtidos são considerados promissores, especialmente para a configuração com 50% de substituição. A prática de substituir agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de resíduos provenientes da própria indústria da construção pode beneficiar aspectos ambientais, econômicos e técnicos, contribuindo à preservação do meio ambiente e alinhando-se com as tendências globais de construção sustentável.

REFERÊNCIAS

ABRECON, 2020. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (ABRECON). Pesquisa setorial abreco 2020. Disponível em: https://abrecon.org.br/documentos-e-informa/pesquisa-setorial-abrecon-2020

AMORIM, Aldo Siervo de. Análise crítica da viabilidade econômica e ambiental do processo de reciclagem de resíduos de construção civil no âmbito de um município. 2018. Tese (Doutorado em Ciências). Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BRAND, Alexander S.; ROESLER, Jeffery R.; SALAS, Andres. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. Construction and Building Materials, v. 79, p. 83-89, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.047

BRASIL. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n.º 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307. Acesso em: 24 de maio de 2023.

CARRIJO, Priscila Meireles. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.

CARTUXO, F. BRITO, J; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J. R; LEDESMA, E. F; Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers. Journal Materials. v. 9, p. 1–26, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/ma9020098

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, 2013.

DESSUY, Thainá Yasmin. Concretos produzidos com substuituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclads de resíduos da construção civil (RCC). Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, 2021.

ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. Construction and Building Materials, v. 133, p. 416–424, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.132

EVANGELISTA; L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and concrete composites, v. 32, p. 9-14, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005

INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. ISO 12572: Hygrothermical performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties – Cup method. Suíça: ISO, 2016.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2001.

MALTA, Juliana Oliveira. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2012.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedade e materiais. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, Adam M. Propriedades do Concreto-5ª Edição. Bookman Editora, 2015.

SCALONE, Paola A.; SOUZA, Sueli T. D. M.; FIGUEIREDO, Edilene S. Gerenciamento de resíduos de construção civil: Estudo de caso em empreendimentos comercial e residencial em Londrina (PR). Revista Brasileira De Ciências Ambientais 40 (2016): 95-106. DOI: https://doi.org/10.5327/Z2176-947820168014

SOUZA, Beatriz Cordeiro de; PAES, Cássia Nayara dos Santos; BARBOZA, Lucas da Silva. Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

UNEP. United Nations Environment Programme. Global Status report for buildings and construction 2022.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARGAMASSA AUTONIVELANTE LEVE CONTENDO RESÍDUOS DE BORRACHA DA INDÚSTRIA CALÇADISTA (EVA – ETHYLENE VINYL ACETATE)

Maria Eduarda do Nascimento Souto[1]; Vynicius Barbosa dos Santos Moreira[2]; Jhennifer Larissa de Barros Silva[3]; Rian Campos Almeida[4]; Fabíola Luana Maia Rocha[5]; Aline Figueirêdo da Nóbrega[6]

[1]Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, eduarda.souto501@gmail.com
[2]Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, vynicius.barbosa@estudante.ufcg.edu.br
[3]Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, jhennifer.larissa@estudante.ufcg.edu.br
[4]Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, riancalmeida@gmail.com
[5]Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, fabiolamaiar@outlook.com
[6]Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, alinefnobrega@hotmail.com

RESUMO

A argamassa autonivelante é uma inovação que simplifica a execução do contrapiso por apresentar grande capacidade de fluxo sem vibração, sendo esta constituída por aglomerante, areia, água e aditivos. No entanto, os estudos sobre a avaliação de argamassas autonivelantes com agregados leves como o EVA (Ethylene Vinyl Acetate) ainda são incipientes. Assim, a pesquisa explorou a influência da substituição parcial da areia pelo EVA em teores de 5%, 10%, 15% e 20%. As misturas foram avaliadas a partir de uma proporção de 1:1:3 (cimento : fíler calcário: areia) em massa. No estado fresco, foram realizadas análises quanto ao índice de consistência, densidade de massa fresca, tempo de fluxo e tempo de regeneração e, no estado endurecido, observou-se a resistência mecânica, absorção por capilaridade e densidade de massa aparente. Os resultados obtidos demonstram que a substituição parcial do agregado miúdo pelo EVA proporcionou uma redução na densidade de massa fresca e aparente, além de não prejudicar a fluidez. Por outro lado, houve uma diminuição nos valores de resistência mecânica quando comparado à mistura de referência. Em síntese, o estudo avança na pesquisa sobre argamassas autonivelantes, incorporando o EVA para a sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Contrapisos, Fluidez, Produtividade, Trabalhabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Conforme citado por Martins (2009), a principal característica da argamassa autonivelante é possuir uma elevada fluidez, em comparação às argamassas convencionais. A aplicação desse novo tipo de material é executada com a ajuda de uma mangueira que espalha a argamassa em formas, moldes ou em lonas plásticas, sem a necessidade de uma energia de espalhamento. (e. j., Martins 2009a). Outras questões relevantes com relação à aplicação da argamassa autonivelante são a diminuição de mão de obra e do tempo para a aplicação dessa argamassa, já que ela praticamente espalha-se em decorrência de seu próprio peso.

De acordo com Nakakura e Bucher (1997), outra vantagem desse material é a rápida liberação da área aplicada, tendo em vista que pode ser liberada ao tráfego leve após decorridas duas ou três horas após a sua aplicação e posta em serviço com oito horas para serviços leves e 24 para serviços pesados, entretanto, como citado por Souza (2013), deve-se respeitar, como qualquer outra argamassa, o seu tempo de secagem e eliminação da umidade, em torno de 14 dias.

A argamassa autonivelante representa uma inovação recente na indústria, sendo um tipo de composto fluido projetado especificamente para nivelar superfícies de forma automática e uniforme. Segundo Martins (2009), define-se argamassa autonivelante como uma argamassa que tem a capacidade de preencher espaços vazios e se auto-adensar devido à ação da gravidade e ao seu próprio fluxo, sem segregação. Ela se destaca por sua habilidade de fluir e se adensar de forma uniforme. Quanto aos equipamentos e procedimentos de dosagem, ainda não foram padronizados, sendo necessários estudos mais aprofundados.

Dado o relativo escasso aprofundamento deste tema nos âmbitos técnico e acadêmico, conforme observado por Battistuz (2021), em face do impacto ambiental decorrente da atividade da construção civil, que abrange desde o consumo de recursos naturais na produção de materiais até a modificação do solo e da vegetação, bem como o aumento no consumo de energia elétrica, tornou-se necessário buscar soluções que visem reduzir esses impactos prejudiciais (Ministério Do Meio Ambiente, s.d. 2021). Nesse sentido, movidos pela adoção de práticas sustentáveis na construção civil, têm surgido diversos estudos nas áreas de tecnologia de construção, processos construtivos e materiais, buscando desenvolver soluções que sejam mais sustentáveis.

A literatura científica ainda apresenta uma escassez de estudos sobre argamassas autonivelantes, especialmente no que se refere à incorporação de Resíduos de Borracha da Indústria Calçadista, como o Etileno-Acetato de Vinila, do inglês Ethylene Vinyl Acetate (EVA). O EVA é um material amplamente utilizado na indústria calçadista como uma alternativa ao couro. De acordo com Arruda Filho (2012), os resíduos sólidos de EVA gerados por essa indústria podem ser utilizados na construção civil como agregado sintético para a elaboração de compósitos leves. Estudos da literatura ressaltam que os resíduos de EVA possuem uma baixa massa específica, boas características acústicas e térmicas, além de serem resistentes a fungos.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do EVA nas propriedades frescas e endurecidas de argamassas autonivelantes. Para tanto, foi desenvolvido uma mistura de referência e outras quatro, com diferentes proporções de resíduo de EVA (5%, 10%, 15% e 20%) como substituição parcial do agregado miúdo. Ao oferecer uma alternativa para a utilização dos resíduos de borracha em argamassas, o presente estudo visa contribuir para o avanço do desenvolvimento sustentável não só da indústria da construção civil, como também da indústria calçadista.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS

O programa experimental foi traçado a partir dos seguintes materiais: cimento portland (CP V-ARI), aditivo superplastificante, filer calcário, areia natural (AN), resíduo calçadista (EVA) e água. No Quadro 1 são apresentados os resultados das análises físicas realizadas nos materiais utilizados, nele contém os valores referentes às massas unitárias (relação da massa e volume sem compactar, levando em consideração os vazios) e específicas.

Quadro 1 - Características físicas dos materiais.

Material	Massa Unitária (g/cm³)	Massa Específica (g/cm³)
Cimento Portland (CP V-ARI)	0,890	2,92
Filer Calcário	1,12 (peneira 200)	3,34 (peneira 200)
Areia	1,670	2,62
Água	1,00	-
EVA	0,264	1,25

2.2 MÉTODOS

O fluxograma da pesquisa seguiu a seguinte ordem: caracterização dos materiais (física e química), definição do traço, análises do estado fresco (índice de consistência, densidade de massa fresca, ensaio do mini funil e tempo de regeneração) e análises do estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração por flexão, absorção por capilaridade e densidade de massa aparente).

2.2.1 Caracterização dos materiais

Na primeira etapa, referente à caracterização física e química dos materiais e as informações sobre o EVA foram obtidas a partir da pesquisa de Silva (2023) que realizou a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa. Para a areia, foi realizado o ensaio de granulometria convencional, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), enquanto para o Filer, EVA e CP-V o procedimento foi realizado a partir de um granulômetro à laser. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do cimento e do filer calcário , respectivamente.

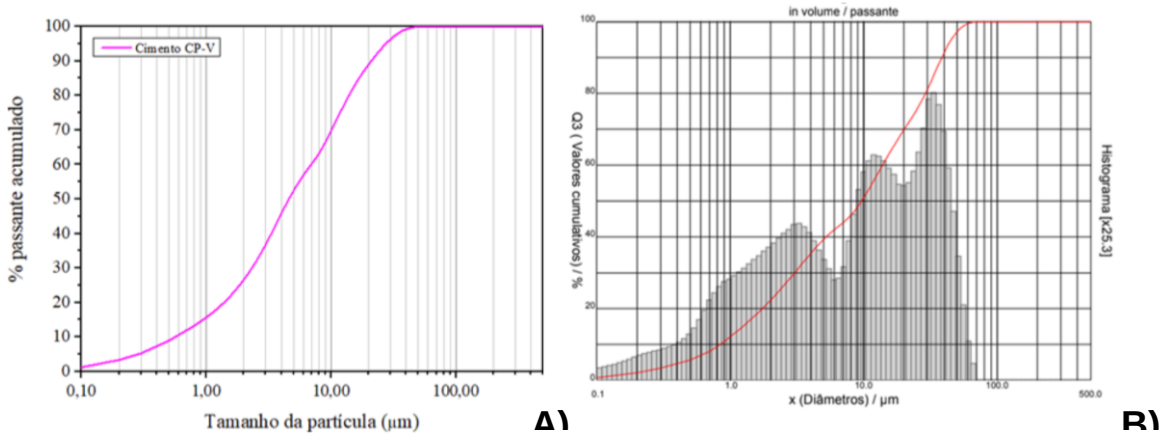


Figura 1 – a) Distribuição granulométrica do CP V-ARI b) Distribuição granulométrica do fíler calcário

Segundo Oliveira (2023), a análise da distribuição granulométrica do filer de calcário (FC) foi conduzida utilizando a técnica de difração de raio laser, através do analisador de partículas do modelo CILAS 1090, com uma faixa de análise que variou de 0,04 a 2500 micrômetros. O estudo foi conduzido com amostras contendo 5 gramas e é perceptível que o filer de calcário é predominantemente constituído por partículas de dimensões reduzidas. Esse aspecto ressalta a viabilidade de empregar esse material como adição em argamassas autonivelantes, com o propósito de aprimorar a fluidez e a coesão da mistura. No estudo de Silva (2023), em relação à granulometria, pode-se afirmar que a areia apresenta uma concentração significativa de diâmetro situada na faixa de 0,15 a 0,3 mm, apresentando um diâmetro máximo de 1,2 mm e um módulo de finura de 2,56 como podemos ver na Figura 2(a). Quanto ao EVA, foi utilizado um granulômetro CILAS 1090 como método para determinar a distribuição granulométrica, o qual permite medir a distribuição das partículas em um intervalo diametral que varia de 0,04 µm a 500 µm. Como resultado, observou-se que o diâmetro predominante das partículas do cimento estava em torno de 50 µm. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Segundo Silva (2023), o mesmo apresentou uma dimensão máxima de 56 µm, como podemos ver na Figura 2(b).

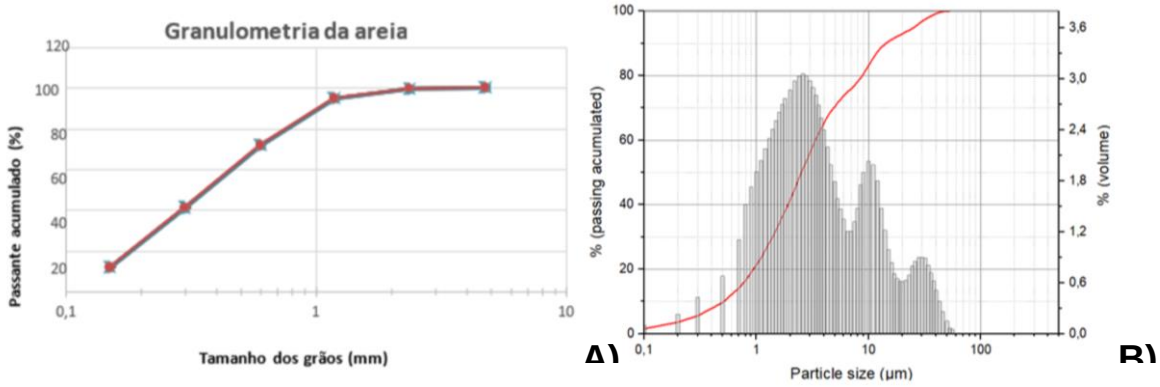


Figura 2 – a) Distribuição granulométrica da areia; b) Distribuição granulométrica do EVA

2.2.2 Definição da dosagem das misturas

Todas as misturas foram avaliadas utilizando uma proporção de 1 : 1 : 3 (cimento : fíler calcário : areia) em massa, a relação água-cimento de 0,8 e a porcentagem do aditivo de 0,6% calculado em função da massa do cimento. Esta proporção apresentou uma fluidez adequada, um espalhamento de 26,5 cm, bordas regulares e não houve exsudação nem segregação da mistura.

O processo de mistura, adaptado da NBR ABNT 16541 (2016), foi feito da seguinte maneira: primeiramente foram realizadas as pesagens dos materiais, em seguida, mistura-se os secos por 1 minuto com auxílio de uma colher de pedreiro. Adicionou 75% da água e misturou por 30 segundos com a colher e depois colocou durante 1 minuto no misturador em velocidade baixa. Após isso, realizou as raspagens nas laterais para soltar parte da mistura do balde durante 1 minuto. Por fim, adiciona-se 25% da água e mistura-se por 2 minutos. Vale ressaltar que nas argamassas com adição de aditivo superplastificante, a dosagem deste era aplicada sobre o peso do cimento e incorporado aos 75% da água adicionada inicialmente. Quando tinha a presença do EVA, este componente era misturado junto dos materiais secos.

Inicialmente substituiu a areia pelo EVA no traço em volume, com porcentagens definidas conforme a literatura, após isso converteu para massa. O Quadro 2 descreve todas as misturas com EVA e as quantidades de materiais. Inicialmente, o EVA foi introduzido mantendo a mesma quantidade de

aditivo do traço de referência. Quando as características de auto nivelamento não foram alcançadas, aumentou-se o aditivo, mantendo fixo o fator água-cimento em todas as misturas.

Quadro 2- Identificação das misturas analisadas

Amostra	Aditivo (%)	CP-V (g)	EVA (g)	Filer Calcário (g)	Areia (g)	Aditivo (%)	Água (g)
REF1	0,6	500	-	500	1500	3	400
5%EVA	0,7	500	10	500	1425	3,5	400
10%EVA	0,7	500	21	500	1351	3,5	400
15%EVA	0,725	500	35,5	500	1275	3,625	400
20%EVA	0,7	500	47,5	500	1200,9	3,5	400

2.2.3 Ensaios no estado fresco

2.2.3.1 Índice de consistência

O índice de consistência foi determinado conforme a NBR 13276 (2005), adaptada para argamassa autonivelante, utilizando o tronco de cone e a mesa de consistência, sem a necessidade dos golpes devido à fluidez da argamassa. As análises seguiram Martins (2009), como mostrado na Figura 3.

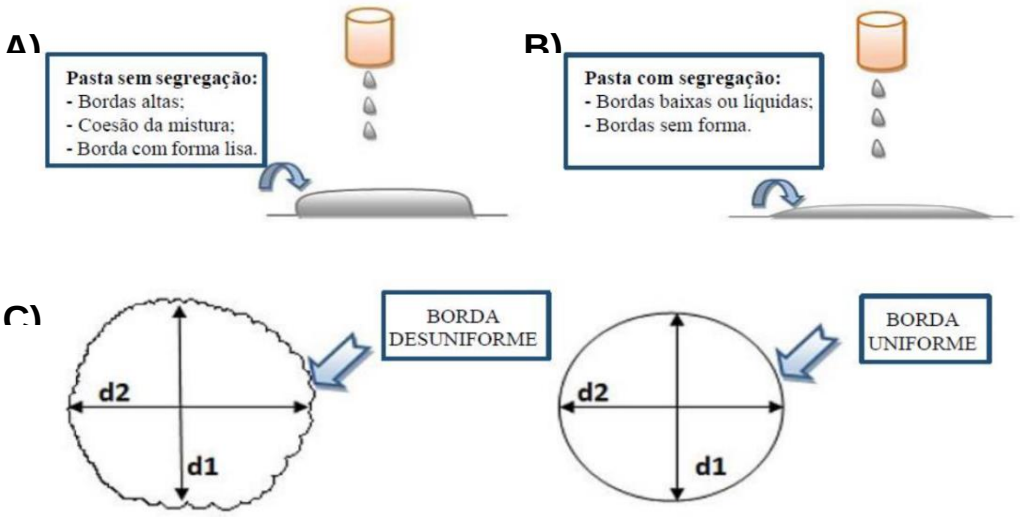


Figura 3 - a) aspecto da pasta sem segregação b) aspecto da pasta segregada c) Análise visual da borda da pasta escoada.

2.2.3.2 Tempo de fluxo – Mini funil-V

O teste de escoamento no Funil em V mede a fluidez e trabalhabilidade do concreto autoadensável (CAA). Para argamassas autonivelantes, utilizou-se o equipamento normativo da EFNARC (2002), com dimensões na Figura 4-a, e o aparato ilustrado na Figura 4-b.

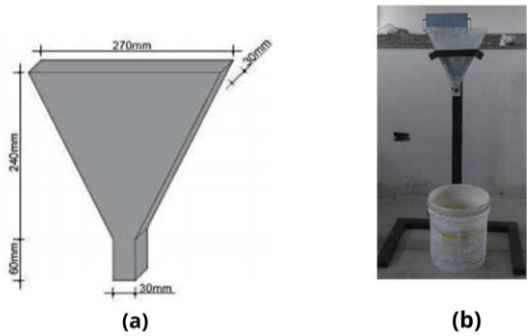


Figura 4 - Dimensões do mini funil-V

Segundo a EFNARC (2002), o tempo de escoamento da Argamassa Autonivelante (AAN) no teste do funil-V deve ser de 6 a 12 segundos. Se não atender a esses parâmetros, recomenda-se uma nova formulação. No teste, a argamassa é vertida no funil e o tempo é cronometrado desde a abertura até o esvaziamento completo do funil.

2.2.3.3 Tempo de regeneração

O procedimento para determinar o tempo de regeneração consiste em colocar a bandeja em uma superfície nivelada e livre de vibrações e, após a conclusão da mistura, despejar a argamassa na bandeja, formando uma camada de aproximadamente 6 mm ± 1 de espessura. O primeiro corte é realizado após 10 minutos, a partir do início da preparação da argamassa. Esse corte é executado utilizando uma barra de metal, mantida a um ângulo de 45 graus. Conforme as normas, cada corte deve ser feito a uma distância de 25 mm, deslocando a barra de maneira suave pela mistura, em um período de aproximadamente 5 a 10 segundos, com a parada ocorrendo próximo à borda da bandeja. Os cortes devem ser feitos até que o material não seja mais capaz de retornar ao seu estado original, sem apresentar marcas, reentrâncias ou desníveis na superfície, conforme detalhado por Mendes (2019) e o tempo de cura é determinado após um período de 24 horas. A Figura 5 demonstra a realização do ensaio no estado fresco e avaliação dos cortes após a argamassa estar endurecida.

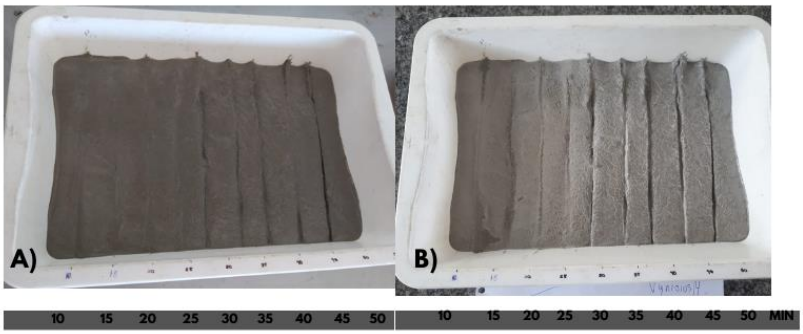


Figura 5 - Exemplo de corte na amostra de argamassa: (a) estado fresco e (b) estado endurecido

2.2.3.4 Densidade de massa fresca

O procedimento para a determinação da densidade de massa fresca foi realizado de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005), a partir de uma pequena adaptação: a aplicação de golpes na argamassa autonivelante não foi necessária devido à sua fluidez e auto-adensamento.

2.2.4 Ensaios no estado endurecido

2.2.4.1 Tração na Flexão e Compressão Axial

Neste foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de ensaio com o objetivo de obter uma média representativa. Os corpos de prova foram moldados com formato prismático, seguindo as dimensões especificadas pela norma NBR 13279 (2005), que estabelece as medidas de 4x4x16 centímetros para cada corpo de prova. Na Figura 6 são mostrados os ensaios de compressão axial e o ensaio de resistência à tração, respectivamente.

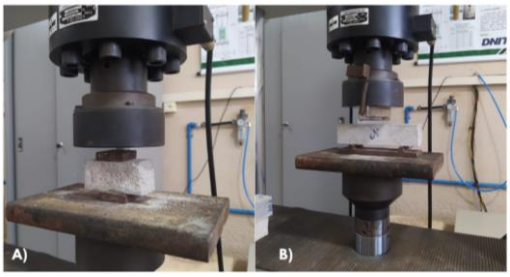


Figura 6 - a) ensaio de resistência à compressão axial e b) Ensaio de resistência à tração.

2.2.4.2 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012). O ensaio foi realizado para a idade de 28 dias, produzindo 3 corpos de prova, totalizando 15 amostras. Como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de absorção por capilaridade

2.2.4.3 Densidade de massa aparente

O ensaio para a determinação da massa aparente foi realizado conforme a NBR 13280 (2005).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTADO FRESCO

Durante a dosagem das argamassas, percebeu-se uma grande sensibilidade do aditivo superplastificante quando incorporado nas misturas e, a fim de obter as melhores características de uma argamassa autonivelante, alguns ajustes foram realizados: quando as argamassas apresentaram uma redução na fluidez, o teor de aditivo foi aumentado e, quando apresentaram um excesso de espalhamento, o teor de aditivo foi reduzido, sempre mantendo a relação água-cimento em 0,8. Dessa forma, Nesse sentido, para além da mistura de referência, foram obtidas outras quatro: 5% de EVA

com 0,7% de aditivo, 10% de EVA com 0,7% , 15% de EVA com 0,725% e 20% de EVA com 0,7%, misturas estas que foram analisadas quanto à densidade de massa fresca, tempo de regeneração e tempo de fluxo.

Os resultados para densidade de massa fresca bem como a relação do espalhamento com o teor de aditivo podem ser observados na Figura 8.

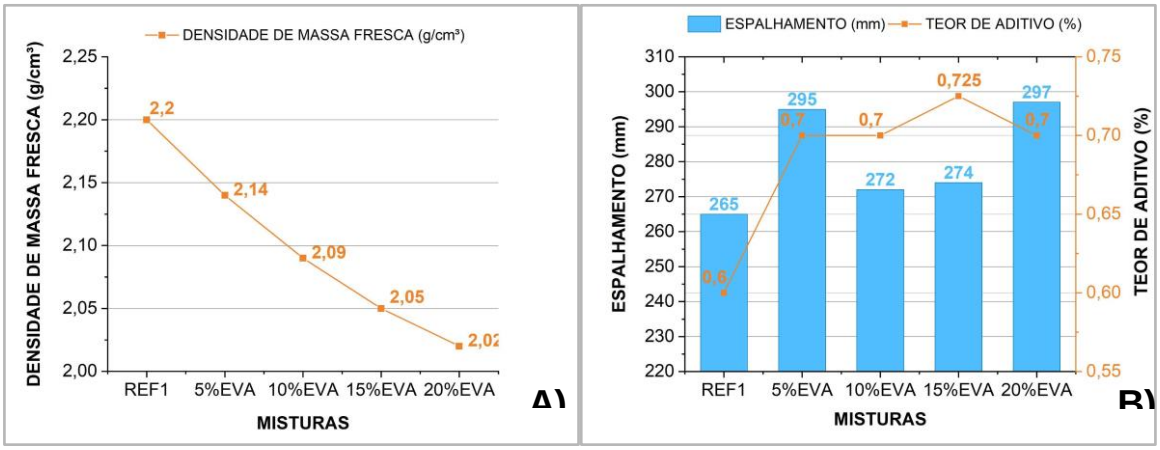


Figura 8 - a) Densidade de massa fresca; b) Espalhamento X Teor de aditivo

Os resultados mostraram uma redução gradativa da densidade de massa fresca (Figura 8-a), indicando que a substituição parcial do agregado miúdo torna as misturas mais leves. Entre a mistura de referência (REF1) e a com 20% de EVA (20%EVA), houve uma queda de 8,18% na densidade de massa fresca.

A Figura 8-b mostra que o espalhamento das argamassas com EVA variou de 272 mm até 297 mm. Segundo Schaefer et al. (2017) o valor de espalhamento pode variar de 270 mm a 310 mm, e Anjos et al. (2020) em sua pesquisa define um valor de 252 mm cm a 339 mm, ou seja, os valores obtidos estão de acordo com a definição destes autores, entretanto fora da faixa de valores da EFNARC (2001). Além disso, notou-se que as misturas com 5% e 20% de EVA, cuja quantidade de aditivo foi de 0,7% para ambos, atingiram praticamente o mesmo espalhamento, e com 10% e 15% de EVA com proporções de aditivo variando apenas 0,025%, obteve-se também quase o mesmo espalhamento. No que diz respeito aos ensaios de tempo de fluxo e tempo de regeneração, os resultados podem ser visualizados na Figura 9.

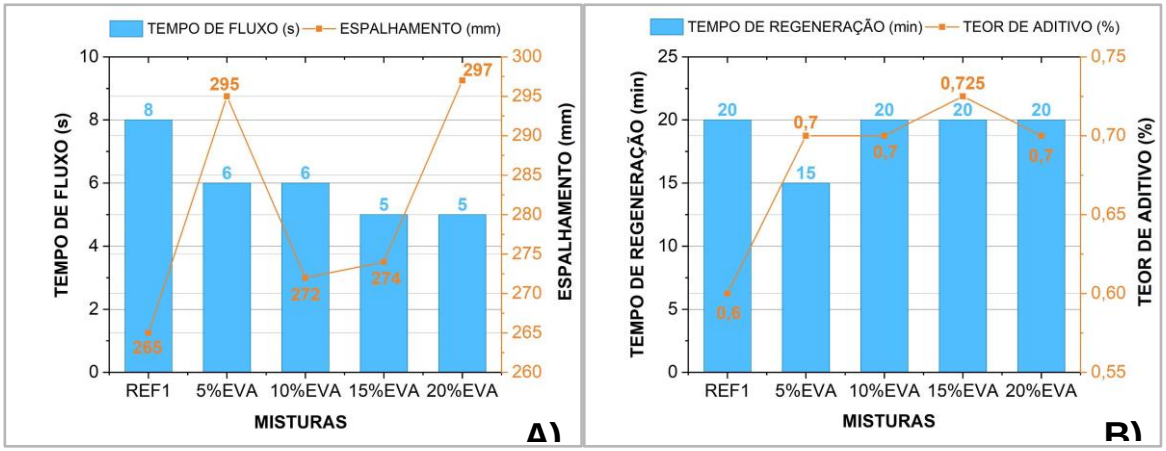


Figura 9 - a) Tempo de fluxo X Espalhamento; b) Tempo de regeneração X Teor de aditivo

A Figura 9-a demonstra uma tendência: quanto maior a porcentagem de EVA, menor o tempo de fluxo da mistura. O intervalo de tempo de fluxo recomendado pela EFNARC é de 6 a 12 segundos, o que significa que apenas as misturas 15%EVA e 20%EVA ficaram fora do recomendado. Além disso, não foi possível observar nenhuma relação entre o tempo de fluxo e espalhamento obtido, visto que, para um mesmo tempo de fluxo, as misturas apresentaram espalhamentos discrepantes, como ocorreu na substituição 5%EVA e 10%EVA, bem como em 15%EVA e 20%EVA.

A partir dos resultados obtidos na Figura 9-b, observa-se que o tempo de regeneração das argamassas produzidas variou entre 15 a 20 minutos e, conforme citado em seu artigo, Cichineli (2012) aborda que o tempo em aberto médio da mistura de um contrapiso autonivelante industrializado é de 15 a 25 minutos em suas argamassas, o que significa que as misturas analisadas estão dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. Ademais, é possível perceber que o aditivo não influenciou nessas misturas quanto ao tempo de regeneração, pois mesmo com a variação de aditivo, as misturas, exceto 5%EVA, apresentaram os mesmos valores.

3.2 ESTADO ENDURECIDO

Para as análises em estado endurecido, as misturas foram moldadas e os corpos de prova foram colocados em cura úmida durante 28 dias, a fim de obter resultados como densidade de massa aparente, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial. Os resultados para os dois primeiros podem ser observados na Figura 10.

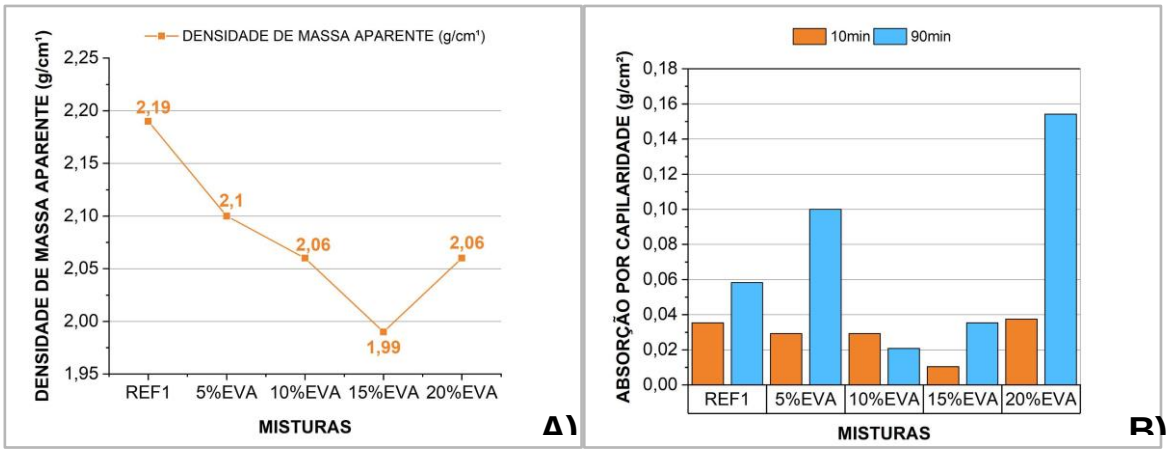


Figura 10 - a) Densidade de massa aparente; b) Absorção por capilaridade

Para a densidade de massa aparente (Figura 10-a), os resultados obtidos demonstraram uma redução nestes valores quando comparado à mistura REF1: nas misturas 5%EVA houve uma redução de 4,11%, em 10%EVA de 5,94%, e em 15%EVA de 9,13%. Entretanto, a mistura 20%EVA apresentou um resultado discrepante e se mostrou igual a densidade observada em 10%EVA, o que pode ser justificado devido a algum erro laboratorial.

Na Figura 10-b, que traz os resultados de absorção por capilaridade, nota-se que, quando comparado com a mistura REF1, com 10 minutos, todas as misturas com EVA tiveram um valor menor. Entretanto ao observar os valores obtidos nos 90 minutos, as misturas 5%EVA e 20%EVA apresentaram, respectivamente, cerca de 41,7% e 62,19% de aumento em relação a mistura de referência, enquanto as misturas 10%EVA e 15%EVA demonstraram um decréscimo de 64,32% e 39,28% respectivamente. Nesse sentido, não foi possível observar um comportamento padrão para este ensaio. Por fim, os resultados para a resistência mecânica podem ser observados na Figura 11.

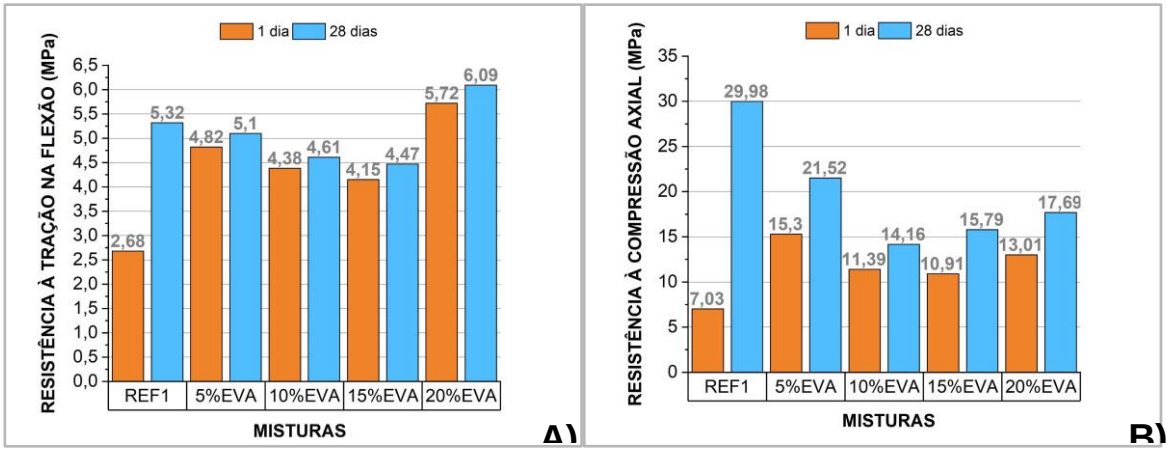


Figura 11 - a) Resistência à tração na flexão; b) Resistência à compressão axial

Quando se trata da resistência à tração na flexão (Figura 11-a), é possível observar que não houve grande variação, pelo fato de os valores estarem bastante próximos. Quando analisada a resistência com a idade de 1 e 28 dias, é possível perceber que a mistura de referência com 1 dia de cura apresentou cerca de 50,38% da resistência adquirida aos 28 dias, enquanto as misturas com EVA, apresentaram, com 1 dia, uma média de 94% da resistência adquirida aos 28 dias. Além disso, vale mencionar que a resistência da mistura com substituição de 20% de EVA foi 12,64% maior do que a mistura de referência.

No caso da resistência à compressão axial (Figura 11-b), é possível perceber que os valores de resistência com 28 dias de cura caíram em relação à mistura de referência, o que quer dizer que a presença do EVA diminuiu esta resistência, o que já era esperado, entendendo que com a substituição parcial do agregado miúdo a resistência tende a decrescer. Ao comparar a resistência à compressão com 1 dia de cura, notamos que na mistura REF1 a resistência inicial com 1 dia foi cerca de 23,45% da resistência adquirida com a idade de 28 dias, enquanto nas misturas com EVA a resistência inicial média com 1 dia foi cerca de 73,54% da resistência adquirida aos 28 dias. Nesse sentido, como foi observado na resistência à flexão, é provável que o EVA também acelere este processo de obtenção de resistência à compressão nas argamassas autonivelantes com esses materiais.

4 CONCLUSÕES

Com base no que foi analisado, o parâmetro de espalhamento, que avalia a fluidez da mistura, apresentou medições situadas na faixa de 26,5 a 29,7 centímetros, o que demonstra uma aplicação satisfatória dentre as faixas de valores de Schaefer et al. (2017) e Anjos et al. (2020). Além disso, observou-se que, à medida que foi aumentando a porcentagem de EVA, a densidade de massa fresca e densidade aparente foram reduzidas de 8,18% e 9,13%, respectivamente.

Para a análise do tempo de fluxo, apenas a mistura de referência obteve os valores dentro da faixa recomendada (6 a 12 segundos). As demais misturas com EVA apresentaram valores de 16,67% abaixo, destacando, que o EVA pode atrapalhar a viscosidade das argamassas. Portanto, outros tipos de aditivos que auxiliam na viscosidade podem ser incorporados nessas misturas.

Quanto ao tempo de regeneração, todas as argamassas estudadas obtiveram tempos iguais ou superiores a 15 minutos, que é o tempo mínimo necessário para sua utilização, dessa forma, as misturas analisadas sobre esse ponto de vista podem ser consideradas aplicáveis à obra.

Quanto às análises do estado endurecido, a absorção por capilaridade, com 10 minutos, todas as misturas apresentaram valores menores, entretanto, com 90 minutos, as misturas apresentaram um aumento considerável.

Na resistência à tração na flexão observa-se que as misturas com 5%, 10% e 15% de EVA tiveram uma diminuição na resistência com tempo de cura de um dia e 28 dias. Entretanto, com 20% tivemos um aumento significativo de 52,87% para um dia, e 12,64% para 28 dias, mostrando que proporções a partir de 20% podem afetar positivamente na resistência à tração por flexão. Já quando analisamos a resistência à compressão axial, todas as argamassas analisadas com substituição de EVA tiveram uma drástica queda na resistência, mostrando que o EVA diminui esse parâmetro como já era citado em outros estudos, pois com a substituição parcial desse tipo de material a resistência tende a decrescer. Logo, em ambas as análises de tração por flexão e compressão axial, as misturas com EVA mostraram aumento na resistência com um dia de cura, portanto, esse resíduo influência no aceleramento das reações iniciais com maior velocidade. Assim, o estudo sobre argamassas autonivelantes com incorporação de EVA atingiu seus objetivos. No entanto, são necessárias pesquisas futuras sobre proporções superiores a 20% de EVA e ensaios adicionais, como resistência à aderência à tração e retração por secagem. Investigar a influência do EVA saturado também é crucial. Essas pesquisas podem ampliar o uso de materiais sustentáveis na construção, reforçando a relevância das argamassas autonivelantes.

1. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____ . **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____ . **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____ . **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____ . **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____ . **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____ . **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____ . **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ANJOS, Marcos A. S. et al. **Properties of self - leveling mortars incorporating a high - volume of sugar cane bagasse ash as partial Portland cement replacement**. Journal Of Building Engineering, v. 32, 2020.

ARRUDA FILHO, N.T., DANTAS, C.P., LEAL, A. F., et al**., Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal**, Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient, v. 16, n. 8, pp. 894-902, 2012.

BATTISTUZ, Angélica Maria. **Uma visão geral sobre argamassa autonivelante e a potencialidade da adição de fibra polimérica reciclada**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

CICHINELLI, G. **Execução de contrapiso autonivelante industrial**. Revista Téchne, ed, v. 192, 2012.

EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification & guidelines for Polymer modified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use**. United Kingdom, 2001.

MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná – UFPR, 140 páginas, 2009.

NAKAKURA, E, H; BUCHER, H. R.E. **Pisos Autonivelantes. Propriedades e instalações**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Salvador, 1997.

OLIVEIRA, P. K. S. **Propriedades físicas e endurecidas de argamassas autonivelantes contendo resíduo da construção e demolição**. 2023. 102 páginas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

SCHAEFER, Cecília Ogliari. **Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes**. 2013. 385 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVA, Iranilza Costa da et al. **ARGAMASSA ESTABILIZADA PARA ASSENTAMENTO CONTENDO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA) E METACAULIM**. 2023. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Pb, 2023.

SOUZA, N. C. **Análise De Desempenho Do Contrapiso Autonivelante Em Relação Ao Sistema Tradicional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De Minas Gerais – UFMG, 119 páginas, 2013.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

LIGANTE ESPECIAL À BASE DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA A ARCO (EAEA) ATIVADA POR CO_2 SUPERCRÍTICO

Alexandre Silva de Vargas[a]; Larissa Paula[b]; Heliton Weide[c]; André Lubeck[d]; Daniel A. Bertuol[e]; João Castro-Gomes [f]

[a]DECC-Universidade de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, alexandre.vargas@ufsm.br

[b]PPGEC-Universidade de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, larissa.paula@acad.ufsm.br

[c]PPGEC-Universidade de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, heliton.weide@acad.ufsm.br

[d]DECC-Universidade de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, andre.lubeck@ufsm.br

[e]DEQ-Universidade de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil, daniel.bertuol@ufsm.br

[f]C-MADE, Centre of Materials and Building Technologies, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro. 6201-001 Covilhã, jpcg@ubi.pt

RESUMO

A produção do cimento Portland é responsável por uma demanda representativa matérias-primas e energia, com destaque à geração de CO_2. Isto mostra a importância no desenvolvimento de ligantes alternativos ao cimento Portland, de menor impacto ambiental, a partir do uso de resíduos como matéria-prima e processo com reduzida geração de gases de efeito estufa. Assim, o trabalho teve como objetivo desenvolver um ligante especial à base de escória de aciaria elétrica a arco (EAEA) ativada por CO_2 supercrítico. Foram preparadas argamassas com traço, em massa, de 1:3 (EAEA:areia) e teor de umidade de 7% na mistura, e lançadas em moldes cilíndricos (Ø 2,0cm e altura de 3,5cm) para a produção de corpos de prova (CP). Estes CP foram colocados em um reator e submetidos ao processo de ativação por CO_2 supercrítico a pressão (80bar) e temperatura (60°C) constantes, tendo como variável o tempo de exposição dos CPs ao processo de ativação (2h, 4h e 6h). Houve aumento da resistência à compressão entre 2h (7,54 MPa) e 4h (10,35 MPa) havendo estabilização na idade de 6h (11,24 MPa). Micrografias obtidas pelo MEV das amostras submetidas por 2h e 6h ao processo de ativação apresentavam uma morfologia densificada, não sendo identificadas formações cristalinas.

Palavras-chave: EAEA, CO_2, supercrítico, ligantes especiais

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, foram produzidas em torno de 66 milhões de toneladas (Mton) em 2021, já em âmbito mundial a produção registrada em 2020 foi de 4.166 Mton, colocando o país na 8ª posição na fabricação de cimento (SNIC, 2021). Essa alta produção de cimento Portland contribui com cerca de 8% das emissões de CO_2 geradas mundialmente (Cormos, 2022). Além disso, durante a produção do clínquer, principal matéria-prima do cimento Portland, há um elevado consumo energético, atingindo temperaturas de aproximadamente 1450°C (Costa *et al.*, 2013).

Com isso, observa-se que a redução das emissões de CO_2 no processo de produção de cimento dependerá da substituição de materiais cimentícios e da disponibilidade de captura e armazenamento de carbono (Calvin *et al.*, 2023). Neste contexto, a indústria de cimento Portland já utiliza adições de materiais cimentícios complementares, entre eles, a escória granulada de alto forno (GGBF) com a produção do cimento Portland tipo II, com adição de GGBF de até 34% de adição (CP II E) e o cimento Portland tipo III, com adição de escória granulada de alto fonro de até 75% (CP III), conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). No entanto, as escórias de aciaria elétrica a arco (EAF) ainda não são utilizadas pela indústria cimenteira devido a problemas de sua expansão quando presentes em ambientes confinados (Kim & Azimi, 2021).

Nesse sentido, na última década, vários autores vêm estudando o uso da tecnologia de ativação acelerada de diversas escórias de siderurgia, entre elas a GGBF e as escórias de aciaria, tanto elétrica (EAF) quanto por conversor de oxigênio (BOF). O Quadro 1 apresenta alguns desses trabalhos, com uso de escória EAF, GGBF, BOF e BF.

Quadro 1 – Trabalhos relacionados a ativação de escórias por carbonatação acelerada por CO_2

Autores	Ano	Material Precursor	Material avaliado	Relação água/mat. Seco	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Tempo	Resist. à Comp. Máxima (MPa)
Kassim et al	2022	EAF	Argamassa	0,3 (água/aglomerante)	-	5	2h	31
Kim *et al.*	2021	EAF	-	-	40 a 80	80 e 120	48h	-
Moon *et al.*	2019	GGBF	Pasta	Proporção de 0,15 em massa	20 ± 1	1	0,5h a 148h	37,7
Mo *et al.*	2016	Escória de aço	Ligante	0,4	23 ± 2	0,1	14d	72
Quaghebeur *et al.*	2015	BOF	Blocos	teor de umidade: 10% (massa)	20 a 140	2	até 16h	12 a 31
Park *et al.*	2014	BF	Argamassa	1,62 a 2,36	40	80	60min	52

Em relação ao Quadro 1, Kassim *et al.* (2022) estudaram argamassas à base de escoria EAF ativadas por soluções alcalinas. Entretanto, um dos processos de cura estudados pelos autores foi realizado por carbonatação acelerada. Segundo os autores, o alto teor de CaO (28,2%) da EAF poderia contribuir para o aumento da resistência mecânica no processo de cura acelerada e ao mesmo tempo capturar o CO_2. Os autores concluiram que a resistência à compressão das amostras submetidas à cura por CO_2 foi maior (31 MPa) do que a resistência das misturas não carbonatadas (3,9 MPA).

Ainda referente ao Quadro 1, Moon *et al.* (2019) utilizaram o processo de carbonatação acelerada (1 bar de pressão) de pastas à base de cimento e escória GGBF. Amostras contendo 50% de cimento Portland e 50% de escória GGBF submetidas a carbonatação acelerada atingiram resistência à compressão de 37,7 MPa, 3,29% superior as amostras sem serem submetidas ao processo de carbonatação (Moon & Choi, 2019).

Mo *et al.* (2016) analisaram o desempenho mecânico e a microestrutura de ligantes à base escória de aço submetida à carbonatação acelerada. Segundo os autores, a formação de fases de carbonatos de cálcio contribuem para o aumento de resistência das amostras (Mo *et al.*, 2016). Já Quaghebeur *et al.* (2015) desenvolveram um processo de carbonatação acelerada de escórias de aço para a produção de blocos, utilizando escórias de aço inoxidável e escórias BOF, trabalhando com pressão de 2 bar temperaturas entre 20°C e 140°C (quadro 1). Resistências à compressão entre 12 MPa e 31 MPa foram obtidas pelos blocos (Quaghebeur *et al.*, 2015).

Destas pesquisas destaca-se a utilização inovadora do uso de CO_2 supercrítico, estado obtido quando o gás está submetido a uma temperatura acima de 31,1°C e uma pressão acima de 73,6 bar, o que faz com que o material exiba propriedades de densidade semelhante a um líquido e capacidade de difusão semelhante a um gás (Park & Kim, 2014). Esse processo oferece vantagens como a maior reatividade, cinética mais rápida, geração de resíduos reduzida e menos pré-tratamento em comparação com a carbonatação aquosa (Kim & Azimi, 2021).

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um ligante especial à base de escória de aciaria elétrica a arco (EAEA) ativada por CO_2 supercrítico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Escória de aciaria de forno elétrico a arco (EAEA)

A escória de aciaria elétrica a arco (EAEA) foi coletada em uma siderúrgica localizada no sul do Brasil. Antes da coleta, a empresa havia pré beneficiamento o material por meio da cominuição em britador de mandíbulas, para comercialização como agregado, estando o material armazenado no pátio da indústria haviam 10 dias. Após a coleta, o material foi levado à secagem em estufa, na temperatura de 105°C até constância de massa (menos de 0,5% entre uma pesagem e outra). Após a secagem completa da escória, foi realizada a sua homogeneização, pelo método de quarteamento, conforme as diretrizes da NBR 10007 (ABNT, 2004). Por fim, houve a cominuição da escória em moinho de bolas, por 6 horas, na qual o material passante na peneira de malha 150 µm foi utilizado nesta pesquisa. No Quadro 2 é apresentada a caracterização granulométrica da EAEA. A massa específica da EAEA é de 3,789 g/cm^3.

Quadro 2 - Caracterização granulométrica da EAEA com o auxílio do granulômetro a laser

D_{10} (µm)	3,63
D_{50} (µm)	13,25
D_{90} (µm)	37,67
$D_{médio}$ (µm)	15, 91

Na Figura 1 é apresentado o difratograma de raios X (DRX) da EAEA.

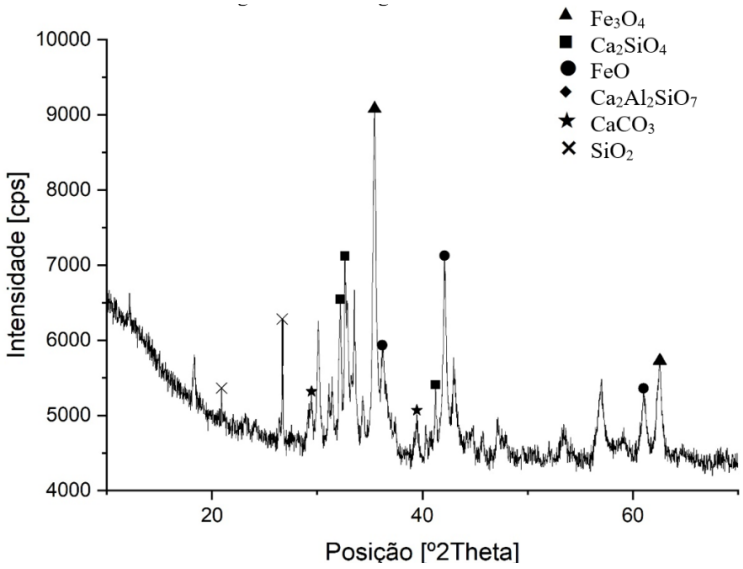


Figura 1 - Difratograma de raios X da EAEA

Conforme difratograma da EAEA, apresentado na Figura 1, foram identificadas fases cristalinas características como Wustita (FeO), Magnetita (Fe3O4), Larnita (Ca2SiO4), Calcita (CaCO3) e Quartzo (SiO2).

Na figura 2 é apresentada a micrografia partículas da EAEA, obtida por MEV, com ampliação de 3.000x.

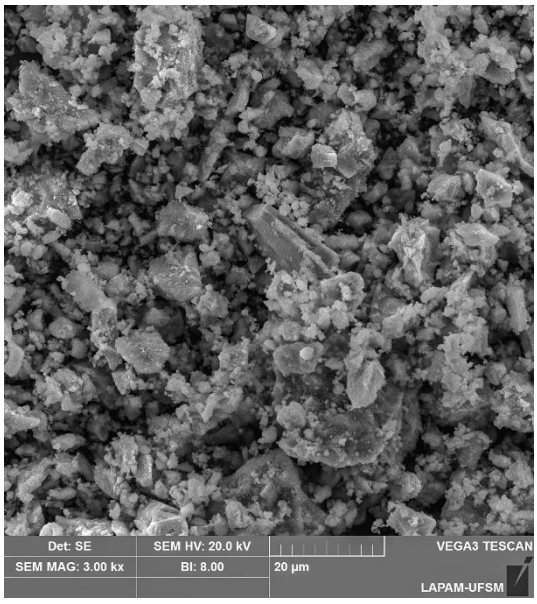


Figura 2 - Micrografia obtida pelo MEV das partículas da EAEA, ampliação de 3.000x

Com base na micrografia da EAEA apresentada na Figura 2, observa-se que as partículas de EAEA apresentam diferentes formas e diferentes dimensões, o que esta de acordo com a diâmetro médio das partículas de 15, 91 µm, determinada no granulômetro a laser (Quadro 2).

2.2 Areia

A areia de quartzo utilizada na moldagem dos corpos de prova foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Seguindo as diretrizes da NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, foram utilizadas quatro faixas granulométricas para a composição deste material, sendo estas 1,20 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15mm.

2.3 Água

Neste trabalho foi utilizada água de rede local.

2.4 Preparação das amostras

A preparação de amostras foi realizada a partir de adaptação da NBR 7215 (ABNT, 2019). O traço da argamassa, em massa, foi de 1:3 (EAEA:areia), sendo a areia composto por 4 granulometrias, conforme descrito no item 2.2. A relação água/EAEA utilizada foi de 0,28, a qual representa, em massa, 7% da umidade da argamassa no estado seco (EAEA e areia). Este teor de umidade foi determinado para que a amostra de argamassa pududesse ser retirada do molde triaxial logo após seu preparo. Este molde apresentava dimensões internas de 2 cm x 3,5 cm (diâmetro e altura), A compactação da argamassa ocorreu de maneira manual, com auxílio de um soquete metálico (Ø 16 mm e altura de 170 mm), de forma adaptada para com as prescrições da NBR 7182 - Solo - Ensaio de compactação. Desta forma, cada CP foi preparado com 3 camadas de argamassa, sendo cada camada compactada por 30 golpes utilizando o soquete metálico.

Após a compactação da última camada, a superfície superior do CP foi regularizada com auxílio de espátula metálica, e promovida a retirada do molde. Foram preparados seis CPs para cada um dos processos estudados no presente trabalho, descrito no item 2.6.

2.5 Processo de carbonatação acelerada da EAEA por CO_2 supercrítico

O processo de carbonatação acelerada por CO_2 supercrítico está ilustrado na Figura 3.

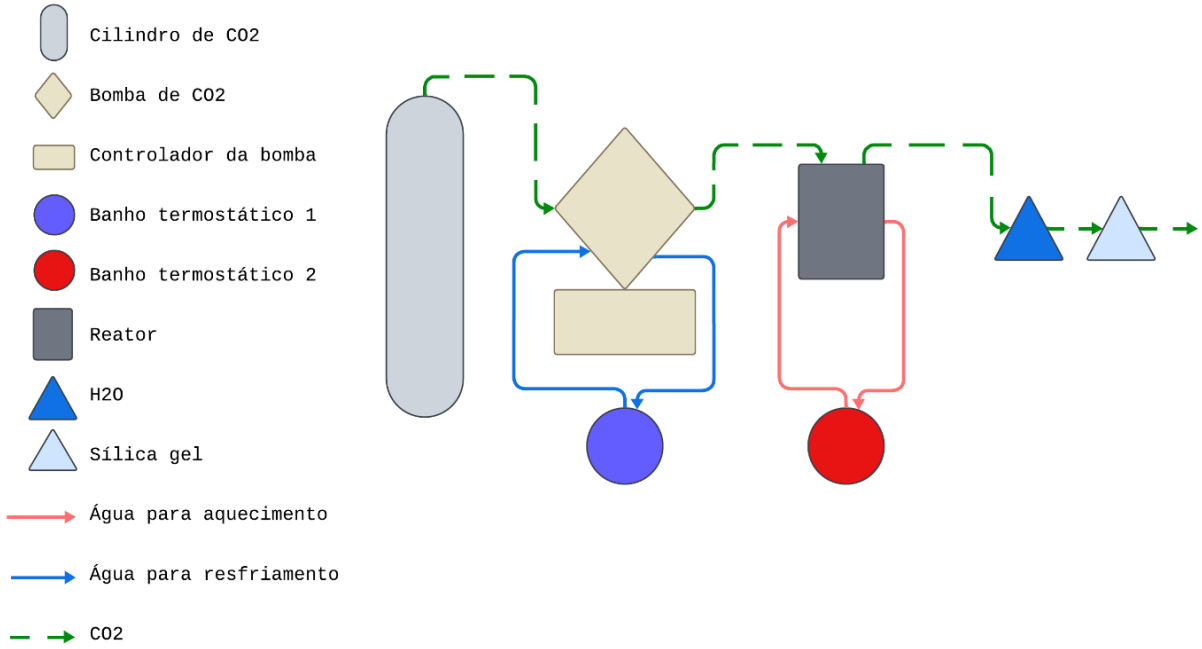


Figura 3 - Esquema do processo de carbonatação acelerada da EAEA por CO_2 supercrítico

Como apresentado na Figura 3, o processo de carbonatação acelerada da EAEA por CO_2 supercrítico foi realizado por um conjunto de quatro principais equipamentos, além de válvulas de controle: um reator, onde são armazenados seis corpos de prova de argamassa; uma bomba seringa com controlador; dois banhos termostáticos para controle das temperaturas de funcionamento do reator e da bomba de CO_2.

No presente trabalho, foi adotada a temperatura constante de 60°C, como será apresentado no item 2.6. Os equipamentos utilizados no processo de carbonatação acelereda por CO_2 supercrítico estão localizados no Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM) – UFSM. O reator foi produzido em tornearia pelo Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA) – UFSM, com dimensões externas de Ø13 cm x 12 cm de altura, com volume de 1,06 L. Na tampa do reator há encaixe para tubulação própria para a sua despressurização após procedimento de carbonatação, assim como para recipientes que servirão para a dissolução dos gases provenientes do processo. Além disso, utilizou-se uma bomba seringa Modelo 500D, adquirida junto a empresa Teledyne Isco. Somado a isso, foram utilizados dois banhos ultra termostáticos Quimis Modelo Q214M2, no qual um destes foi programado para trabalhar em conjunto com a bomba seringa, em temperatura de 4°C, e o outro teve a função de controlar a temperatura dentro do reator na temperatura de 60°C.

2.6 Procedimento de carbonatação acelerada utilizando o CO_2 supercrítico

O processo de carbonatação acelerada da EAEA no estado supercrítico operou com a definição dos seguintes parâmetros: pressão do gás CO_2 (80 bar), temperatura (60°C) e tempo de processo (2, 4 e 6 horas). A Figura 4 indica o esquema de configuração utilizada nos procedimentos.

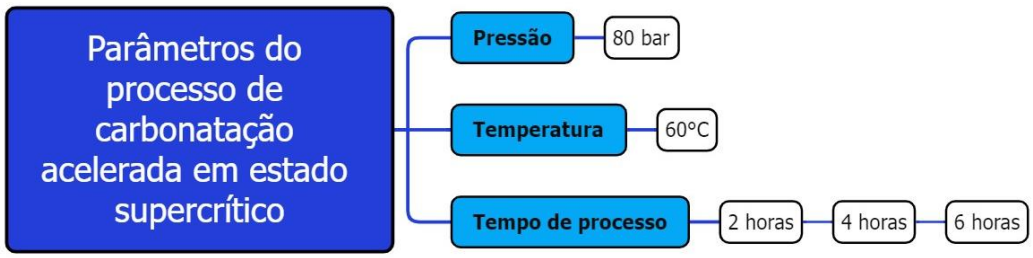


Figura 4 - Configuração do processo de carbonatação acelerada da EAEA em estado supercrítico

Para cada parâmetro estudado, foram preparados seis CPs, conforme descrito no item 2.4. Estes CPs foram dispostos em uma prateleira metálica perfurada, a fim de permitir a passagem do gás CO_2 (Figura 5a). Posteriormente, esta prateleira metálica com os CPs foi coloca dentro do reator (Figura 5b). O processo de ativação da EAEA por CO_2 supercrítico foi realizado a temperatura constante de 60°C, para então serem submetidos à pressão de 80 bar, nos tempos de processos citados anteriormente (2, 4 e 6 horas).

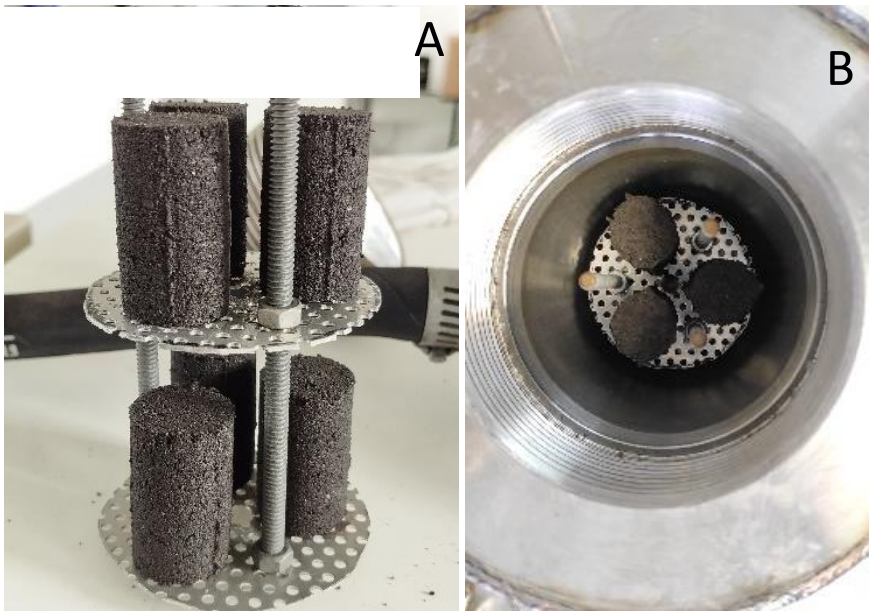


Figura 5 - a) - Prateleira – estrutura metálica para armazenamento dos CPs dentro do reator; b) Vista superior do reator, onde podem ser observados 3 CPs localizados sobre a prateleira metálica apresentada na figura (a), dentro do reator, antes do processo de ativação por CO_2 supercrítico

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O quadro 3 apresenta os resultados individuas de resistência à compressão axial, os valores médios e desvio padrão obtidos para as argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico por 2h, 4h e 6h. O resultado médio final apresentado no quadro já desconsidera os valores de espúrio das amostras.

Quadro 3 – Resultados individuas de resistência à compressão axial, valores médios e desvio padrão obtidos para as argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico por 2h, 4h e 6h.

Temp. e Pressão	Tempo (h)	Valores 6CPs	Médias	Desvio Padrão	Coef. Var	RESULTADO MÉDIO FINAL
60°C 80bar	2	6,26	7,50	0,88	11,7%	**7,54**
		6,87				
		7,18				
		7,93				
		8,16				
		8,59				
	4	7,64	10,32	1,74	16,8%	**10,35**
		9,32				
		10,65				
		10,66				
		10,76				
		12,86				
	6	9,49	11,17	1,18	10,5%	**11,24**
		10,27				
		10,82				
		11,75				
		12,11				
		12,56				

A Figura 6 demostra os resultados médios de resistencia à copressão axial, bem como o desvio padrão de cada amostra, para as argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico por 2h, 4h e 6h, conforme apresentado no quadro 3.

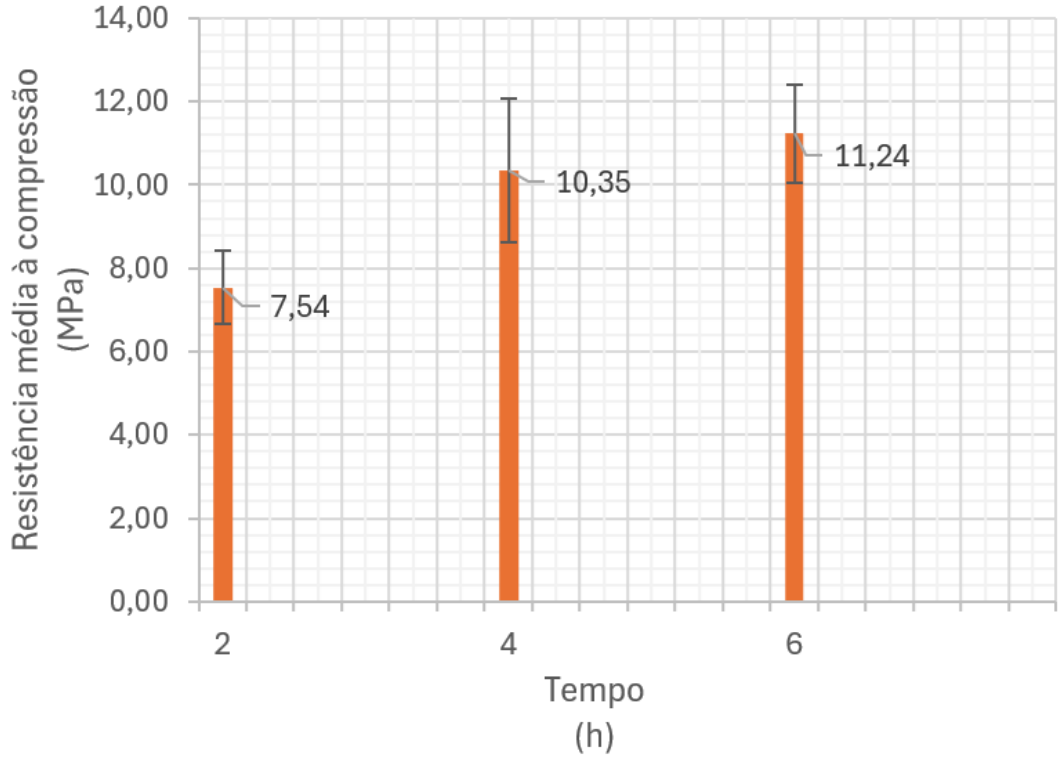


Figura 6 – Resistência à compressão axial e desvio padrão das amostras de argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico por 2h, 4h e 6h,

Observa-se na Figura 6 que o valor médio da resistência à compressão axial das argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico por 2h foi de 7,54 MPa. Estas amostra, sumetidas ao período de 4h, atingiram o valor médio de resistência à compressão de 10,35 MPa. Ou seja, um aumento de 37,26%. Quando são comparados os valores médios entre 4h (10,35 MPa) e 6h (11,24 MPa) o aumento de resistência neste período foi de apenas 8,59%. Observa-se que o intervalor do desvio padrão dos valores médios de resistência à compressão entre 4h e 6h estão próximos, o que indica que após 4h não houve aumento representativo da resistência, indicando, no presente estudo, que o processos de ativação acima de 4h não proporciou aumento representativo da resistência à compressão.

Na figura 7 estão apresentadas as micrografia obtidas com o auxílio do MEV da superfície de fratura das argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico.

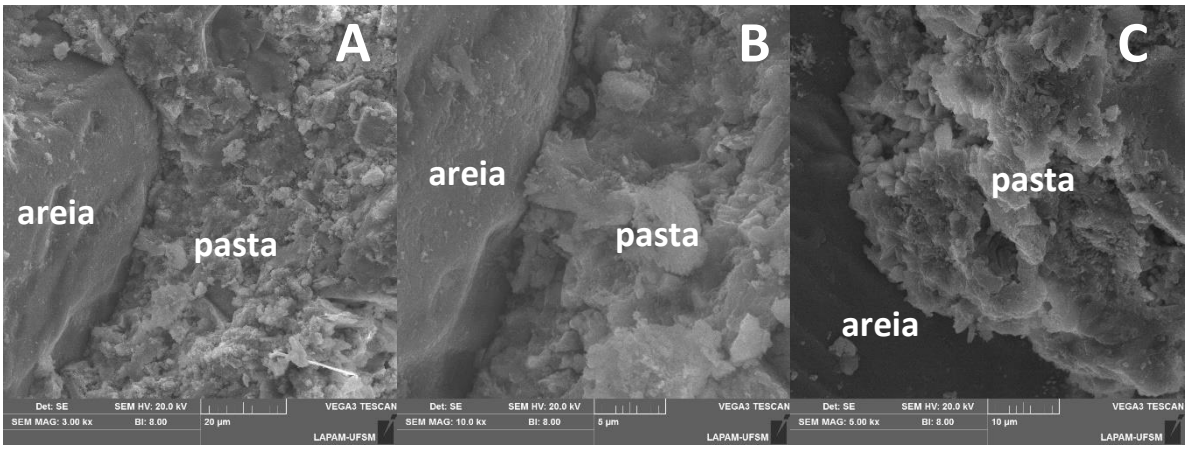


Figura 7 – Micrografia da superfície de fratura das argamassas à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico: a) zona de transição areia/pasta da amostra 80 bar/60°C/2h ampliação de 3.000x; b) zona de transição areia/pasta 80 bar/60°C/2h ampliação de 10.000x; c) zona de transição areia/pasta da 80 bar/60°C/6h ampliação de 5.000x

Ao realizar-se a comparação da morfologia das partículas da EAEA (Figura 2) com as micrografias na região da pasta à base de EAEA ativadas por CO_2 supercrítico, independente de 2h (Figuras 7a e 7b) e 6h (Figura 7c), observa-se que houve uma ação química do CO_2 nas partículas da EAEA que promoveram uma estrutura densificada, o que justifica a resistência à compressão entre 7 MPa e 11 MPa, respectivamente, conforme Quadro 3. Outra observação interessante nas micrografias da figura 7 é que não foram observadas formações cristalinas, a partir da reação do CaO presente EAEA e o CO_2.

4 CONCLUSÕES

O processo de ativação da EAEA por CO_2 supercrítico permitiu que as amostras de argamassa atingissem valores médios de resistência à compressão axial de 7,54 MPa (2h), 10,35 MPa (4h) e 11,24 MPa (6h), demonstrando estabilidade da resistência após 4h.

Este ganho de resistência foi observado a partir da morfologia densificada da superfície de fratura das amostras de argamassa à base de EAEA ativada por CO_2 supercrítico, visualizada nas micrografias obtidas com o auxílio do MEV. Não foram visualizadas nestas micrografias fases cristalinas nestas amostras.

Fazem-se necessários estudos avaliando a ativação da EAEA por CO_2 supercrítico em pressões, temperaturas e tempos distintos do presente trabalho para avaliar essas variáveis e suas interações nas propriedades físicas e microestruturais da matriz ativada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao Projeto Cimentos Especiais à base de Escória de Aciaria Elétrica a Arco (EAEA) Ativada por CO_2 Supercrítico (CNPq Processo n° 409556/2021-1).

Agradecimento também à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelas bolsas de mestrado; e ao PPGEC/UFSM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (Brasil).

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10007, 2004: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 16697, 2018. Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182, 2016. Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 7215, 2019. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, … C. Péan, Eds.). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Cormos, C. C. (2022). Decarbonization options for cement production process: A techno-economic and environmental evaluation. *Fuel*, *320*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123907

Costa, E. B. da., Nobre, T. R. Santos., Guerreiro, A. Quatrin., Mancio, Mauricio., & Kirchheim, A. Paula. (2013). Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. *Ambiente Construído*, *13*, 75–86.

Kassim, D., Lamaa, G., Silva, R. V., & de Brito, J. (2022). Performance Enhancement of Alkali-Activated Electric Arc Furnace Slag Mortars through an Accelerated CO2 Curing Process. *Applied Sciences*, *12*(3), 1662. https://doi.org/10.3390/app12031662

Kim, J., & Azimi, G. (2021). The CO2 sequestration by supercritical carbonation of electric arc furnace slag. *Journal of CO2 Utilization*, *52*, 101667. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101667

Mo, L., Zhang, F., & Deng, M. (2016). Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO2 curing. *Cement and Concrete Research*, *88*, 217–226. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013

Moon, E. J., & Choi, Y. C. (2019). Carbon dioxide fixation via accelerated carbonation of cement-based materials: Potential for construction materials applications. *Construction and Building Materials*, *199*, 676–687. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.078

NBR 16697. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland-Requisitos*. www.abnt.org.br

Park, J., & Kim, Y. (2014). Improvement in mechanical properties by supercritical carbonation of non-cement mortar using fly ash and blast furnace slag. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *15*(6), 1229–1234. https://doi.org/10.1007/s12541-014-0461-3

Quaghebeur, M., Nielsen, P., Horckmans, L., & Van Mechelen, D. (2015). Accelerated Carbonation of Steel Slag Compacts: Development of High-Strength Construction Materials. *Frontiers in Energy Research*, *3*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00052

SNIC, S. N. D. I. D. C. (2021). *Relatório anual*.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFEITO DO RESÍDUO DE CIMENTO-AMIANTO TRATADO TERMICAMENTE NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS, MECÂNICAS E AMBIENTAIS DE GEOPOLÍMEROS À BASE DE METACAULIM

Henrique. A. Santana[a]; Artur S. Ruviaro[b]; Fabiano F. Chotoli[c]; Daniel V. Ribeiro[d]; Marcelo S. Cilla[e]; Cleber M. R. Dias[f]

[a] (Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais/ Universidade Federal da Bahia, Brasil), almeidahen@gmail.com

[b] (Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil), arturspatruviaro@gmail.com

[c] (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil), fchotoli@ipt.br

[d] (Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais/ Universidade Federal da Bahia, Brasil), verasribeiro@hotmail.com

[e] (Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais/ Universidade Federal da Bahia, Brasil), marceloscilla@gmail.com

[f] (Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais/ Universidade Federal da Bahia, Brasil), clebermrd@gmail.com

RESUMO

O resíduo de cimento-amianto (RCA) é um material perigoso para a saúde humana, ainda encontrado em edificações antigas ou disposto em aterros ao ar livre por todo o planeta. Com o objetivo de contribuir com alternativas sustentáveis de destinação para este resíduo, é investigado neste estudo o efeito do RCA após inertização térmica (RCA_T) nas propriedades de geopolímeros à base de metacaulim, ativados por diferentes bases alcalinas (NaOH e KOH). O delineamento estatístico de mistura foi empregado para obter um conjunto de formulações, que foram submetidas à avaliação reológica (determinando a tensão de escoamento e a viscosidade aparente), resistência à compressão e emissões equivalentes de CO_2 (ECO_2-eq). A tensão de escoamento variou amplamente entre 3,51 e 93,26 Pa para as formulações ativadas por Na e entre 0,25 e 4,43 Pa para as formulações ativadas por K. A resistência à compressão foi significativamente afetada pelo conteúdo do ativador alcalino. As menores ECO_2-eq foram obtidas para as pastas com elevadas proporções de RCA_T. Por fim, com a incorporação do RCA_T, foi possível otimizar uma formulação com maximização da resistência à compressão e minimização de ECO_2-eq. De forma geral, este estudo evidencia o potencial do uso de RCA_T na produção de ligantes geopoliméricos, o que pode melhorar suas propriedades e reduzir o impacto ambiental negativo.

Palavras-chave: materiais perigosos, álcali-ativação, análise ambiental, reologia

1 INTRODUÇÃO

Não é novidade o potencial cancerígeno das fibras de amianto. Até o momento, o efeito carcinogênico deste material foi associado ao mesotelioma, câncer de pulmão, câncer de laringe e de ovário [1]. Sendo um problema ambiental e ocupacional, este foi um dos motivos que impulsionou a proibição da exploração deste material em mais de 75 países [2]. Uma das principais prioridades de pesquisa deste material consiste na busca de alternativas sustentáveis para a destinação de resíduos de cimento amanto dispostos em todo o planeta.

Baseado na logística reversa, pesquisas propuseram métodos de inertização e utilização do RCA na produção de ligantes cimentícios. Destaca-se a inertização por tratamento térmico [3], por ser um processo eficiente, seguro e economicamente competitivo com os aterros sanitários [4]. Resíduo de cimento-amianto depois de tratamento de inertização (RCA_T) foi utilizado na produção de clínquer [5,6], em concreto [7] e na produção de ligantes álcali-ativados [8].

Em um trabalho recente [9], a produção de compostos geopoliméricos binários, com a associação do RCA_T com o metacaulim, proporcionou matrizes de elevada resistência (em torno de 60 MPa) e isentas de eflorescências (álcalis livres não reagidos e lixiviados). Sistemas geopoliméricos baseados em precursores ricos em cálcio e em precursores aluminossilicatos podem formar simultaneamente as fases N-A-S-H e C-A-S-H, com matrizes menos porosas e mais resistentes. Entretanto, dominar as propriedades de um ligante geopolimérico com um precursor suplementar rico em cálcio, como o RCA_T, é um trabalho desafiador. A inserção do cálcio em um sistema geopolimérico pode provocar anomalias no comportamento reológico, como a redução do tempo de início de pega das misturas [10], inviabilizando sua consolidação como ligante cimentício.

Conforme constatado, a aplicação do RCA_T na produção de ligantes cimentícios é possível, desde que o comportamento deste material seja devidamente conhecido. Neste sentido, é proposta uma avaliação aprofundada sobre o comportamento de ligantes geopoliméricos à base de metacaulim, utilizando o RCA_T como precursor suplementar e avaliando a influência do ativador alcalino (Na ou K) nas propriedades da matriz.

2 METODOLOGIA

2.1. Materiais

Para a produção dos ligantes foram utilizados como precursores o Metacaulim HP ultra, fornecido pela Metacaulim do Brasil e o resíduo de cimento-amianto tratado (RCA_T). O RCA_T foi obtido por meio do tratamento térmico de telhas de cimento-amianto de 4 mm de espessura nominal, envelhecidas naturalmente por aproximadamente 25 anos na cobertura de prédio anexo da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (Brasil). Esta edificação está localizada na latitude 12°59’58,30”S e longitude 38°30’37,07”O, de acordo com o sistema de referência geodésico WGS 84.

O tratamento térmico foi realizado conforme os procedimentos descritos por Carneiro *et al.* [9], que estabeleceram como parâmetros ideais de calcinação das telhas de cimento-amianto tais como temperatura (800°C), tempo (1 h) e massa (5 kg), possibilitando a decomposição das fibras de amianto, maximizando-se o percentual de C_2S e minimizando as emissões de CO_2 durante o tratamento. Após o tratamento, o RCA_T foi peneirado em uma peneira de abertura de malha igual a 150 µm. Para a produção das soluções ativadoras foram utilizados: sílica ativa (SA) densificada fornecida pela *FERBASA* e hidróxido de sódio (NaOH) com 98% de pureza.

A Tabela 1 apresenta as massas específicas dos materiais particulados, determinadas por meio de picnometria a gás hélio (AccuPyc II 1340 Micromeritics); as áreas superficiais, determinadas pelo método BET (Gemini VII Micromeritics); as composições químicas dos componentes anidros, obtidas por meio da técnica de fluorescência de raios-X (espectrômetro S2 Ranger da Bruker). Os resultados mostram que o metacaulim é constituído majoritariamente de SiO_2 e Al_2O_3, enquanto o RCA_T é constituído majoritariamente de CaO e SiO_2. A sílica ativa (SA) apresenta alto teor de SiO_2 (81.75%), ideal para o uso na produção de silicatos alcalinos.

Tabela 1 – Caracterização física e química dos materiais

Materiais	Metacaulim	RCA_T	Sílica ativa (SA)
Propriedades físicas			
Massa especifica (g/cm^3)	2,80	2,95	2,32
Área superficial BET (m²/g)	30,52	6,68	15,15
Composição química (%)			
SiO_2	44,88	18,20	81,75
Al_2O_3	42,86	4,06	1,41
Fe_2O_3	4,82	2,35	4,90
K_2O	0,72	0,34	1,82
SO_3	0,13	1,66	0,51
MgO	0,67	7,27	1,34
MnO	0,11	-	0,13
CaO	-	48,69	0,29
Others	1,41	1,13	3,46
Perda ao fogo (1000 °C)	4,23	16,30	4,40

O silicato de sódio líquido (SSL) foi sintetizado com 52% de água deionizada, 27% SF e 21% de NaOH, em massa (razão molar SiO_2/Na_2O igual a 1,33). O silicato de potássio líquido (SKL) foi produzido com 49% de água deionizada, 27% SF e 24% de KOH, em massa (razão molar SiO_2/K_2O igual a 1,16). Os silicatos foram produzidos com distintas composições em razão do NaOH apresentar maior eficiência nas reações de decomposição do material precursor, fenômeno observado em testes laboratoriais preliminares. Os materiais foram misturados manualmente durante 2 minutos com auxílio de um bastão de vidro, e depois selado com filme plástico para evitar a perda de água.

2.2. Métodos

As formulações do projeto de mistura foram definidas por meio do *software Design-Expert®*, utilizando a ferramenta *i-Optimal Custom Designs* e o algoritmo *Best.* Foi necessário determinar os limites máximos e mínimos dos três componentes das pastas (metacaulim, RCA_T e solução ativadora). Os limites foram definidos com base nas razões molares ótimas (SiO_2/Al_2O_3, $(Na, K)_2O/Al_2O_3$, CaO/SiO_2), com base em testes de laboratório e na literatura. O RCA_T, fonte de CaO, foi incorporado no sistema geopolimérico, substituindo o metacaulim em até 40% (em massa).

A Tabela apresenta as formulações e os parâmetros de dosagem das 16 séries avaliadas, todas as produzidas com o SSL e com o SKL. Onze formulações foram estabelecidas para estimar os coeficientes dos termos do modelo. As demais são repetições do centróide e pontos selecionados estrategicamente para melhorar as estimativas dos coeficientes dos modelos e a significância da falta de ajuste. As pastas geopoliméricas foram produzidas em misturador planetário de 5 litros. O metacaulim e o RCA_T foram misturados por 30 segundos, com posterior inserção da solução ativadora durante 30 segundos e

mistura por mais 30 segundos. Em seguida, o misturador foi desligado por 30 segundos para raspar as laterais e a pá misturadora, sendo religado para mistura final por mais 30 segundos. Todo o processo foi realizado em baixa velocidade (62,5 ± 5 rpm).

Tabela 2 – Formulações e parâmetros de dosagem estabelecidos no projeto experimental.

Formulações	Fração mássica			Solução/ (RCA_T+MK)	SiO_2/ Al_2O_3	CaO/ SiO_2	SSL	SKL
	MK	RCA_T	Solução				Na_2O/Al_2O_3	K_2O/Al_2O_3
F1	0,436	0,040	0,525	1,10	3,16	0,06	0,79	0,64
F2	0,311	0,089	0,600	1,50	3,89	0,16	1,23	1,01
F3 e F12	0,251	0,200	0,549	1,22	4,28	0,38	1,33	1,08
F4, F10 e F11	0,350	0,100	0,550	1,22	3,57	0,17	1,00	0,82
F5	0,400	0,100	0,500	1,00	3,27	0,16	0,80	0,65
F6	0,200	0,200	0,600	1,50	5,03	0,39	1,79	1,46
F7 e F15	0,414	0,000	0,586	1,42	3,31	0,00	0,93	0,76
F8	0,500	0,000	0,500	1,00	2,93	0,00	0,66	0,54
F9 e F16	0,325	0,175	0,500	1,00	3,64	0,31	0,96	0,78
F13	0,360	0,040	0,600	1,50	3,59	0,07	1,08	0,88
F14	0,254	0,146	0,600	1,50	4,37	0,27	1,47	1,20

A análise reológica foi realizada para avaliar o efeito do RCA_T na reologia das formulações e, consequentemente, nas reações de álcali-ativação. Utilizou-se um reômetro Haake MARS III (Thermo Fisher Scientific) com geometria cilíndrica (diâmetro de 23,86 mm e altura de 34,5 mm). A análise foi realizada a 23˚C em aproximadamente 7,5 ml da mistura. De acordo com os testes preliminares de laboratório, o reômetro rotacional com geometria cilíndrica foi o mais adequado para analisar as formulações, que apresentaram elevada viscosidade em relação a pastas de cimento Portland. O modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1) foi usado para descrever o comportamento reológico e a viscosidade equivalente (Equação 2) foi calculada por meio da equação de Larrard.

$$\tau = \tau_0 + K.\dot{\gamma}^n \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$\mu_{eq} = \frac{3K}{n+2} \cdot (\dot{\gamma}_{max})^{n-1} \quad \text{(Eq. 2)}$$

Nestas euações, τ é a tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 é a tensão de escoamento dinâmica (Pa), η é a viscosidade plástica (Pa.s), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}), K e n são, respectivamente, a consistência e os parâmetros pseudoplásticos do modelo H-B, μ_{eq} é a viscosidade equivalente (Pa.s), e $\dot{\gamma}_{max}$ é a taxa de cisalhamento máxima aplicada.

Para a determinação da resistência à compressão das matrizes, foram moldados três corpos de prova cúbicos com 40 mm de aresta por formulação. A desmoldagem foi realizada após 24 horas e os corpos de prova foram curados em ambiente com temperatura de (25 ± 2)°C e umidade relativa do ar igual a (65 ± 5)%. As resistências à compressão axial (R_C) foram determinadas após 28 dias de cura. O teste foi realizado em uma prensa servo-hidráulica com capacidade de 1200 kN, aplicando nos corpos de prova uma taxa de carregamento igual a 500 N/s.

Para a análise ambiental quanto às emissões equivalentes de CO_2 ($ECO_{2\text{-eq}}$) das formulações, foram consideradas as emissões equivalentes de cada material constituinte das pastas álcali-ativadas. Os valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Emissões equivalentes dos componentes da pasta geopolimérica.

Material	Massa específica (g/cm^3)	Emissões equivalentes (kg de CO_2/kg de material)	Referências
MC	2,80	0,19600	[11]
RCA	2,95	0,16650	Calculado
Água	1,00	0,00043	[12]
Sílica ativa	2,32	0,06100	Calculado
NaOH	2,13	1,91500	[13]
KOH	2,04	2,24000	[14]

Por ser um subproduto da produção de ferro e aço, as emissões (ECO_2-eq) da sílica ativa foram desconsideradas, sendo incluídas apenas as ECO_2-eq relacionadas ao transporte. Para o cálculo das ECO_2-eq relacionadas ao RCA_T, foram considerados os processos envolvidos no beneficiamento, ou seja, calcinação, moagem e peneiramento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise reológica

Após a dissolução dos silicatos e aluminossilicatos pela mistura da solução ativadora com o material precursor, ocorre o desenvolvimento da microestrutura através da condensação das unidades monoméricas. Este processo de reação afeta a reologia das misturas e é influenciado pelas características dos componentes utilizados. Embora o comportamento reológico de misturas geopoliméricas à base de metacaulim já seja conhecido, a presença de um segundo precursor rico em cálcio no sistema pode modificar este comportamento. Nesse sentido, as Figuras 1a e 1b mostram o comportamento das curvas de fluxo (viscosidade e tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento) para as matrizes ativadas por álcalis produzidas com metacaulim, RCA_T e silicato de sódio líquido (SSL).

Pode-se observar que todas as formulações avaliadas apresentam o mesmo comportamento, com aumento da tensão de cisalhamento e diminuição da viscosidade equivalente com o aumento da taxa de cisalhamento. Vale ressaltar que as curvas das formulações F1, F5, F8 e F9, que apresentam os

maiores valores de viscosidade e tensão de cisalhamento, são as formulações com menor relação SSL/(RCA_T+MK). Em outras palavras, essas misturas necessitavam de maior torque para superar o atrito e girar o reômetro. Além disso, Lu *et al.* [15] indicam que a solução ativadora é o componente mais eficaz nas propriedades reológicas de ligantes álcali-ativados.

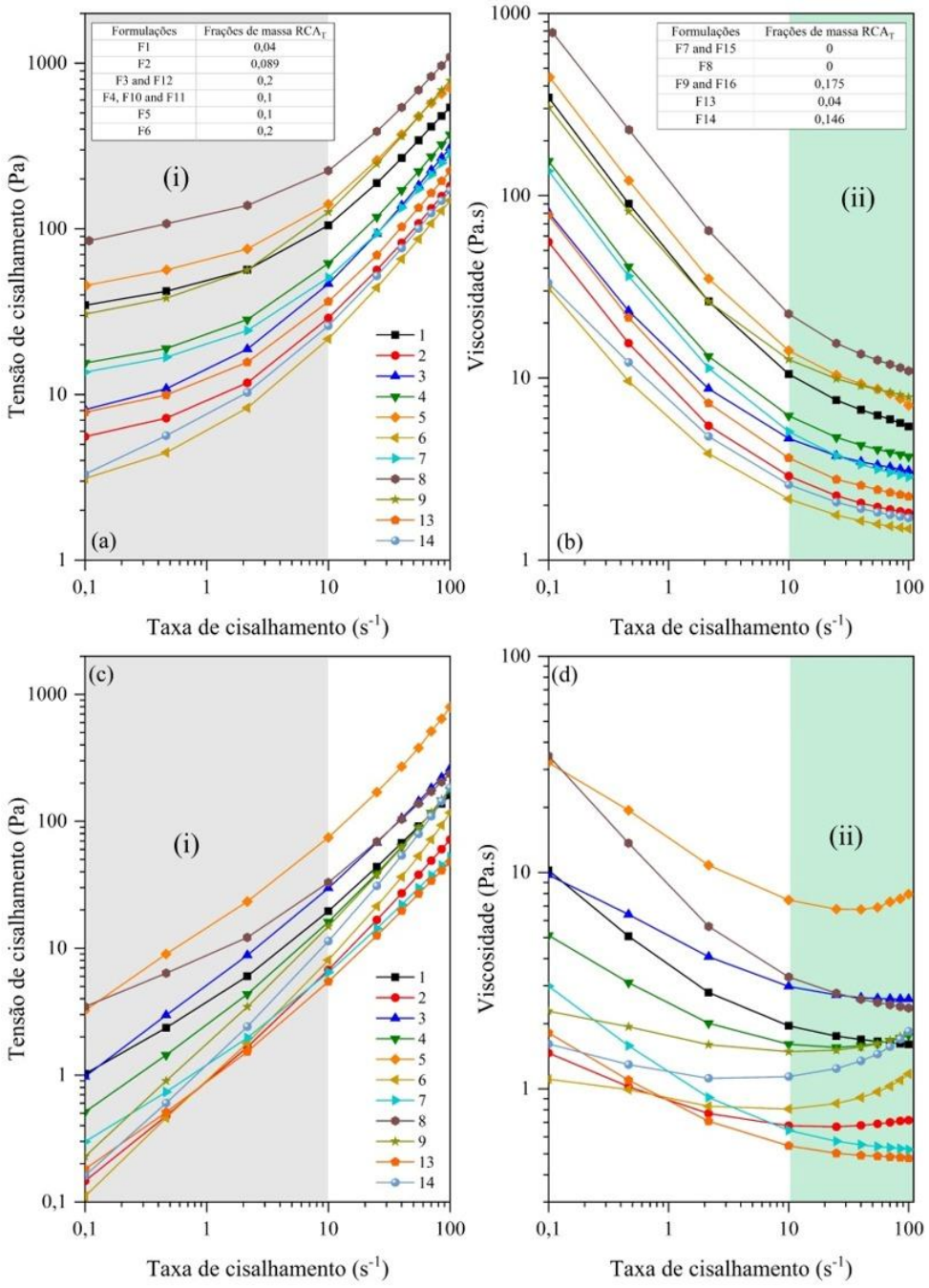


Figura 1 – Comportamento das curvas de fluxo para as matrizes ativadas por álcalis produzidas com metacaulim e RCA_T, ativadas por (a, b) silicato de sódio líquido (SSL) e (c, d) silicato de potássio líquido (SKL).

As Figuras 1c e 1d mostram o comportamento das curvas de fluxo (tensão de cisalhamento e viscosidade *versus* taxa de cisalhamento) para matrizes álcali-ativadas baseadas em silicato de potássio líquido (SKL). Pode-se observar que algumas formulações apresentam mudança no comportamento da curva, com aumento da viscosidade para altas taxas de cisalhamento (F3, F4, F5, F6, F9 e F14), indicando uma mudança no comportamento reológico causado pela rápida reação da ativação alcalina. Este comportamento não foi observado nas formulações ativadas por SSL.

As misturas que apresentaram curvas de fluxo anômalas são compostas por maior teor de RCA_T, que consiste em 30,63% de silicato de cálcio anidro e 27,12% de calcita [3]. O silicato de cálcio anidro pode ter promovido a formação de CSH e portlandita, impulsionada pela elevada alcalinidade da mistura. A calcita possui superfície irregular que favorece a nucleação e o crescimento do gel C-S-H em idades precoces, acelerando e amplificando a hidratação dos silicatos [16]. Para cimentos álcali-ativados à base de cinzas volantes (Classe C), Yip e Van Deventer [17] indicaram que o tempo de pega e as propriedades reológicas das misturas foram significativamente alteradas por compostos à base de cálcio devido a efeitos de nucleação heterogênea. Adicionalmente, esses autores destacaram que uma pequena quantidade de $CaCO_3$ reduziu o tempo de pega das misturas.

De forma geral, a rápida dissolução de Al_2O_3 e SiO_2 em ambientes de pH elevado promove reações rápidas de silicatos e aluminatos com o Ca^{2+}, produzindo C-A-S-H e C-S-H e reduzindo, assim, o tempo de início e fim de pega. As reações de Al_2O_3, SiO_2 e Ca^{2+} continuam até que todo o Ca^{2+} seja consumido. De fato, observou-se que as formulações com maiores proporções de RCA_T (F3, F6 e F9) endureceram completamente após o teste no reômetro, cerca de 8 minutos após a mistura dos componentes. Não foram encontrados estudos na literatura que correlacionem o *flash set* com o tipo de ativador (Na ou K). Uma hipótese para justificar a ocorrência de *flash set* apenas nas misturas produzidas com SKL pode ser a maior facilidade na dissolução do Ca^{2+} do RCA_T promovida pela solução ativadora à base de potássio. Conforme observado durante a produção, o SKL possui viscosidade mais baixa que o SSL, acelerando o contato das partículas precursoras com os íons K^+ e as reações de ativação alcalina.

3.2. Análise mecânica

A Figura 2 mostra o comportamento da resistência à compressão das pastas produzidas com SSL e SKL. Pode-se observar que o tipo de ativador parece não influenciar na resistência à compressão, visto que ambas as pastas apresentam o mesmo comportamento para esta propriedade. Os resultados mostram que, independentemente do tipo de ativador, ocorre aumento da resistência à compressão com aumento da fração mássica do metacaulim e diminuição da fração mássica da solução ativadora. A relação Solução/(RCA_T+MK) apresentou influência na resistência à compressão análoga à relação água/cimento em pastas à base de cimento Portland, através de mecanismos distintos.

Além de F8, as formulações F1, F5, F9 e F16, com baixas relações Solução/(RCA_T+MK), apresentaram as maiores resistências mecânicas. Este comportamento está de acordo com modelos consolidados de reação de geopolímeros [18], indicando que após a dissolução dos aluminossilicatos, a água não combinada é liberada da mistura, formando poros na matriz que podem comprometer o desempenho mecânico. De acordo com a análise estatística, constatou-se que as frações mássicas de metacaulim e solução ativadora têm efeito significativo na resistência à compressão ($\alpha = 0,05$). Por outro lado, o RCA_T não teve efeito significativo ($\alpha = 0,05$) na resistência à compressão das misturas.

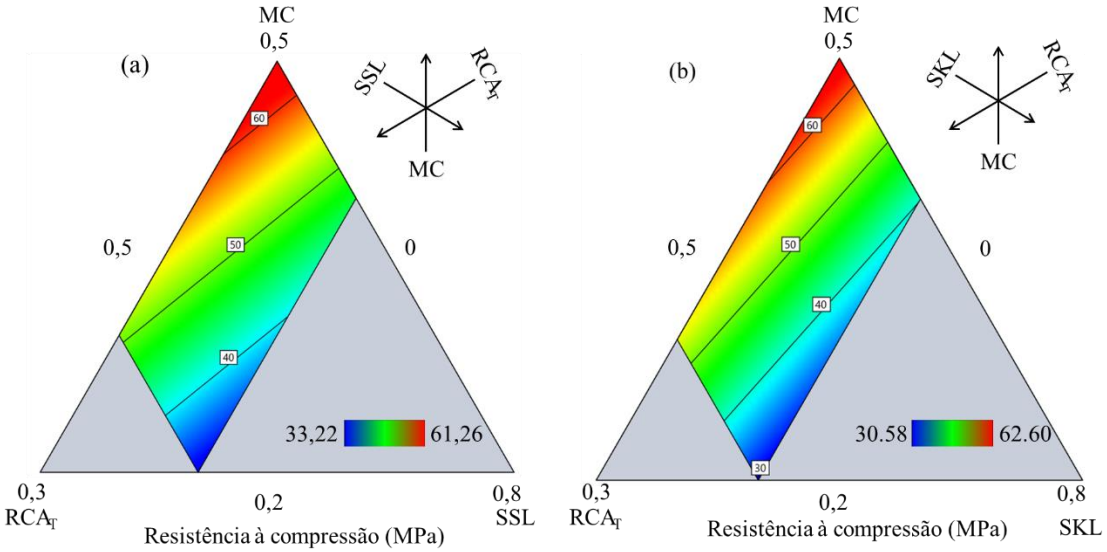


Figura 2 – Resistência à compressão das pastas geopoliméricas produzidas com (a) SSL e (b) SKL.

Embora se espere que parte do CaO contido no RCA_T promova a formação de novos produtos, como C-A-S-H e C-S-H, contribuindo para a resistência à compressão, a substituição do metacaulim (mais reativo) por RCA_T pode ter reduzido a formação de N-A-S-H, compensando a formação de novos produtos. Além disso, a adição de material rico em calcita (mais de 20% em massa) em uma mistura ativada por álcalis pode causar descontinuidade estrutural e retração da matriz [17]. Para as formulações produzidas com SKL que apresentaram menores resistências à compressão (F2, F6, F13 e F14) observou-se que as amostras fissuraram quando imersas em água, levando à deterioração completa. Uma hipótese plausível é que o silicato de potássio possa estar modificando os diâmetros dos poros das matrizes e que a resistência à tração destas formulações possa ser inferior à tensão capilar no momento inicial da imersão.

3.3. Análise ambiental

As Figuras 3a e 3b apresentam os resultados das emissões equivalentes de CO_2 pelas pastas ativadas por SSL e SKL, respectivamente. Devido à sua elevada carga ambiental, os ativadores são responsáveis pelas maiores emissões de CO_2-eq, variando de 59% a 69% para as ativadas por NaOH e de 65% a 74% para as ativadas por KOH.

Os valores apresentados são elevados por se basearem em pastas geopoliméricas. Quando for considerada a produção de concreto, os valores serão menores, considerando que aproximadamente 70% do volume do concreto é composto por agregados [19]. Os agregados possuem baixo CO_2-eq relacionado ao processo de extração e processamento, reduzindo o CO_2-eq total dos compósitos produzidos. As emissões associadas à água foram insignificantes (0,01 a 0,02%). Por outro lado, a sílica ativa (as) contribuiu com 2% a 3% do CO_2-eq total, devido à sua classificação como um resíduo industrial que requer processamento mínimo para ser utilizado.

Ao considerar os materiais precursores (MK e RCA_T), o percentual de CO_2-eq relacionado ao MK variou de 15% a 38% para pastas ativadas por SSL e entre 12% a 33% para pastas ativadas por SKL. Para o RCA_T, os valores variaram de 0 a 14% e 0 a 11% para pastas ativadas por SSL e SKL, respectivamente.

Notavelmente, como esses materiais estão presentes em maiores quantidades no ligante geopolimérico, os valores de CO_2-eq são menores quando comparados aos dos ativadores.

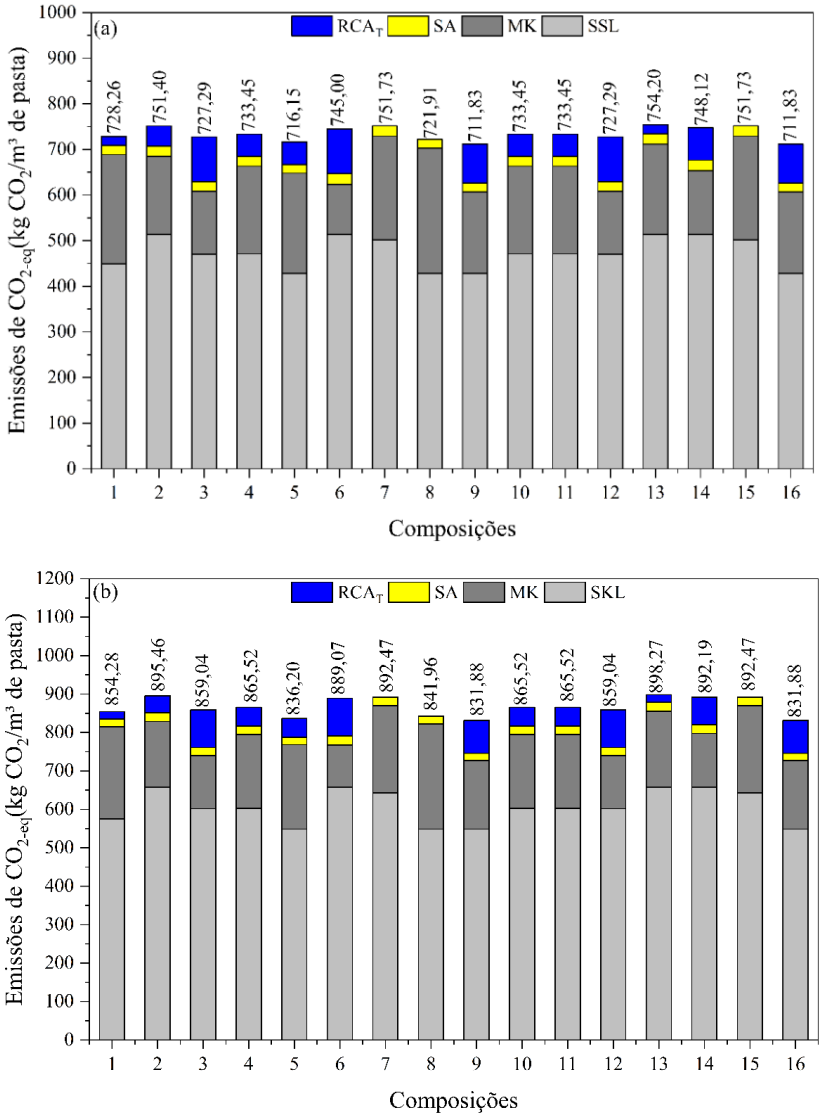


Figura 3 – Emissões de CO_2-eq para as pastas geopoliméricas produzidas com (a) SSL e (b) SKL.

Na Figura 4 é apresentada uma comparação do CO_2-eq considerando as misturas feitas apenas com MK (sem RCA_T). Observam-se reduções modestas, não excedendo 5% do CO_2 equivalente ao total relacionado aos precursores. Apesar de o CO_2-eq do RCA_T ser aproximadamente 15% inferior ao do MK, as reduções do CO_2-eq global acabam não sendo significativas, devido ao baixo percentual de substituição. Porém, a incorporação do RCA_T é de extrema importância, pois proporciona o descarte adequado e seguro de materiais oriundos de resíduos perigosos.

Por fim, no que diz respeito à análise ambiental relacionada às emissões de CO_2, embora as reduções tenham sido pequenas com a substituição parcial do MK pelo RCA_T, a valorização e imobilização de resíduos contendo amianto são de grande interesse ambiental e social, considerando-se que as fibras de amianto são responsáveis por inúmeras doenças graves e contaminação do solo e da água.

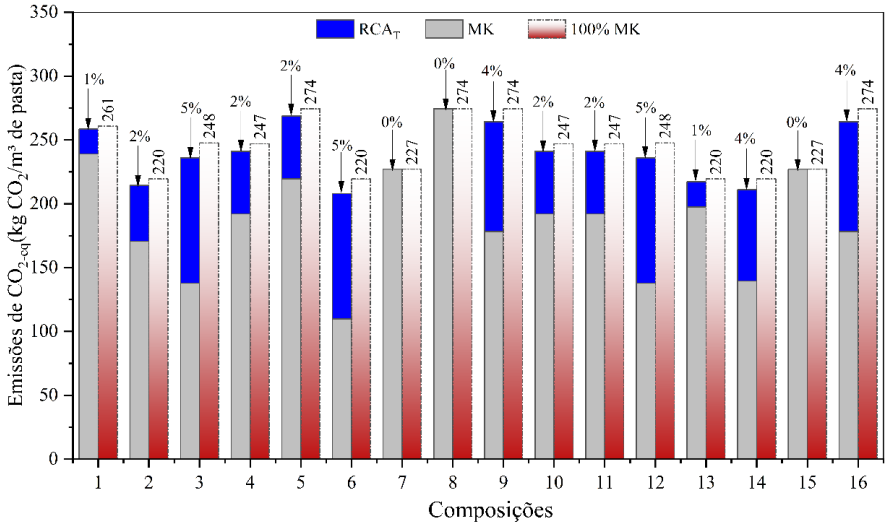


Figura 4 – Redução das emissões de CO_2-eq promovido pela substituição do metacaulim por RCA_T.

3.4. Otimização simultânea e validação dos modelos

Para determinar uma formulação que contemple simultaneamente todas as características desejadas para as pastas geopoliméricas, utilizou-se o software Design-Expert® com base na função de desejabilidade desenvolvida por Derringer e Suich [20]. O objetivo foi determinar para cada ativador utilizado (SSL e SKL) uma formulação que apresentasse simultaneamente máxima proporção do RCA_T, máxima resistência à compressão e mínimas emissões de CO_2-eq.

De acordo com a simulação realizada no software Design-Expert®, a formulação otimizada para as pastas à base de silicato de sódio (SSL) apresenta fração mássica de MK igual a 0,363, RCA_T igual a 0,137 e SSL igual a 0,500. Para a pasta a base de silicato de potássio (SKL), a formulação ótima apresenta fração mássica de MK igual a 0,300, RCA_T igual a 0,200 e SKL igual a 0,500. Os valores previstos para cada formulação, os limites de confiança, os valores experimentais observados e o desvio entre o valor observado e o valor previsto pelos modelos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores previstos e observados experimentalmente para as formulações otimizadas produzidas com SSL e SKL.

Ativador alcalino	Propriedade	Previsto pelo modelo	Limite inferior (α=0.05)	Limite superior (α=0.05)	Resultado experimental
SSL	CO_2-eq	712,97	712,96	712,98	712,97
	R_C (MPa)	54,03	50,68	57,38	51,12
SKL	CO_2-eq	830,44	830,43	830,44	830,44
	R_C (MPa)	54,14	50,43	57,85	56,44

Nota-se que os modelos estabelecidos foram eficientes em prever as propriedades, possibilitando determinar formulações de pastas geopoliméricas com incorporação de um resíduo perigoso, apresentando elevada resistência à compressão com otimização das emissões de CO_2-eq.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, avaliou-se o impacto do RCA_T e de ativadores alcalinos (Na ou K) nas propriedades das matrizes geopoliméricas tanto no estado fresco quanto endurecido, além de quantificar as emissões de gases poluentes associados.

De acordo com as análises reológicas, notou-se que para os dois ativadores alcalinos utilizados, o aumento da solução ativadora promove a redução da viscosidade e da tensão de escoamento, por meio da redução dos atritos entre as partículas que ainda não foram diluídas. Apenas para as formulações ativadas com silicato de potássio e com maior proporção de RCA_T (fonte de cálcio), ocorreu rápido aumento da viscosidade para altas taxas de cisalhamento com redução do tempo de início de pega. Este comportamento pode ser associado com a maior facilidade do silicato de potássio em decompor os íons Ca^{2+} da calcita com formação de C–A–S–H e da hidratação do silicato de cálcio anidro, formando C–S–H.

Assim como a relação água/cimento em matrizes de cimento Portland, a proporção da solução ativadora governou a resistência à compressão das matrizes com os dois ativadores utilizados. O excesso de líquido liberado durante a geopolimerização pode aumentar a porosidade e o desempenho mecânico da matriz.

A análise ambiental evidenciou que misturas produzidas à base de potássio contêm maior pegada de CO_2. Além disso, a inserção de RCA_T reduz o CO_2-eq associado às formulações, além de possibilitar a inertização e destinação adequada de um resíduo perigoso.

REFERÊNCIAS

[1] Godono, A., Clari, M., Franco, N., Ciocan, C., Mansour, I., Zunarelli, C., ... & Boffetta, P. (2022). The association between occupational asbestos exposure with the risk of incidence and mortality from prostate cancer: A systematic review and meta-analysis. *Prostate Cancer and Prostatic Diseases*, *25*(4), 604-614.

[2] Stayner, L., Welch, L. S., & Lemen, R. (2013). The worldwide pandemic of asbestos-related diseases. *Annual review of public health*, *34*(1), 205-216.

[3] Carneiro, G. O., Santos, T. A., Simonelli, G., Ribeiro, D. V., Cilla, M. S., & Dias, C. M. (2021). Thermal treatment optimization of asbestos cement waste (ACW) potentializing its use as alternative binder. *Journal of Cleaner Production*, *320*, 128801.

[4] Tomassetti, L., Di Giuseppe, D., Zoboli, A., Paolini, V., Torre, M., Paris, E., ... & Gualtieri, A. F. (2020). Emission of fibres and atmospheric pollutants from the thermal treatment of asbestos containing waste (ACW). *Journal of Cleaner Production*, *268*, 122179.

[5] Yvon, Y., & Sharrock, P. (2011). Characterization of thermochemical inactivation of asbestos containing wastes and recycling the mineral residues in cement products. *Waste and Biomass Valorization*, *2*, 169-181.

[6] Santos, T. A., & Cilla, M. S. (2022). Use of asbestos cement tile waste (ACW) as mineralizer in the production of Portland cement with low CO2 emission and lower energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, *335*, 130061.

[7] Gualtieri, A. F., & Boccaletti, M. (2011). Recycling of the product of thermal inertization of cement–asbestos for the production of concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(8), 3561-3569.

[8] Carneiro, G. O., Santana, H. A., Ribeiro, D. V., Cilla, M. S., & Dias, C. M. (2022). One-part alkali-activated binder produced from inertized asbestos cement waste. *Journal of Cleaner Production*, *367*, 132966.

[9] Santana, H. A., Júnior, N. S. A., Carneiro, G. O., Ribeiro, D. V., Cilla, M. S., & Dias, C. M. (2023). Asbestos-cement wastes as supplementary precursors of NaOH-activated binders. *Construction and Building Materials*, *364*, 129921.

[10] Park, S., Moges, K. A., Wu, S., & Pyo, S. (2022). Characteristics of hybrid alkaline cement composites with high cement content: flash set and high compressive strength. *journal of materials research and technology*, *17*, 1582-1597.

[11] Long, W. J., Wu, Z., Khayat, K. H., Wei, J., Dong, B., Xing, F., & Zhang, J. (2022). Design, dynamic performance and ecological efficiency of fiber-reinforced mortars with different binder systems: Ordinary Portland cement, limestone calcined clay cement and alkali-activated slag. *Journal of Cleaner Production*, *337*, 130478.

[12] Stengel, T., & Schießl, P. (2014). Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures. In *Eco-efficient construction and building materials* (pp. 528-564). Woodhead Publishing.

[13] Hong, J., Chen, W., Wang, Y., Xu, C., & Xu, X. (2014). Life cycle assessment of caustic soda production: a case study in China. *Journal of cleaner production*, *66*, 113-120.

[14] Villaquirán-Caicedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2018). Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. *Materials Letters*, *230*, 300-304.

[15] Lu, C., Zhang, Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., & Yuan, Q. (2021). Rheology of alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Composites*, *121*, 104061.

[16] Bentz, D. P., Ardani, A., Barrett, T., Jones, S. Z., Lootens, D., Peltz, M. A., ... & Weiss, W. J. (2015). Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials*, *75*, 1-10.

[17] Yip, C. K., & Van Deventer, J. S. J. (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, *38*, 3851-3860.

[18] Glukhovsky, V. D. (1994, October). Ancient, modern and future concretes. In *Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concretes* (Vol. 1, pp. 1-8). Kiev, Ukraine.

[19] Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials.

[20] Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology*, *12*(4), 214-219.

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE IMPRESSÃO DE MISTURAS 3DCP COM BAIXO TEOR DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE FÍLER CALCÁRIO REFORÇADAS POR FIBRAS

Elias de O. Mendes[a]; Emile M. dos Santos[a]; Leonel M. da Silva Filho[a]; Fernanda K. de Medeiros[b]; Leonardo de S. Dias[b]; Marcos A. S. dos Anjos[a,b]

[a]Instituto Federal da Paraíba, Av. Primeiro de Maio-720, 58015-435, João Pessoa, Brasil, e-mail: mendes.elias@academico.ifpb.edu.br.

[b]Universidade Federal da Paraíba – PPCEM, Campus I Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil, e-mail: marcos.anjos@ifpb.edu.br.

RESUMO

A impressão 3D em misturas cimentícias (3DCP) tem se destacado pela inovação na construção civil. No entanto, a tecnologia ainda precisa superar questões ambientais e de desempenho, como a utilização de alto consumo de cimento Portland e baixa adesão entre camadas. O uso de fibras tem se mostrado uma alternativa interessante para melhorar a tenacidade do material e a resistência à fissuração do 3DCP, mas pode alterar significativamente aspectos importantes da mistura para impressão. Diante dessa perspectiva, foi realizado um estudo comparativo sobre os efeitos da incorporação de fibras de polipropileno nas propriedades das misturas em seu estado fresco e endurecido. Foram avaliados aspectos como fluidez, viscosidade, estabilidade de empilhamento, deformação no estado fresco bem como a aderência entre camadas. Para tal, foram produzidas e impressas misturas utilizando baixos teores de cimento, através de substituições parciais do cimento por 40% e 50% de fíler calcário com incorporação de fibras de polipropileno na proporção de 0,5% e 1% em volume. No estado fresco, foram realizados ensaios de viscosidade, espalhamento, consistência, capacidade de empilhamento e deformação com carga pelo transdutor de deslocamento variável linear (LVDT). Já no estado endurecido, foram avaliados os índices físicos, resistência à compressão e à flexão e a aderência entre camadas, a fim de analisar a influência da adição das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os resultados mostraram que a presença do fíler calcário aumenta a mobilidade e deformação da mistura, enquanto a adição de fibras aumenta a viscosidade, devido a maior estabilidade e formação de aglomerados, o que pode dificultar a impressão das camadas. Entretanto, se dosadas em proporções corretas, as fibras podem resultar em melhoria nas propriedades físicas das impressões principalmente a estruturação dos filamentos. Assim, conclui-se que, em dosagens adequadas, a utilização de fibras em misturas cimentícias com baixo teor de cimento pode beneficiar as propriedades construtivas das misturas cimentícias.

Palavras-chave: Impressão 3D em argamassas, filer calcário, capacidade de impressão, aderência intercamadas 3D.

1 INTRODUÇÃO

O mundo moderno encontra-se imerso em um contexto de constante avanço tecnológico industrial no qual métodos de produção e processos são continuamente aprimorados. Nesse contexto, a indústria da construção civil desempenha um papel significativo, pesquisas neste campo buscam aprimorar e otimizar os processos envolvidos, desde a extração das matérias-primas até a etapa construtiva. Um dos desafios prementes é a conciliação desse progresso tecnológico com a sustentabilidade ambiental. É crucial considerar que a construção civil figura entre as indústrias mais poluentes e emissoras de gases do efeito estufa, emitindo cerca de 10 gigatoneladas de CO_2 no planeta no ano de 2022 conforme reportado pela Organização das Nações Unidas (2022). Dentro dessa perspetiva, é fundamental que este setor adote práticas e tecnologias que promovam a sustentabilidade ambiental, sem comprometer a eficiência e a viabilidade econômica das atividades.

Dentre as soluções promissoras para esse setor, destaca-se a impressão 3D de concreto (3DCP), fundamentada em técnicas de manufatura aditiva. Atualmente, essa tecnologia está ganhando espaço na indústria da construção civil e tem sido objeto de intensas investigações científicas e práticas (Abreu *et al.* 2019). A impressão 3D de concreto apresenta-se como uma alternativa viável e eficiente para a construção de estruturas complexas com geometrias específicas, oferecendo benefícios como redução do desperdício de materiais, diminuição do tempo de construção e maior flexibilidade de projeto. No entanto, apesar dos diversos benefícios proporcionados, a impressão 3DCP enfrenta ainda desafios significativos, especialmente no que diz respeito à dosagem de misturas que atendam aos requisitos de impressão (Dias 2022).

As propriedades das misturas, tais como viscosidade e estabilidade de impressão, desempenham um papel crucial na dosagem de misturas imprimíveis (Dias 2022). Para atender a essas propriedades, as misturas frequentemente são formuladas com elevados teores de cimento Portland (CP), adição de aditivos plastificantes e baixas relações água/cimento (Barbosa 2022). No entanto, o processo de produção de cimento consome uma quantidade significativa de energia, resultando na emissão de aproximadamente uma tonelada de CO_2 para cada tonelada de cimento produzida (Farias *et al.* 2023). Diante desse cenário, a redução do consumo de cimento nas misturas é essencial para mitigar os impactos ambientais negativos.

Uma estratégia promissora para reduzir o impacto ambiental na construção civil é substituir parte do cimento Portland por adições minerais, como o filer calcário. Esse material, composto principalmente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), é muitas vezes derivado como resíduo de processos industriais, como a extração de calcário para a produção de cimento (Dias 2022). O filer calcário pode ser integrado de forma eficaz nas misturas de concreto e argamassas, proporcionando benefícios significativos os quais envolvem a redução das emissões de CO_2, ao diminuir a quantidade de cimento necessária, e melhora na trabalhabilidade e a estabilidade da mistura (Barbosa 2022). Pesquisas recentes, como as conduzidas por Biricik e Mardani (2022), apontam que teores mais elevados de filer calcário estão associados a uma melhoria nos índices de fluidez. Além disso, estudos como os realizados por Barbosa (2022) sugerem que essa adição pode contribuir significativamente para a fluidificação das misturas.

Além do alto consumo de cimento, outro desafio do processo de impressão de concretos e argamassas 3DCP diz respeito à estabilidade do objeto impresso, uma vez que ao serem impressos em camadas os filamentos extrudados são continuamente carregados, devendo estes se autossustentarem para evitar significativas deformações ou até mesmo o colapso (Dias 2022). Uma estratégia promissora para enfrentar esse desafio é a incorporação de fibras, como as de polipropileno, as quais podem melhorar a coesão da mistura, resultando em uma construção mais eficiente e estável das camadas. De acordo com Nunes (2022), a adição de fibras tem um impacto positivo na capacidade de construção, uma vez que aumentam a tensão de escoamento do 3DCP. No entanto, é crucial determinar experimentalmente a dosagem máxima de fibra que pode ser adicionada sem comprometer a sua trabalhabilidade e a extrudabilidade do material no sistema de impressão.

Entende-se, portanto, que a metodologia 3DCP requer a formulação de misturas com proporções substanciais do ligante, juntamente com adições e aditivos para atender aos padrões de impressão. Assim, é crucial investigar maneiras inovadoras, eficazes e conscientes para reduzir o consumo excessivo de cimento, ao mesmo tempo em que se busca melhorar as propriedades das impressões. Nesse contexto, considerando a capacidade de substituição do filer calcário e a inclusão de fibras de polipropileno nas misturas 3DCP, este estudo tem como propósito principal o desenvolvimento de composições para impressão 3D e a avaliação de sua aptidão para impressão utilizando diferentes proporções desses materiais mencionados. Dessa forma, busca-se contribuir para a formulação de misturas que não só atendam aos requisitos de impressão, mas também minimizem o uso excessivo de cimento comumente

empregado nesta técnica de construção inovadora, além de conferir capacidade de construção às misturas por meio da incorporação das fibras de polipropileno.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a dosagem das misturas de 3DCP, foram empregados cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V), filer calcário (FC), areia de quartzo, aditivo superplastificante (SPP), aditivo modificador de viscosidade (HPMC), fibras de polipropileno com 12mm de comprimento e 35 microns de diâmentro, e água fornecida pela concessionária local. Cada componente foi avaliado de acordo com normas específicas, sendo conduzidos ensaios para caracterização dos materiais, conforme informado no Quadro 1. A curva com a distribuição granulométrica da areia utilizada no estudo é apresentada na Figura 1.

Quadro 1 - Caracterização dos materiais

PROPRIEDADE	MATERIAL	NORMA/DADOS	VALOR
Massa especifica (g/cm³)	CP-V	NBR 16605 (ABNT 2022)	3,04
	Fíler Calcário		2,72
	Areia de quartzo	NBR 16916 (ABNT 2021)	2,63
	Polipropileno	Dado do fabricante	0,91
Determinação do teor de materiais pulverulentos (%)	Areia de quartzo	NBR 16973 (ABNT 2021)	2,27
Diâmetro médio da partícula (µm)	CP-V	Dado do fabricante	9,95
	Fíler Calcário		16,64
Composição granulométrica	Areia de quartzo	NBR 17054 (ABNT 2022)	Gráfico abaixo

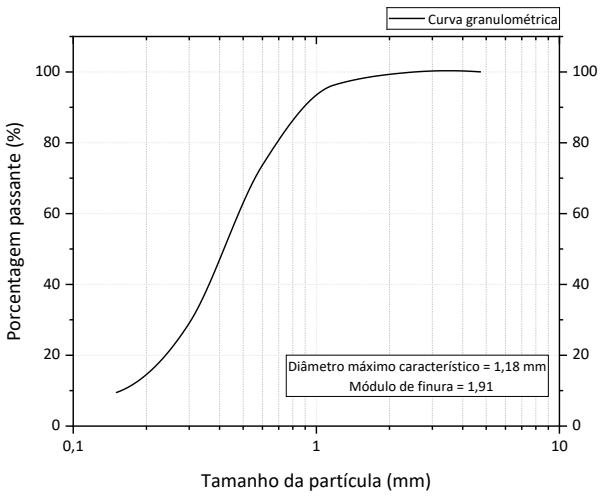


Figura 1 – Curva granulométrica da areia.

2.2 DOSAGEM DAS MISTURAS

A dosagem das misturas baseou-se na literatura, levando em consideração principalmente a viscosidade aparente da mistura, determinada a partir do espalhamento na mesa de consistência. Buscava-se dosar misturas com o intervalo de espalhamento entre 18 e 22 cm, devido à sua relevância para a extrusão do material no sistema de impressão utilizado (Dias 2022; Nunes 2022). As misturas que se enquadraram nesse intervalo foram consideradas imprimíveis ou com alta probabilidade de serem imprimíveis, no entanto, aquelas com resultados de espalhamento fora desse intervalo foram consideradas não imprimíveis e posteriormente realizados ajustes na quantidade de plastificante numa tentativa de inseri-las no intervalo indicado.

Baseando-se em estudos anteriores (Nunes 2022), adotou-se uma dosagem padrão para a mistura de referência, com uma proporção em massa de 1:2:0,36 (cimento: areia: água/cimento). Para as formulações de referência com fíler calcário, FC 40 e FC 50, substituiu-se 40% e 50% da massa de cimento do traço de referência, respectivamente, pelo filler calcário. Para cada composição das misturas FC 40 e FC 50, incorporou-se 0,5% e 1,0% de fibra de polipropileno no volume total da mistura.

Para as misturas atenderem os requisitos de impressão, foi necessário a utilização de aditivos superplastificante e modificador de viscosidade. As proporções de HPMC e SPP testadas inicialmente foram de, respectivamente, 0,79% e 0,15% da massa de finos (Nunes 2022). A proporção de HMPC foi adequada para as composições avaliadas, porém para o SPP foi necessário ajuste para 0,60%, de modo a obter consistência adequada ao processo de extrusão. Devido à alta viscosidade observada nas misturas com incorporação de 1,0 % de fibra de polipropileno, a proporção de SPP foi aumentada para 0,90%.

As proporções das misturas avaliadas são apresentadas na Quadro 2.

Quadro 2 – Composições das misturas avaliadas

Misturas	CP-V (kg/m³)	FC (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	a/c (kg/kg)	SPP (%)	HPMC (%)	Fibra Pol (kg/m³)	Vp (l/m³)
REF	689,90	0,00	1379,00	248,40	0,36	0,60	0,15	0,00	475,33
FC 40	409,60	273,10	1365,30	245,80	0,60	0,60	0,15	0,00	480,86
FC 40_0,5	407,60	271,70	1358,50	244,50	0,60	0,60	0,15	4,55	478,45
FC 40_1,0*	405,50	270,30	1351,70	243,30	0,60	0,90	0,15	9,10	476,05
FC 50	340,40	340,40	1361,80	245,10	0,72	0,60	0,15	0,00	482,22
FC 50_0,5	338,70	338,70	1355,00	243,90	0,72	0,60	0,15	4,55	479,81
FC 50_1,0*	337,00	337,00	1348,10	242,70	0,72	0,90	0,15	9,10	477,40
*Misturas inicialmente dosadas com a proporção de SPP em 0,60 %, sendo necessário o ajuste do SPP para 0,90%; a/c = água/cimento; Vp= volume de pasta.									

2.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS IMPRESSAS

As misturas foram produzidas utilizando um misturador do tipo betoneira, com capacidade para 150 litros, e a rotina de mistura está detalhada na Figura 2.

Figura 2 - Esquematização do processo de mistura

Após procedimento de mistura, as argamassas foram extrudadas em impressora cartesiana do tipo pórtico, através de um bico circular de 2 cm de diâmetro. A velocidade de rotação da hélice de extrusão para cada mistura foi determinada de modo a dar condições de impressão e manter constante a taxa de extrusão. Para as composições sem fibras, a velocidade de rotação utilizada foi de 22 rpm, enquanto para as misturas que incorporavam fibras de polipropileno, foi necessário aumentar a velocidade de rotação para 68 rpm.

Foram produzidas peças com 5 camadas de modo a possibilitar a extração de amostras de dimensões 40 x 40 x 160 mm e 40 x 40 x 50 mm, conforme detalhado na Figura 3. Os filamentos foram impressos a uma velocidade de 2000 mm/min e com uma altura de deposição de 11±1 mm.

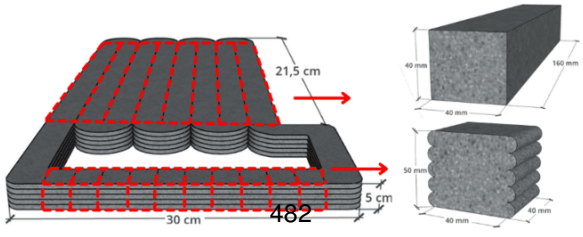


Figura 3 – Formato das peças impressas e posição das amostras extraídas

Foi produzida uma peça indicada na Figura 3 para cada composição, seguindo um processo de cura por imersão. Os cortes para obtenção das amostras foram executados no estado endurecido com o auxílio de uma máquina equipada com disco de corte diamantado. Suas dimensões foram controladas com um paquímetro digital de resolução 0,01 mm e foram então ensaiadas após 28 dias de cura.

2.4 AVALIAÇÕES NO ESTADO FRESCO

2.4.1 Espalhamento e abatimento

Os espalhamentos e abatimentos das misturas foram determinados utilizando o ensaio de abatimento do tronco de cone na mesa de consistência, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 13276 (ABNT 2016).

2.4.2 Viscosidade

As viscosidades das composições foram avaliadas utilizando o viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I (IKA®), com uma faixa de rotação por minuto (rpm) de 10 a 150, com intervalos de medição de 10 rpm, exceto nos pontos de 22 e 68 rpm, que foram avaliados por coincidirem com as velocidades de rotação da hélice de extrusão no momento das impressões. As viscosidades foram determinadas tanto no sentido de 10 para 150 rpm quanto de 150 para 10 rpm, mantendo o torque entre 5% e 95%.

2.4.3 Massa específica, teor de ar incorporado e retenção de água

A determinação da massa específica e do teor de ar incorporado no estado fresco foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 13278 (ABNT 2005). Foi possível analisar a capacidade de reter água das misturas utilizando a aparelhagem e realizando as análises conforme a NBR 13277 (ABNT 2005).

2.4.4 Deformação com carga no estado fresco (LVDT) e estabilidade de empilhamento

Nas misturas imprimíveis, foi realizada a avaliação da deformação com carga no estado fresco das misturas, utilizando aparelhagem equipada com dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDT). O ensaio consistiu na aplicação de carregamento crescente e leitura das deformações provocadas sobre um bloco impresso com dimensões de 14 x 14 x 5,5 cm (Figura 4a).

Para avaliar a estabilidade de empilhamento foram impressos dois blocos vazados de 14 x 14 cm e altura variável (Figura 4b). O processo consistiu no empilhamento contínuo das camadas das misturas até que o bloco desmoronasse. Este ensaio foi conduzido apenas para as composições FC 40 e FC 40_0,5, pois estas, respectivamente, apresentaram os valores máximos e mínimos nos ensaios de deformação com carga no estado fresco e abatimento.

(a)

(b)

Figura 4 – Ensaios no estado fresco: a) Deformação com carga; b) Estabilidade de empilhamento

2.5 AVALIAÇÕES NO ESTADO ENDURECIDO

2.5.1 Resistência à flexão e à compressão

No estado endurecido, as resistências à compressão axial e à flexão das composições foram determinadas na idade de moldagem e impressão de 28 dias, seguindo as diretrizes da NBR 13279 (ABNT 2005). Para cada mistura analisada, foram ensaiados seis corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, sendo três moldados e três cortados.

2.5.2 Aderência entre camadas

O procedimento de teste admitido por Barbosa (2022) serviu como referência para avaliar a resistência à aderência dos compósitos 3DCP. Para esse ensaio foram utilizadas amostras de dimensões 40 x 40 x 50 mm (Figura 3) e a carga foi aplicada através de dois cutelos de madeira posicionados na região entre a 3ª e a 4ª camada (Figura 5), para assegurar que a falha ocorresse justamente entre as camadas.

Figura 5 – Ensaio de aderência entre camadas

A resistência da aderência foi calculada através da Equação 1.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi A} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde, σ = resistência de aderência entre camadas (MPa); P = carga máxima aplicada (N) e A = área da superficial do corpo-de-prova (mm²).

2.5.3 Índices físicos

Os índices físicos das composições foram avaliados utilizando amostras das peças impressas, e seguindo as orientações prescritas na NBR 9778 (ABNT 2005).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTADO FRESCO

3.1.1 Espalhamento, massa específica, teor de ar incorporado e retenção de água

Os resultados de espalhamento, massa específica, teor de ar incorporado e retenção de água (Figura 6) evidenciam que as misturas com 40% e 50% de fíler calcário obtiveram uma maior mobilidade, enquanto as misturas com presença de fibra tiveram seus valores diminuídos. Esse comportamento também foi evidenciado por Centofante e Dagostini (2019), que atribuíram a diminuição do espalhamento à má dispersão das fibras de polipropileno na mistura. Segundo França *et al.* (2016), a presença das fibras propicia a formação de uma estrutura aglomerada robusta devido à sua forma não linear e flexível, facilitando uma interação mais intensa entre as partículas resultando na formação de aglomerados maiores e na criação de pontes mecânicas entre esses aglomerados e as próprias fibras. Adicionalmente, explicam que as forças atrativas de van der Waals entre as fibras contribuem para a formação dos aglomerados, dificultando ainda mais a dispersão das partículas finas e, consequentemente, aumentando os esforços de mistura e reduzindo a fluidez das argamassas.

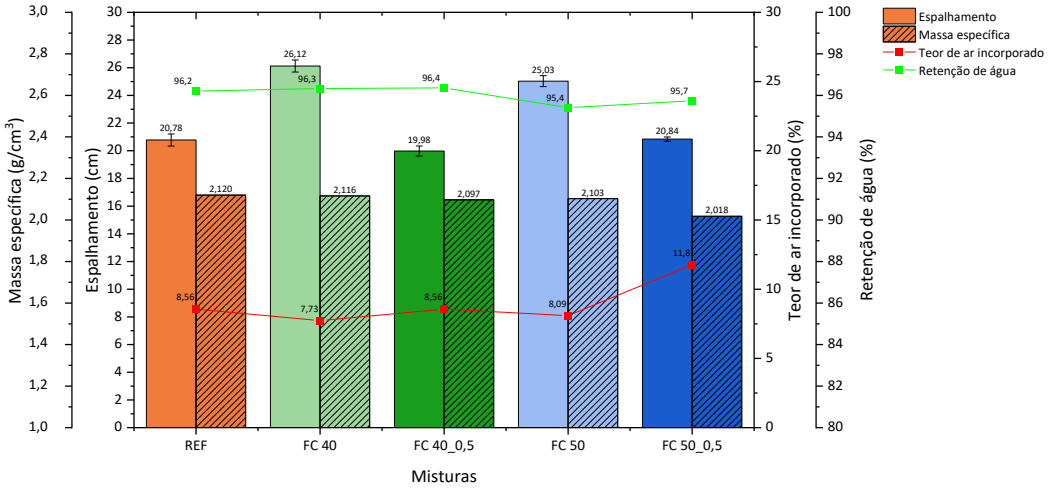


Figura 6 – Propriedades das misturas avaliadas no estado fresco

A presença de fibras nas misturas não alterou significativamente os valores de retenção de água, que se mantiveram acima de 90%, sendo classificados pela NBR 13281-1 (ABNT 2023) como U3. Entretanto, a presença de 0,5% de fibra de polipropileno aumentou o teor de ar incorporado, de modo que na mistura FC 50_0,5 houve um aumento de 3,7% em relação à FC_50. De forma esperada, os resultados das massas específicas apresentaram comportamento inverso ao teor de ar incorporado, de modo que os menores valores foram observados nas misturas com fibra.

Adicionalmente, as misturas propostas inicialmente com a adição de 1% de fibra alcançaram valores de espalhamento entre 14 e 15 cm, valores fora do intervalo de espalhamento relevante para a extrusão do material no sistema de impressão utilizado (18-22 cm) conforme evidenciado por Dias (2022). Com isso, foi realizado o reajuste de superplastificante aumentando o percentual para 0,9%, contudo, mesmo com o espalhamento com valores próximos de 18,5 cm o material não foi extrudado adequadamente com os parâmetros de impressão definidos (Figura 7), impossibilitando as análises subsequentes.

(a) (b)

Figura 7 – Impressão das misturas com 1% de fibra: a) FC 40_1,0; b) FC 50_1,0

3.1.2 Deformação com carga no estado fresco, abatimento e capacidade de empilhamento

Os resultados de deformação com carga e abatimento foram medidos e são apresentados na Figura 8. É possível perceber que as misturas FC 40 e FC 50 obtiveram maiores deformações e valores de abatimento, ocasionados pela maior mobilidade das partículas de fíler calcário, que elevam a fluidez das misturas, resultado corroborado por Nunes (2022). A adição de fibras de polipropileno nas misturas diminuiu as deformações e os valores de abatimento, o que implica uma trabalhabilidade menor. Porém, para essas misturas, é importante destacar a diminuição da deformação com carga, que pode ser uma propriedade interessante para execução do sistema 3DCP, que após a extrusão precisam de estabilidade estrutural adequada para manter a sua forma antes do endurecimento.

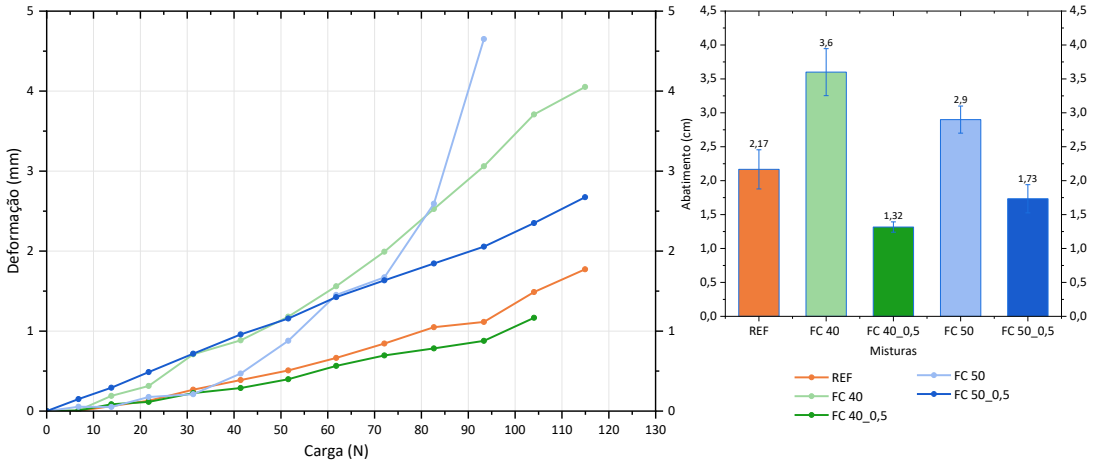


Figura 8 – Deformação com carga no estado fresco e abatimento

Na execução das impressões para análise da capacidade de empilhamento, na mistura FC 40 foi possível imprimir 60 camadas antes do desmoronamento, resultando em uma altura de impressão de aproximadamente 60 cm, enquanto a mistura FC 40_0,5 desmoronou após a impressão de 36 camadas, que resultou em uma altura de impressão de 43,2 cm. É importante destacar que a presença das fibras aumentou a estruturação das camadas, resultando em filamentos mais altos (12 mm). Porém, a irregularidade dos filamentos, evidenciada na Figura 9, provocada pelos aglomerados de fibra no momento da extrusão, levaram ao tombamento com menor número de camadas do que o esperado ao correlacionar com o ensaio de deformação com carga. Com o menor valor de deformação com carga para o FC 40_0,5, foi esperado inicialmente que houvesse uma melhor estabilidade ao longo da impressão, o que não ocorreu.

(a) (b)

Figura 9 – Impressão das misturas para ensaio de empilhamento: a) FC 40; b) FC 40_0,5

3.1.3 Viscosidade

Os resultados de viscosidade das misturas foram plotados (Figura 10) e foi possível identificar que todos os compósitos estudados apresentaram comportamento pseudoplástico, visto que os valores de viscosidade diminuíram continuamente com o aumento da taxa de cisalhamento.

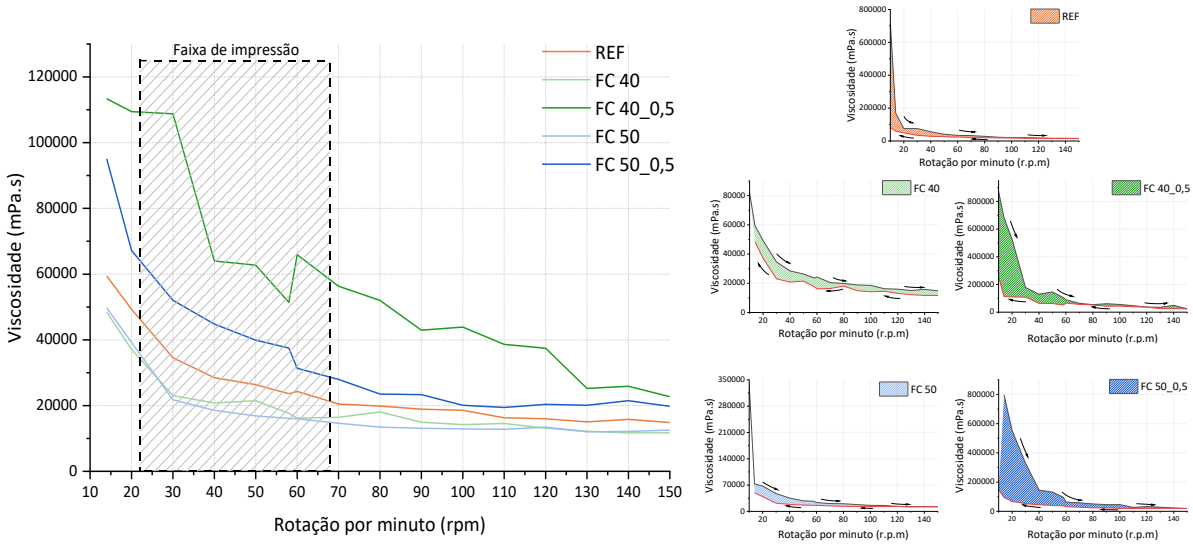


Figura 10 - Viscosidade das misturas

A viscosidade de cada composição evidenciou o impacto da substituição parcial do cimento por fíler calcário e da adição de fibras de polipropileno nas argamassas. As misturas com a incorporação de fibras, FC 40_0,5 e FC 50_0,5, apresentaram um comportamento mais viscoso em comparação com aquelas sem a adição de fibras. Ao analisar exclusivamente as misturas sem fibras, observou-se que as composições FC 40 e FC 50 apresentaram menor viscosidade em comparação com a REF, comportamento justificado pelo efeito de fluidificação proveniente do fíler, no qual, segundo Biricik e Mardani (2022), a forma esférica do fíler calcário induz um efeito de rolamento na pasta, aumentando sua fluidez.

A presença de fibras nas misturas FC 40_0,5 e FC 50_0,5 provocou um aumento significativo da viscosidade. Estudos anteriores como o de França *et al.* (2016) observaram o mesmo comportamento, demonstrando que pastas e argamassas de cimento reforçadas com fibras de polipropileno geralmente apresentam uma viscosidade mais elevada em comparação com as misturas sem fibras.

3.2 ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Índices físicos

Na Figura 11 são apresentados os valores de massa específica e índice de vazios entre as diferentes misturas analisadas. Nota-se que ao substituir o cimento pelo fíler calcário, ocorre um aumento na massa específica resultante da capacidade do fíler de preencher os vazios na mistura devido ao seu formato esférico e principalmente o tamanho de suas partículas, diminuindo assim a porosidade das misturas (Biricik e Mardani, 2022). Por outro lado, as misturas que receberam a adição de fibras de polipropileno apresentaram uma redução na massa específica, com diminuições de aproximadamente 5,8% para o FC 40 e 2,3% para o FC 50, acompanhada de um aumento no índice de vazios de 41,4% para o FC 40 e 44,4% para o FC 50. Essas variações podem ser explicadas pelo aumento da incorporação de ar durante as misturas com a adição de fibras, apresentado na Figura 6, resultando em maior porosidade no estado endurecido e, consequentemente, na redução da massa específica, da mesma forma observado por Borges *et al. (*2019).

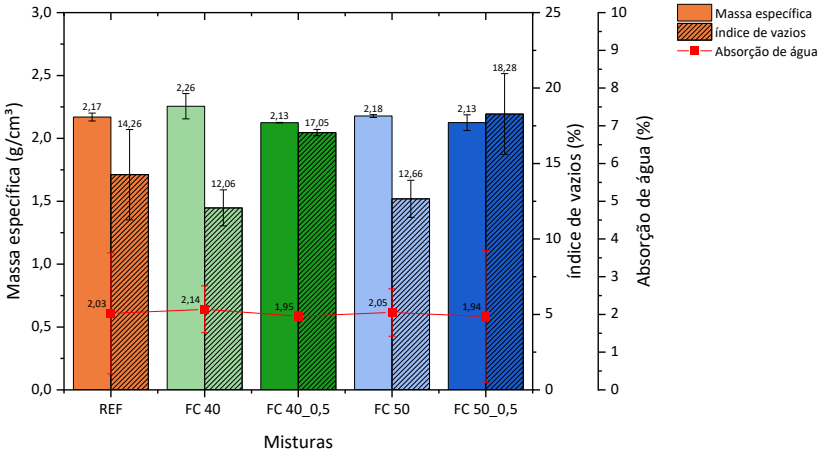


Figura 11 – Índices físicos no estado endurecido

É possível perceber que as misturas apresentaram variações na absorção de água. O valor mínimo foi de 1,94 para o FC 50_0,5 e o máximo foi de 2,14 para o FC 40. No entanto, é importante notar que os desvios padrões desses valores foram relativamente altos. Isso significa que os valores individuais da absorção de água variaram consideravelmente em torno da média para cada mistura. Dessa forma, apesar de existir uma diferença numérica entre os valores mínimos e máximos, essa diferença não é considerada estatisticamente significativa devido à grande dispersão dos dados. Portanto, a adição de fibra não teve um impacto considerável na absorção de água, resultado semelhante encontrado por Borges *et al.* (2019) que justifica a ocorrência dessa redução provavelmente devido ao comportamento hidrofóbico da fibra.

3.2.2 Resistência à flexão e compressão

Os resultados de flexão e compressão aos 28 dias são apresentados na Figura 12. Observa-se uma tendência das resistências dos corpos de prova moldados serem superiores aos que foram impressos, pois nas peças moldadas é possível ter um maior controle de adensamento, diferentemente do sistema impresso. No sistema impresso é importante considerar fatores como a composição da mistura, velocidade de extrusão, velocidade de impressão, e principalmente a união entre as camadas (Dias 2022).

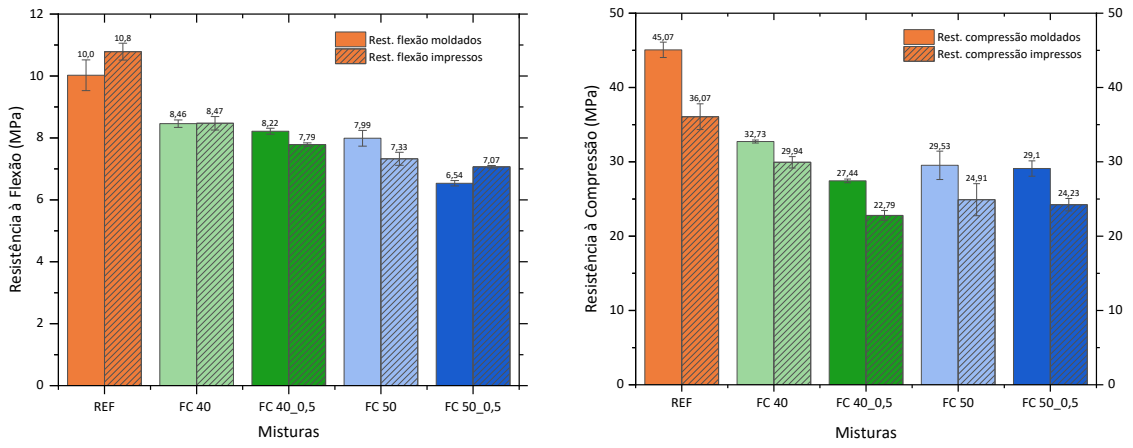


Figura 12 – Resultados de resistências mecânicas das misturas: a) flexão; b) compressão

Em relação às resistências à compressão e à flexão, a mistura de referência apresentou maiores valores, enquanto as demais misturas com a substituição do cimento por 40% e 50% de fíler calcário apresentaram uma redução na resistência em ambos os ensaios. Entre essas três misturas, a diminuição nas resistências pode ser verificada principalmente na argamassa com 50% de substituição por fíler, a qual apresentou uma redução de flexão e compressão, respetivamente, de 20,1% e 34,5% nos prismas moldados e de 32,1% e 30,9% nos corpos de prova impressos. Esse comportamento é explicado devido ao menor consumo de cimento presente nessa mistura, o que ocasionou um menor desenvolvimento de produtos hidratados ao longo do período de cura, reduzindo as resistências (Barbosa 2022). Embora haja redução nos valores de resistência, é notório o ganho ambiental, pois o consumo de cimento é diminuído em maior proporção que as perdas de desempenho do 3DCP no estado endurecido.

Analisando a influência da incorporação de fibras nas composições FC 40 e FC 50, percebe-se que ao incorporá-las as resistências das misturas são influenciadas. Na flexão essa influência é observada principalmente na argamassa FC 50 ocorrendo uma redução de 18,2% e 3,6% nos prismas moldados e impressos, respectivamente. Na compressão, o FC 40 apresentou uma maior variação, chegando a uma diminuição de 16,2% e 23,9% nos prismas moldados e impressos. De acordo com Blazy, J. e Blazy, R (2021), a diminuição da resistência pode ser resultado de uma má trabalhabilidade causada pela quantidade excessiva de fibra provocando a redução do espalhamento, formação de aglomerados de fibra e o aumento do teor de ar incorporado e da porosidade da composição. Tais comportamentos podem ser considerados para explicar a variação das resistências das misturas estudadas visto que a adição das fibras alterou significamente as propriedades das misturas, tais como a redução dos espalhamentos (Figura 6), aumento das porosidades (Figura 11) e a formação de algomerados de fibra de polipropileno, evidenciadas na Figura 13.

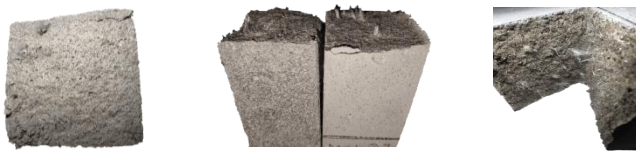
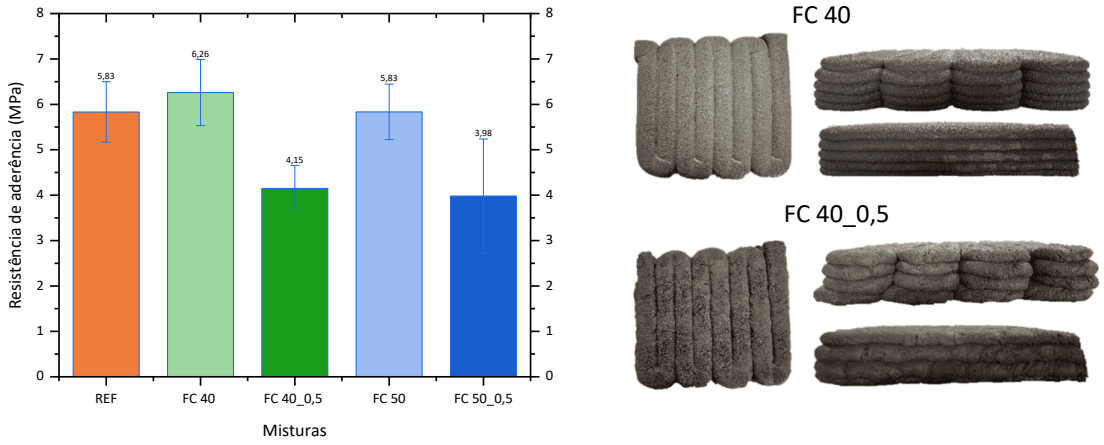


Figura 13 – Formação de aglomerados de fibra de polipropileno nas amostras da mistura FC 50_0,5

3.2.3 Aderência entre camadas

A Figura 14a representa os resultados do ensaio de aderência entre as camadas aos 28 dias de impressão. Para as misturas sem a incorporação das fibras, as composições REF e FC 50 apresentaram a mesma resistência, enquanto ocorreu um aumento na aderência entre camadas de 7,4% para o FC 40. Analisando a influência da incorporação de fibras nas misturas, nota-se que a adição resultou em aderências inferiores, sendo mais evidente na composição FC 40_0,5 que apresentou um decréscimo de 33,7% na aderência entre camadas em comparação a sua matriz sem adição.



(a) (b)

Figura 14 – a) Resultados de aderência entre camadas; b) Peças impressas com as misturas FC40 e FC40_0,5

Segundo Barbosa (2022), a conexão entre camadas pode ser comprometida devido à formação de vazios entre os filamentos durante o processo de extrusão. Além disso, Dias (2022) disserta que a porosidade das misturas exerce influência na conexão entre as camadas, uma vez que o ar aprisionado na interface das camadas pode diminuir a área efetiva de adesão, resultando em uma redução na resistência de aderência. Nesse sentido, aspectos relacionados aos materiais utilizados na formulação, trabalhabilidade da mistura, configurações da máquina e o intervalo de deposição entre camadas são reconhecidos como determinantes no gerenciamento da força de adesão entre os filamentos.

Yao *et al.* (2022) ressaltam que tanto fatores físicos quanto químicos podem afetar a aderência entre camadas na impressão 3DCP. Enquanto os fatores físicos estão relacionados aos parâmetros de impressão, como velocidade e taxa de extrusão, que influenciam na porosidade dos filamentos, os mecanismos químicos referem-se às propriedades intrínsecas da mistura, como a formação de produtos da hidratação do cimento.

No estudo realizado, os parâmetros de impressão permaneceram constantes para todas as misturas, sendo apenas a velocidade do sistema de extrusão ajustada nas misturas com fibras devido à alta

viscosidade das mesmas. Apesar disso, a baixa trabalhabilidade das misturas resultou em porosidade superior e falhas de impressão nas peças, em comparação com as misturas sem fibras, como demostrado na Figura 14b.

Nota-se, portanto, que nas misturas os fatores físicos apresentaram maior influência na aderência entre camadas, uma vez que mesmo com a redução do consumo de cimento a aderência entre as camadas aumentou, possivelmente devido à maior trabalhabilidade apresentadas (Figura 6). De maneira semelhante, a trabalhabilidade influenciou na aderência entre as camadas das misturas com adição de fibras, resultando em uma ligação mais fraca devido à diminuição dessa propriedade e ao aumento da porosidade, conforme evidenciado na Figura 11.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento físico e mecânico de argamassas de cimento e fíler calcário com incorporação de fibras de polipropileno. Os resultados experimentais revelaram que a introdução de fíler e das fibras de polipropileno provocou alterações nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

No estado fresco, a adição de fibras demonstrou reduzir o espalhamento, abatimento e deformação da mistura, ao mesmo tempo em que eleva a incorporação de ar. Observou-se um aumento significativo na viscosidade das misturas com fibras, apesar do efeito redutor exercido pelo fíler sobre essa propriedade. Em relação à capacidade de empilhamento, inicialmente, esperava-se que a adição de fibras proporcionasse uma maior estabilidade ao longo da impressão, especialmente considerando o menor valor de deformação sob carga para o FC 40_0,5. No entanto, a presença de aglomerados de fibras acabou gerando irregularidades nos filamentos, o que comprometeu a estabilidade nas impressões com maior número de camadas.

Ao analisar as propriedades no estado endurecido, foi observado que a absorção de água não foi significativamente afetada pela adição das fibras de polipropileno, embora tenha havido um aumento na porosidade. A relação entre a incorporação de fibras e o aumento da resistência à compressão e, principalmente, à tração não segue uma tendência linear, devido a fatores como a baixa trabalhabilidade, que resulta em uma distribuição desfavorável das fibras e na diminuição do adensamento das misturas. A trabalhabilidade comprometida pelo alto teor de fibras e pela porosidade teve um impacto negativo na aderência entre as camadas, resultando em uma ligação menos eficaz nas misturas com adição de fibras de polipropileno. Por outro lado, observou-se um aumento na aderência nas misturas contendo fíler calcário, devido às melhores características de trabalhabilidade presentes nessas composições.

Logo, é possível concluir que as fibras de polipropileno em quantidade adequada podem melhorar as propriedades de misturas cimentícias impressas em 3D, mas há necessidade de uma investigação mais aprofundada dos mecanismos subjacentes a essas alterações. Sugere-se que trabalhos futuros se concentrem na elaboração de metodologias que explorem o processo de dosagem e na avaliação dos parâmetros orientadores de impressão, a fim de aprimorar o entendimento e a aplicação prática das fibras de polipropileno em 3DCP. Essa abordagem pode não só contribuir para a evolução da tecnologia de impressão 3D em construção, mas também para a sustentabilidade e eficiência dos materiais utilizados nesse processo.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ, CAPES, FAPESQ e ao IFPB - campus João Pessoa (PRPIPG e DIPPED), pelo apoio financeiro e a concessão de bolsas.

6 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2002). NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos— Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice da consistência. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005). NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2023). NBR 13281-1: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2023). NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2022). NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação de densidade e de absorção de água. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2021). NBR 16973: Agregados – Determinação do material fino que passa na peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2021). NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Blazy, J., Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. Case Studies in Construction Materials, 14, e00549. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00549

Barbosa, M. D. S. (2022). Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo de cimento reduzido por meio de adições minerais (Master's thesis, UFRN).

Biricik, Ö., Mardani, A. (2022). Parameters affecting thixotropic behavior of self compacting concrete and 3D printable concrete; a state-of-the-art review. Construction and Building Materials, 339, 127688. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127688

Borges, A. P. S. N., Motta, L. A. D. C., & Pinto, E. B. (2019). Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. Matéria (Rio de Janeiro), 24, e12364.https://www.scielo.br/j/rmat/a/LprhPDswVZzMg6ZkydLbh7f/#

Centofante, G., Dagostini, C. M. (2014). Análise das propriedades de argamassa de revestimento com adição de fibras de polipropileno. Joaçaba: Unoesc & Ciência-Acet. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1204

De Abreu, V. H. S., de Souza, G. M. (2019). Uma revisão bibliométrica sobre a impressão 3D em concreto. Brazilian Journal of Production Engineering, 5(5): 50-62. https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/27748

Dias, L. D. S. (2022). Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP) (Master's thesis, UFRN)

Farias, M. M., Farias, C. L. D. R., & Picanço, M. D. S. (2023). Escória de Alto Forno como substituição parcial ao cimento Portland. Matéria (Rio de Janeiro): 28, e20230120.https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0120

França, M. D., Cardoso, F. A., & Pileggi, R. G. (2016). Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 9(2): 226-243. https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200005

Nunes, G. D. M. (2023). Avaliação do comportamento mecânico de misturas 3DCP com substituição parcial do cimento por fíler calcário e metacaulim em comparação aos materiais para alvenaria estrutural (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

ONU (2022). Relatório de Status Global de Edificação e Construção de 2022. https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction

Yao, H., Xie, Z., Li, Z., Huang, C., Yuan, Q., Zheng, X. (2022). The relationship between the rheological behavior and interlayer bonding properties of 3D printing cementitious materials with the addition of attapulgite. Construction and Building Materials, 316, 125809. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125809

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE WITH MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR BOTTOM ASH

Salem Alnezami [a]; Rawaz Kurda [b]; Rui Silva [a] and Jorge de Brito [a]

[a] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, e-mails: salem.alnezami@tecnico.ulisboa.pt; rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt; jb@civil.ist.utl.pt

[b] Department of Highway and Bridge Engineering, Technical Engineering College, Erbil Polytechnic University, Erbil, 44001, Iraq, e-mail: rawaz.kurda@epu.edu.iq

ABSTRACT

This study evaluates the incorporation of municipal solid waste incinerator bottom ash as a partial substitute for cement in the production of structural recycled aggregate concrete. The ash contains a considerable amount of metallic aluminum resulting from incorrect waste separation, which releases hydrogen gas when exposed to an alkaline environment. Therefore, a new treatment is presented that accelerates this release to avoid expansion reactions in the resulting concrete. The ash was then incorporated (20%, 35% and 55% by mass) under two conditions; untreated and treated with NaOH. Additionally, the natural aggregate was replaced with recycled concrete aggregate (up to 100% volumetrically) to improve the composites' environmental performance. The results reveal a general reduction in performance when incorporating the ash. Factors include the presence of unburned organic materials and the greater porosity of the mixes due to the oxidation of aluminium particles. This latter was less relevant in mixes with treated ash, demonstrating better performance than untreated ash. Additionally, the ash showed limited reaction with the cement, behaving more like a filler than a pozzolanic addition. Despite these challenges, satisfactory durability was observed for mixes with 20% ash, opening the possibility of its use in less demanding applications in construction.

Keywords: Municipal solid waste incinerated bottom ashes; treatment; supplementary cementitious materials; concrete; sustainability.

1 INTRODUCTION

The global demand for ordinary Portland cement (OPC) has witnessed a significant surge in recent years. The production of OPC is expected to reach an estimated 4.1 billion metric tonnes by 2050, nearly three-fold the reported amount produced in the year 2000 (WBCSD, 2018). This snowballing demand on OPC is strongly tangled with a severe environmental concern - CO_2 emissions (U.S.G. Survey, 2019). Its production is an energy-intensive process, which involves heating limestone and clay to elevated temperatures, resulting in substantial CO_2 emissions (Mikulčić et al., 2012; IEA, 2011). In 2021, the CO_2 emissions released by this industry alone accounted for 8% of the global CO_2 emissions, making it the third-largest source of carbon emissions, after the energy and steel industries (IEA, 2011; WBCSD, 2018). These statistics highlight the urgent need for sustainable alternatives to OPC in concrete production to lighten the substantial carbon footprint associated with its production and contribute to global efforts to combat climate change.

Furthermore, the substantial growth in the world's population has led to an increasing generation of municipal solid wastes (MSW) worldwide. On November 15, 2022, the world's population reached 8 billion people and is expected to reach 10 billion by 2058 (United Nations, 2022). According to the World Bank, the global MSW yearly generation reached 2.01 billion tonnes in 2016 and is expected to increase by around 70% to reach 3.40 billion tonnes by 2050 (Kaza et al., 2018). The average daily *per capita* waste generation worldwide stands at 0.74 kilograms, with significant variations observed, spanning from as low as 0.11 kilograms to as high as 4.54 kilograms (Kaza et al., 2018). In the waste management lifecycle of MSW, lies the incineration process with heat recovery and thus the generation of electricity, a method with significant advantages also in reducing waste mass by ~70% and volume by ~90% (Luo et al., 2019; Ren et al., 2020). As a result, incineration is considered an economically viable and environmentally beneficial method for MSW treatment, while lessening the need for landfill spaces (Allegrini et al., 2015; Cudjoe & Acquah, 2021). As MSW undergoes incineration, the organic components are burned off, leaving behind incombustible materials. Municipal solid waste incinerator bottom ash (MIBA), the by-product produced during MSW incineration, consists mainly of the non-combustible portion of the original waste, which includes metals such as aluminium, glass, ceramics, and other inorganic wastes (Liu et al., 2006; Silva et al., 2019).The performance of concrete containing MIBA can be influenced by two key factors: the presence of metallic aluminium and low pozzolanicity. Metallic aluminium, originating from aluminium-based waste materials found in MSW, including cans and foils, can hinder the development of the concrete matrix's strength, delay setting times, and lead to undesired expansion issues (Carvalho et al., 2021; Kurda et al., 2020). The utilisation of recycled concrete aggregates (RCA) presents both opportunities and challenges, as elucidated in various studies (Pacheco et al., 2019; Kurda et al., 2018). While the compressive strength of concrete tends to decrease with increasing coarse RCA incorporation ratios, studies have shown mixed results regarding the influence of RCA substitution on compressive strength (Poon, 2004; Xiao et al., 2005). This study presents an innovative approach to the treatment of MIBA and investigates its incorporation, in both untreated and treated states, as SCM replacing OPC in concrete mixes. Moreover, RCA was incorporated, replacing NA, to evaluate the performance of concrete incorporating different SCM ratios with 100% RCA in an attempt to further improve the composite's environmental performance.

2 METHODS

2.1 TREATMENT OF MIBA

MIBA was collected from Valorsul's incineration facility in S. João da Talha, Lisbon, Portugal, in January 2019. The dried MIBA then underwent a manual sorting process to eliminate visible non-burned

materials, predominantly comprising plastic, wood, and ferrous metal particles. Through the use of a Los Angeles abrasion machine, 20 kg of the previously dried and manually sorted material was subjected to a 30-minute grinding process. To separate larger particles for subsequent size reduction, the resultant MIBA underwent screening through a 2-mm sieve. The particles that remained trapped in the 2-mm sieve were further reduced in size to align with the sieve-passing material. This was achieved using a cylinder mill. Subsequently, the resulting particles were homogenized with the previously separated material and prepared for the final grinding stage, which involved the use of a ball milling machine. Approximately 18 kg of MIBA underwent a 90-minute milling process using a ball mill. This stage played a crucial role in producing a powdery product with an average particle size similar to that of cement (< 150 µm). Finally, the milled MIBA underwent sieving using a 1-mm sieve to separate any residual larger particles that withstood the milling process.

As stated, MIBA is likely to contain a considerable amount of aluminium. This metal can react with OH^--rich solutions from the fresh cement paste, producing aluminates and a significant amount of hydrogen gas (H_2). Therefore, a procedure was devised capable of removing the metallic aluminium via a NaOH-based treatment. The stoichiometric quantities (atomic and molecular weights) of the mentioned reaction are seen, in grams, in Eq. [1], Eq. [2] and Eq. [3], showing how 1 g of aluminium produces 0.11 g of H_2.

$$2Al^0 + 2NaOH + 6H_2O \rightarrow 2NaAl(OH)_4 + 3\,H_2\uparrow \quad [1]$$

$$54g + 80g + 108\,g \rightarrow 236g + 6g\uparrow \quad [2]$$

$$g\ H_2\uparrow = 1\ \text{g Al°} \times \frac{6\ g\ H_2\uparrow}{54\ g\ Al°} = 0.11\ g \quad [3]$$

Using the stoichiometric calculations, the amount of metallic aluminium required to produce the specified amount of H_2 was determined by Eq. [4] and Eq. [5]. To obtain an optimum treatment procedure with maximized H_2 gas release, several parameters were systematically varied, considering sustainability and economic considerations. These parameters included water content (50 ml and 800 ml), molarity (0.25 M, 1 M, 2.5 M, and 10 M), type of MIBA (ground and unprocessed), and MIBA content (15 g and 25 g).

$$m = v \times \alpha \quad [4]$$

$$\text{g Al°} = 0.00485\ \text{g}\ H_2\uparrow \times \frac{54\ \text{g Al°}}{6\ \text{g}\ H_2\uparrow} = 0.04365\ \text{g Al°} \quad [5]$$

In the initial test, a molarity of 0.25 M and a MIBA-to-water ratio (MIBA/W) of 0.02 were used. In the following tests, the molarity was increased to accurately ascertain the aluminium content in MIBA to avoid the risk of unreacted particles. To better replicate the actual conditions at which the MIBA would be treated, a MIBA/W ratio of 0.50 was then used and the molarity was reduced to 0, 0.1, and 0.25 to minimize the consumption of NaOH.

2.2 Concrete mix design

The reference concrete with natural aggregate (Ref(N)), made with OPC as the binder, was designed to have a target strength class C30/37. The percentage of WRA was optimized for all mixes to maintain a constant slump test result of 125 ± 25 mm (S3 slump class). The water-to-binder ratio (w/b) was fixed at 0.5. The mass and volume of the aggregates for each sieve size were chosen in accordance with Faury's method. The replacement of MIBA (20%, 35%, and 55%) was carried out based on the total binder mass (300 kg/m^3), following the guidelines set by standard EN 197-1 (2000). Coarse RCA of varying sizes fully replaced NA for both treated MIBA (TMB) and untreated MIBA (UMB) mixes at each binder replacement ratio. Additionally, RCA was incorporated into the reference concrete. This comprehensive approach resulted in the formulation of 14 distinct mixes. The coarse RCA were

prepared on-site, sourced from a concrete company that adhered to specific requirements. The original concrete had a strength class of C30/37, a cement content of 350 kg/m^3, a water-to-binder ratio (w/b) of 0.45, exposure class XC2 (P), a slump within the range of 100-150 mm (S3), type of cement specified as CEM II/A-L (Class 42.5 R, sourced from the *Outão*, *Setúbal*, plant in 50 kg bags), and a maximum aggregate size of 22.4 mm.

2.3 Testing and characterisation methods

The compressive strength test was conducted on cubic 150 mm × 150 mm × 150 mm concrete specimens in accordance with EN 12390-3 (EN 12390-3, 2001). Three cubes were tested at each age (i.e. 7, 28, 90 and 360 days). Moreover, the density and water absorption of coarse RCA were evaluated in accordance with the standards EN 1097-6 (2013). The aggregates' particle size distribution was determined according to EN 12620 (2002) and EN 933-1 (2012).

2.4 Characterization of raw materials

Table 1 presents the results of the particle size distribution of unprocessed MIBA (before any type of treatment), derived from a sample weighing 5,848.5 g. The material clearly presents an extensive particle size distribution equivalent to the combination of fine and coarse sands, sand-gravel and fine gravel. Only a small portion of the original MIBA (~5%) is within the range typical of cementitious binders and thus requires an intensive grinding process.

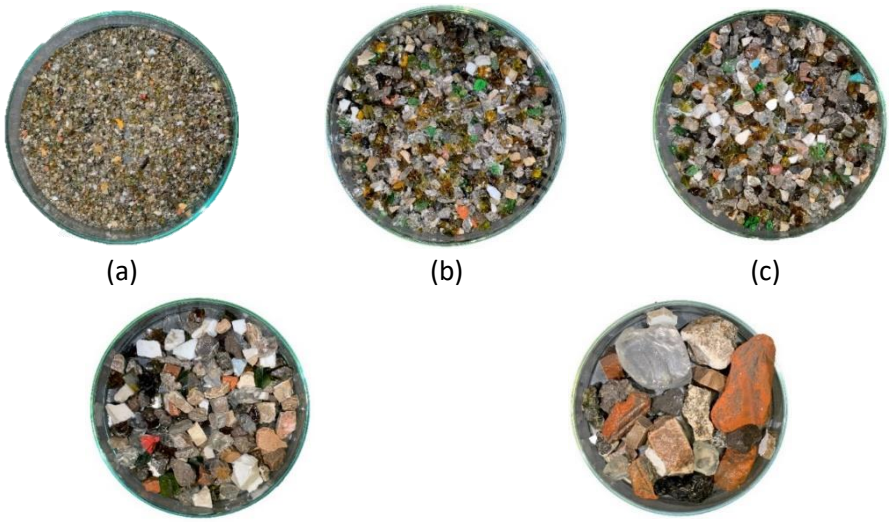
Table 1 - Size particle distribution of unprocessed MIBA

Size sieve (mm)	MIBA (g)	Retained (%)
22.4	21.85	0.4
16	154.25	2.7
11.2	418.9	7.2
8	560.3	9.7
5.2	1029	17.7
4	353	6.1
2	929.3	16.0
1	751.5	13.0
0.5	738.45	12.7
0.25	568	9.8
Rest	276.75	4.8

During the initial grinding stage of MIBA in the Los Angeles abrasion machine, a sample with a mass of 41,545 g was utilized for testing. This process yielded 4,361 g of coarse particles (MIBA LA coarse obtained in a 2-mm dry sieving, followed by wet sieving), which constitutes 10.5% of the total sample weight. These coarse particles exhibit a size range of approximately 2 mm to over 10 mm, as indicated in Table 2 and Figure 1. This limitation primarily stems from the machine's inefficiency in breaking down more robust components present in MIBA. This methodology also underscores the difficulty in attaining a cement-like powder with the Los Angeles abrasion machine.

To gain a more comprehensive understanding of the material, a compositional analysis was conducted within the size range of 2 mm to 4 mm (2-mm dry sieving, followed by wet sieving). The choice of this class was made to ensure some statistical representativeness in the compositional evaluation of the particles. In large sizes, particles are more easily identifiable, but to carry out a statistical assessment, a significantly larger mass would be required. In the fraction under 2 mm, it was considerably more

challenging to manually separate particles for weighing. This analysis revealed that glass accounted for 76.2% of the composition within this specific size range, as presented in Table 3.



(a) (b) (c)

(d) (e)

Figure 1 - MIBA LA coarse (a) under 2 mm, (b) 2-4 mm, (c) 4-6.3 mm, (d) 6.3-10 mm, and (e) over 10 mm ((Los Angeles machine output after 2 mm dry sieving followed by wet sieving classification)

Table 2 - Coarse and magnetic fraction particle size distribution (Los Angeles machine output after a 2-mm dry sieving followed by wet sieving classification)

Particle size (mm)	MIBA LA coarse (%weight)	MIBA LA coarse magnetic (%weight)	MIBA LA coarse magnetic fraction (%)
> 10	2.82	0.19	6.6
6.3 - 10	1.66	0.12	7.5
4 - 6.3	3.15	0.17	5.2
2 - 4	2.41	0.24	10.0
< 2	0.45	0.07	15.6
Total	10.50	0.79	7.5

The manually separated size fractions that posed greater identification challenges underwent XRD analysis. Many of these particles exhibited mixed composition, made of aluminium and ferromagnetic components consisting of iron alloys, oxidation products, and some iron silicates (e.g. augite).

Taking into account the limitations of the Los Angeles machine, a particle size reduction was carried out with the roller mill only for coarse fractions (> 2 mm). The colour of the product obtained in the roller mill is very different from the colour of the fine fraction from the Los Angeles mill (Figure 2). This aspect, therefore, reflects the existence of compositional differences between the finer and coarser fractions of MIBA. The light colour of the ground coarse fraction is mainly due to the high content of glass and ceramics. This aspect may also be relevant for defining adequate treatment processes and future applications of MIBA.

To conclude the comminution process, the initial mass of MIBA was reconstituted by combining the fine output from both the Los Angeles machine and the roller cylinder mill. Ball milling took place for 90 minutes.

Table 3 - Fraction compositional analysis (2-4 mm Los Angeles machine output after wet sieving)

Component	**Amount by total (%)**	**Type of materials**
Colourless glass	31.10	Glass
Dark coloured mixture	1.30	Glass
Dark green/brown glass	36.20	Glass
Light coloured mixture	15.50	*Quartz, calcite, aluminium, mullite, cristobalite, kyanite and anorthite
Light green glass	7.60	Glass
Magnetic	11.20	*Magnetite, quartz, fayalite, augite
Light grey metallic mix	1.40	Aluminium and mixed particles
Metals (copper)	2.30	Copper
Red ceramics	0.60	*Quartz, amorphous, hematite
White ceramics	3.80	*Quartz, mullite, anatase and calcite
Note: *XRD confirmed		

(a) (b) (c)

Figure 2 - Coarse and fine fractions of MIBA: (a) coarse MIBA particles after Los Angeles machine; (b) coarse MIBA particles after cylinder milling (left) and fine MIBA particles after Los Angeles machine (right); and (c) MIBA final product after ball milling.

Given the inherent heterogeneous nature of MIBA, the XRD analysis was conducted on batches collected from large bags on multiple occasions spanning the period between 2017 and 2022. Notably, distinctions within the big bags were taken into account, with a specific focus on the finer fractions concentrated at the bottom of the big bags (MIBA-BBB). Further examination of the impact of extending the grinding time in the ball mill to 4 hours was also carried out. Additionally, a detailed investigation was performed on the fine fraction (< 63 µm) of the final ground product and the bottom product of big bags fractions treated with HCl (MIBA-BBB+HCl). A sample of hydrated MIBA, achieved through the addition of tap water followed by a resting period until complete evaporation, was also subjected to evaluation. The outcomes of this comprehensive assessment are depicted in Figure 3. The XRF analysis was also conducted on MIBA, MIBA LA coarse, MIBA < 63 µm, MIBA-BBB and MIBA-BBB+HCl (Figure 4).

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 MIBA metallic aluminium removal treatment

The aluminium quantification test showed several outcomes from multiple iterations conducted to minimize the required quantities of water and NaOH for an effective release of H_2 gas (Table 4). MIBA was incorporated in two forms: its original unprocessed state (as received from the MIBA treatment

unit) and in a ground form. The results indicated that, when unprocessed MIBA was used, the volume of released H_2 gas remained relatively consistent of approximately 85 ml per 15 g of MIBA. Increasing the molarity decreased the time required for releasing this amount of hydrogen. Conversely, when ground MIBA was employed under the same conditions, the gas volume doubled, suggesting the presence of many unreacted aluminium particles in the unprocessed ash samples. Subsequent tests using a 0.1 M molarity for the ground sample revealed an insufficient release of gas, requiring additional NaOH for adequate treatment.

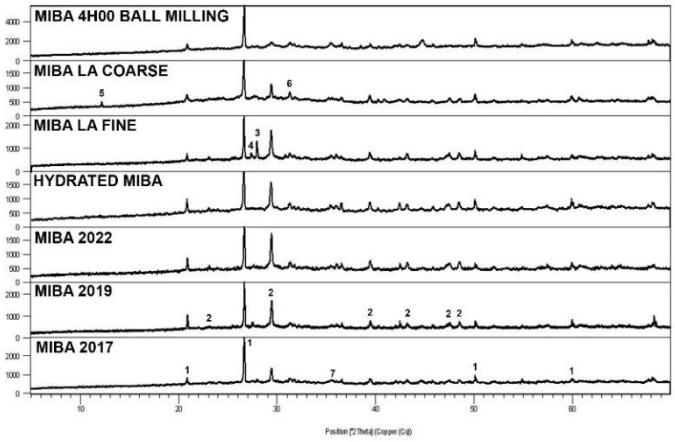


Figure 3 - XRD main diagnosis phase peaks of MIBA in various conditions.

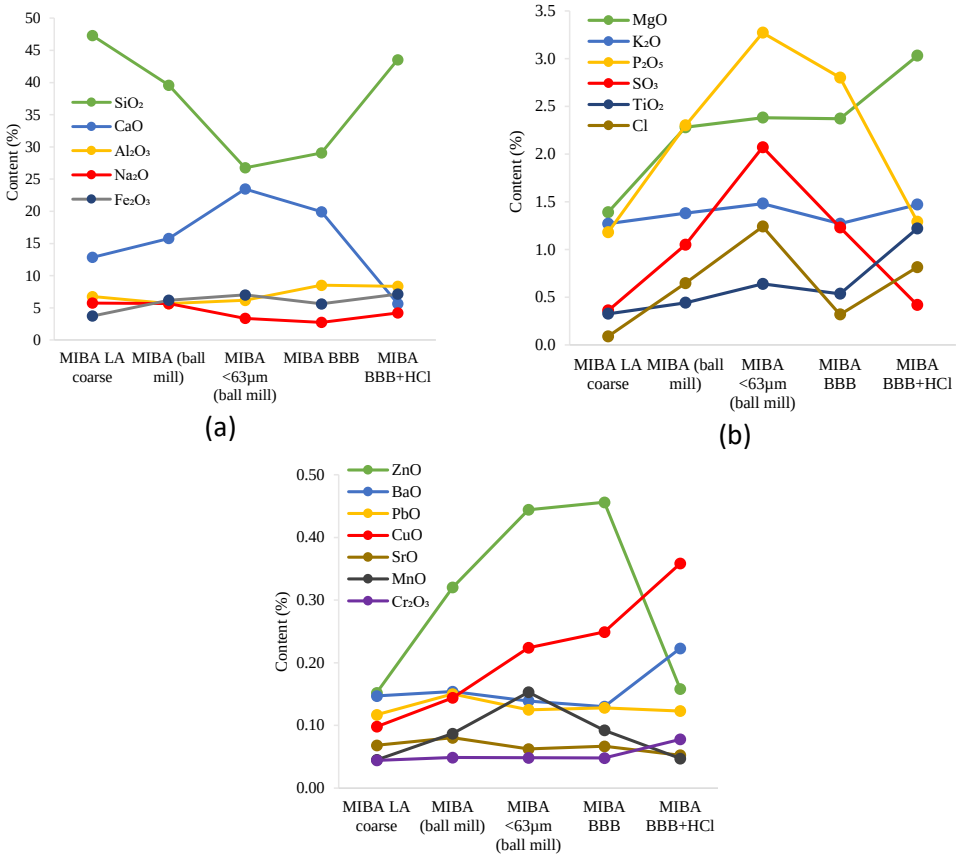


Figure 4 - XRF of different fractions of MIBA: (a) SiO_2, CaO, Al_2O_3, Na_2O and Fe_2O_3; (b) MgO, K_2O, P_2O_5, SO_3, TiO_2 and Cl; (c) ZnO, BaO, PbO, CuO, SrO, MnO and Cr_2O_3.

The primary aim of this treatment is not only aluminium elimination but achieving it in a sustainable manner with minimized use of components. Following the trials presented in Table 4, more controlled testing was conducted for the treatment of ground MIBA to determine the minimum molarity and water required for treatment. The results of several trials using a 0.25 M NaOH solution (50 g of water, 25g MIBA, and 0.5 g NaOH) are presented in Figure 5, with a MIBA/W ratio of 0.5 (equivalent to the curve 0.25M-MIBA/W=0.5). Frequent readings were initially taken due to significant hydrogen gas release, extending to 3-hour intervals after 6 hours, and then to 6-hour intervals until hydrogen release stabilization. To optimize the treatment process and minimize water usage, additional tests were conducted with a MIBA/W ratio of 1 and a molarity of 0.5 (25 g of water, 25 g MIBA, and 0.5 g NaOH - 0.5M-MIBA/W=1.0). Three trials were carried out for reproducibility. Figure 5 illustrates the cumulative H_2 release over time with a MIBA/W ratio of 0.5 or 1.0 and molarity of either 0.25 or 0.5. The results closely resemble those of tests with a MIBA/W ratio of 0.5 and a molarity of 0.25, differing mainly in the time required for stabilization.

Table 4- Amount of H_2 gas released

Type of MIBA	Quantity of water (ml)	Molarity (M)	MIBA (g)	Volume H_2 (ml)	Q.AL (g/kg)	MIBA/W
Unprocessed	800	0.25	15	84.0	3.90	0.02
Unprocessed	800	1.00	15	80.0	3.70	0.02
Unprocessed	800	1.50	15	81.0	3.70	0.02
Unprocessed	800	2.50	15	78.0	3.60	0.02
Unprocessed	800	10.0	15	92.0	4.20	0.02
Ground	800	10.0	15	152.0	7.00	0.02

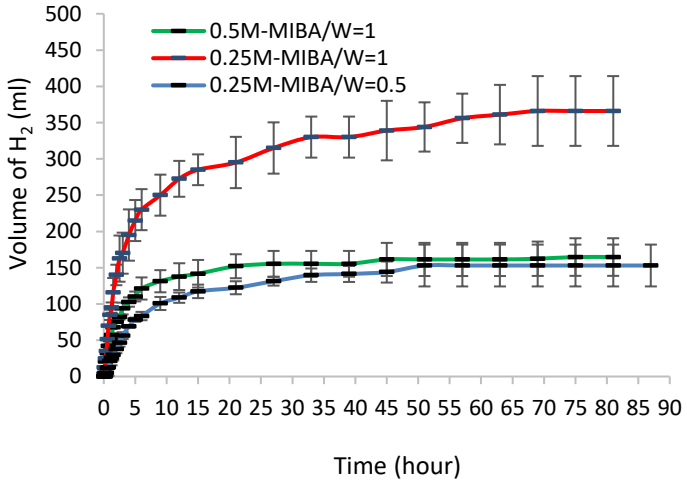


Figure 5 - Volume of H_2 released over time in a solution with different molarities and MIBA/W ratios

Based on prior tests, the chosen molarity for MIBA treatment was 0.25 due to its cost-effective use of raw materials. To further investigate the scalability of the treatment process, tests were conducted with double amounts of both MIBA and water. Specifically, for a MIBA/W ratio of 1 and a molarity of 0.25, two sets of tests were performed using MIBA quantities equivalent to 50 g (Figure 5). The results were similar (i.e. as expected, slightly more than double the amount of released hydrogen), indicating that the treatment process exhibits consistent behaviour regardless of the amount of MIBA employed, with stabilization observed after a comparable time frame. It was observed that there is a

heterogeneous distribution of aluminium within the MIBA, and that 25 g may not accurately represent the overall material composition. Based on the results from all tests conducted, it was determined that 87 hours were needed to ensure the treatment achieved stabilization when employing a MIBA/W ratio of 1 and a molarity of 0.25.

3.2 Compressive strength

Figures 6 and 7 show the strength development over time and impact of incorporating the (un)treated ash, respectively. Incorporating MIBA in concrete mixes had a detrimental impact on the compressive strength. The performance is mainly influenced by the presence of metallic aluminium, which leads to damaging expansive reactions and thus increased porosity through the generation of H_2 gas (among other ones in less notable quantities) when reacting with the alkaline activator (Kurda et al., 2020). The development of the compressive strength for Ref(N) mixes surpassed that of mixes containing either type of MIBA. Over time, the difference in strength between Ref(N) and MIBA specimens decreased due to the expected slower pozzolanic reactions between the glass fraction of MIBA and the hydration products of cement (Silva et al., 2013). Furthermore, incorporating MIBA in concrete mixes adversely affected compressive strength, particularly at earlier stages. After 28 days, the strength development of both TMB(N) and untreated MIBA with natural aggregate UMB(N) concrete is significantly slower than that of the mixes with Ref(N) at older ages. Notably, the compressive strength development of treated MIBA with natural aggregate TMB(N) concrete mixes surpasses that of UMB(N) mixes. This is caused by the treatment process of MIBA, which eliminates aluminium content within MIBA, thereby resolving problems related to air bubble formation caused by aluminium and subsequently enhancing compressive strength.

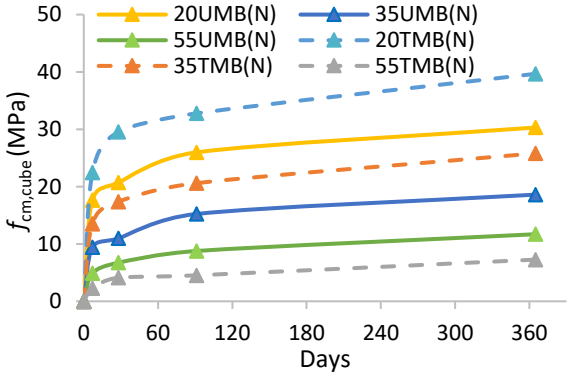


Figure 6- Effect of incorporating different levels UMB and TMB on the compressive strength of concrete with NA over time

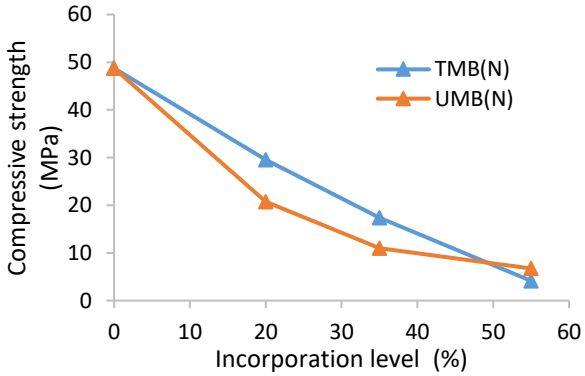


Figure 7 - Effect of incorporating different levels of UMB and TMB on the compressive strength of concrete with NA at 28 days

The combined incorporation of RCA with MIBA in concrete results in lower compressive strength values compared to the individual incorporation of MIBA or RCA only. Both RCA and MIBA have a high water demand. Moreover, the mechanical properties and durability of concrete are related to water absorption, with high water absorption levels indicating decreased mechanical performance and durability (Che Amat et al., 2020). The significant presence of old cement adhered to the surface of coarse RCA particles increases the porosity of the structure and diminishes the strength of concrete containing coarse RCA.

The combined factors explain the decline in compressive strength of untreated MIBA with recycled aggregate UMB(R) mixes when compared to those of the reference concrete. Regarding treated MIBA

with recycled aggregate TMB(R), the decrease in compressive strength. This effect can be minimized by the treatment process of MIBA, which changes the chemical and physical properties of the structure. The values of the compressive strength of samples with MIBA and RCA are presented in Figure 8 and Figure 9.

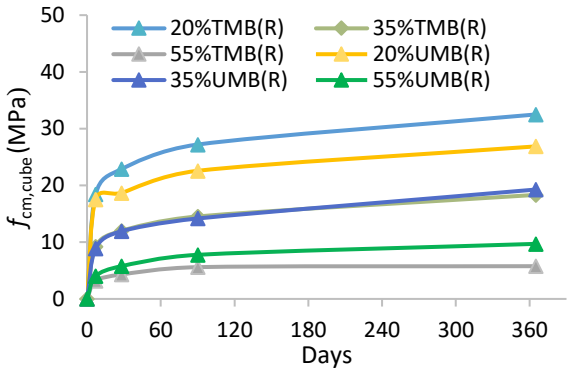


Figure 8 - Effect of incorporating different levels UMB and TMB on the compressive strength of concrete with RCA over time

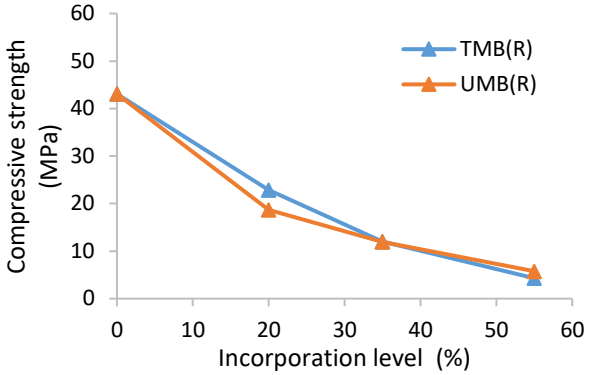


Figure 9 - Effect of incorporating different levels of UMB and TMB on the compressive strength of concrete with RCA at 28 days

4 CONCLUSIONS

Considerable efforts to remove the metallic aluminium content from the bottom ashes were undertaken to avoid undesirable expansive reactions, which would ultimately affect the microstructure of concrete, by means of an experimental chemical treatment. During this process, the required reaction time decreased as the molarity of the solution increased, thus indicating an inverse relationship between the two. Nevertheless, in the conducted experiments, it was found that a solution with a molarity of 0.25 achieved the most cost-effective aluminium removal from the bottom ash. This particular solution was considered the most sustainable choice due to the minimal usage of sodium hydroxide for essentially the same release of H_2 gas.

Overall, the compressive strength of concrete mixes declined with the addition of the bottom ash, compared to Ref(N). However, this decline was less noticeable when treated bottom ash was added at a relatively low percentage of replacement (i.e. 20%). The treatment process led to a considerable release of hydrogen gas from the oxidization of aluminium, which prevented the formation of hydrogen bubbles in fresh concrete and, consequently, the expansion of specimens during the setting process. Nonetheless, MIBA showed lower reactivity (mostly coming from the waste glass fraction), resulting in a lower amount of pozzolanic reactions. Future trials involving concrete mixes over an extended period and more effectively processed MIBA will provide additional insight into how effectively the bottom ash may function as a mineral addition in concrete. Additionally, replacing natural aggregates with recycled ones led to lower strength, with the least performing mix having the highest bottom ash incorporation ratio with recycled aggregates.

REFERENCES

Allegrini, E., Vadenbo, C., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Environmental Management,* 151: 132-143. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.032

Carvalho, R., Silva, R. V., de Brito, J., & Pereira, M. F. C. (2021). Alkali activation of bottom ash from

municipal solid waste incineration: Optimization of NaOH- and Na $2SiO_3$-based activators. *Journal of Cleaner Production*, *291*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125930

Che Amat, R., Ismail, K. N., Ahmad, K. R., & Mohamad Ibrahim, N. (2020). Effects of metakoalin on municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash-cement composite. *Materials Science Forum*, *1010 MSF*, 653–658. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.653

Cudjoe, D., & Acquah, P. M. (2021). Environmental impact analysis of municipal solid waste incineration in African countries. *Chemosphere,* 265: 129186. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129186

EN 197-1. (2000). *Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements,* Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

EN-933-1. (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

EN-1097-6 (2013). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

EN 12390-3. (2001). EN 12390-3 (2001). Testing hardened concrete— part 3: compressive strength of test specimens. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

EN-12620. (2002). Aggregates for concrete, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

IEA. (2011). World Energy Outlook 2011. International Energy Agency (IEA). OECD/IEA, Paris.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of *solid waste management to 2050*. World Bank Publications.

Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2018). Combined economic and mechanical performance optimization of recycled aggregate concrete with high volume of fly ash. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(7). https://doi.org/10.3390/app8071189

Kurda, R., Silva, R. V., & de Brito, J. (2020). Incorporation of alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash in mortar and concrete: A critical review. *Materials,* 13(15): 1–24). https://doi.org/10.3390/ma13153428

Liu, Z., Liu, Z., & Li, X. (2006). Status and prospect of the application of municipal solid waste incineration in China. *Applied Thermal Engineering,* 26(11-12): 1193-1197. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.036

Luo, H., Cheng, Y., D. He, & Yang, E. H. (2019). *Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash, Science of Total Environment,* 668: 90-103. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.004

Mikulčić, H., Vujanović, M., Fidaros, D. K., Priesching, P., Minić, I., Tatschl, R., Duić, N., & Stefanović, G. (2012). The application of CFD modelling to support the reduction of CO_2 emissions in cement industry. *Energy*, *45*(1), 464–473. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.030

Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., & Evangelista, L. (2019). Reliability of the bond strength of recycled coarse aggregate concrete. In *fib symposium 2019: concrete-innovations in materials, design and structures* (p. 8). fib Krakow, Poland.

Poon, C., Shui, Z., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials,* 18: 461-468. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005

Ren, M., Lv, Z. Y., Xu, L., Lu, Q., Zhang, X., Yu, Y., Fan, Y., Gao, Y., Chen, J., & Zhang, H. (2020). Partitioning and removal behaviors of PCDD/Fs, PCBs and PCNs in a modern municipal solid waste incineration system. *Science of Total Environment*, 735 139134. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139134

Silva, P., & de Brito, J. (2013). Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler.*Advances in Concrete Construction*, 1(65). https://doi.org/10.12989/acc.2013.1.1.065

Silva, R. V., de Brito, J., Lynn, C. J., & Dhir, R. K. (2019). Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. In *Resources, Conservation and Recycling,* 140: 23–35.https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011

U.S.G. Survey. (2019). *U.S.G. Survey, Cement production worldwide from 1995 to 2020, USGS - Mineral Commodity Summaries 2021. (2021) 43., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140 (2019).*

United Nations. (2022). *United Nations. World Population Prospects 2022. Accessed 11 September 2023.*

WBCSD. (2018). *WBCSD. Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*.

Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, *35*(6), 1187–1194. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO PÓ DA PALHA DE CARNAÚBA COMO ADITIVO NATURAL NA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCEAS

Mariana Silva[a]; Marilia Oliveira[a]; Aline Nóbrega[b]; Raphale Malheiro[c]

[a] Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Brasil, mariana.12dantas@hotmail.com / marilia@ufersa.edu.br

[b] Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Brasil, alinefnobrega@hotmail.com

[c] CTAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

RESUMO

A impermeabilização da argamassa de revestimento é essencial para garantir a durabilidade e a integridade das estruturas na construção civil. Enquanto produtos químicos têm sido convencionalmente empregados para esse fim, a busca por alternativas naturais cresceu em resposta às preocupações ambientais e à necessidade de reduzir a dependência de substâncias sintéticas. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o pó da palha de carnaúba como aditivo natural para melhorar a impermeabilidade da argamassa. Para comprovar suas propriedades impermeabilizastes, realizou-se a preparação de uma argamassa na proporção em massa de 1:3 (uma parte de cimento para três partes de areia) com diferentes teores de adição de pó da palha de carnaúba: 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em relação a massa do cimento. Os resultados demonstraram que no estado fresco as argamassas com a incorporação do pó da palha de carnaúba exigiram mais água para obter a consistência padrão e no estado endurecido, houve um aumento da impermeabilidade das argamassas na medida em que se aumentava a quantidade adicionada, comprovando a ação hidrofugante do pó da palha de carnaúba, enquanto os valores da resistência à compressão diminuíram conforme o aumento do percentual de adição.

Palavras-chave: Carnaúba, Ação hidrofugante, Sustentabilidade, Durabilidade

1 INTRODUÇÃO

A argamassa é uma componente vital na construção civil, desempenhando um papel central na formação de revestimentos, contrapisos, assentamentos de tijolos e diversas outras aplicações. Sua função está além da estética, sendo fundamental para assegurar a integridade, durabilidade e funcionalidade das estruturas construídas. A infiltração de água e umidade nas camadas de argamassa pode resultar em problemas de degradação, corrosão de armaduras metálicas e manifestações patológicas que reduzem substancialmente a vida útil das edificações. Ultimamente vem crescendo a preocupação com a durabilidade das edificações, nesse contexto a impermeabilidade da argamassa surge como um aspecto a ser analisado para avaliar a sua aplicabilidade na execução do revestimento das edificações.

A carnaúba (Copernicia prunifera) é uma palmeira nativa do nordeste do Brasil, conhecida por suas diversas aplicações industriais e suas propriedades. Uma das partes valiosas dessa planta é a palha de carnaúba, que tem sido objeto de estudos e pesquisas devido às suas propriedades, como a sua capacidade de atuar como um aditivo impermeabilizante em materiais de construção. Diversas pesquisas têm se concentrado em explorar seu potencial na melhoria da impermeabilidade destes materiais, como argamassa e concreto. Coelho *et al*. (2010), por exemplo, conduziram estudos sobre as propriedades do concreto auto-adensável com a incorporação do pó da carnaúba e constatou que seu uso como aditivo impermeabilizante resultou em reduções significativas na permeabilidade do concreto, além de diminuir a profundidade da carbonatação.

Neste contexto, essa mesma eficácia e impacto positivo podem ser extrapolados para a argamassa. Ao explorar as propriedades impermeabilizantes do pó da palha de carnaúba e adicioná-lo à argamassa, espera-se que ocorram resultados semelhantes, melhorando a impermeabilidade da argamassa e, por consequência, sua capacidade de proteger as estruturas da penetração de umidade. Este artigo científico tem como objetivo explorar as propriedades impermeabilizantes do pó da palha de carnaúba quando adicionado à argamassa contribuindo assim para práticas mais sustentáveis na construção civil.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da A NBR 13529 (2013) define aditivo como sendo “Produto incorporado à argamassa em pequena quantidade, com o propósito de aprimorar uma ou várias de suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido”. As formulações dessas substâncias podem incluir componentes orgânicos ou inorgânicos, os quais são dispersos em um veículo que pode ser líquido, pastoso ou sólido, são eles: hidrofugante; incorporador de ar; retentor de água; polímero auxiliador de aderência; espessantes; acelerador/retardador de pega; fibras e pigmentos. O Quadro 1 apresenta a definição destes termos relacionados aos aditivos, segundo a NBR 13529 (2013).

Quadro 1 - Terminologias dos aditivos usados na formulação de argamassas (NBR 13529, 2013)

Tipos	Definições
Hidrofugante	Componente que reduz a capacidade da argamassa de absorver água através da capilaridade
Incorporador de ar	Aditivo que gera microbolhas de ar de forma uniforme na argamassa, diminuindo sua densidade e melhorando sua maleabilidade
Retentor de água	Substância que minimiza a evaporação e a exsudação de água da argamassa no estado fresco, conferindo-lhe a capacidade de reter água contra a sucção por substratos absorventes
Polímero auxiliador de aderência	Composto polimérico que aprimora as propriedades de aderência e deformação das argamassas
Espessantes	Aditivo que eleva a viscosidade das argamassas
Acelerador/ retardador de pega	Substância que modifica a velocidade de endurecimento do aglomerante
Fibras	Material de natureza sintética ou orgânica, fino e alongado, como filamentos
Pigmentos	Componente que altera a coloração da argamassa

Os aditivos impermeabilizantes operam de maneira eficiente nos poros dos materiais de construção, formando uma fina película higroscópica. Essa película atua como uma barreira física, repelindo a entrada de água e evitando que ela penetre nas estruturas. Além disso, esses aditivos têm a capacidade de tamponar superficialmente os poros, tornando-os menos propensos à absorção de água (Costa 2014).

2.2 CARNAÚBA

A espécie botânica Copernicia prunifera, popularmente conhecida como carnaubeira, é uma palmeira xerófita endêmica do Brasil, predominantemente encontrada na região Nordeste. Esta planta desempenha um papel fundamental na produção econômica de pó cerífero, matéria-prima essencial para a fabricação de cera. Os carnaubais prosperam principalmente nos vales de rios dos estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, embora também possam ser identificados em outras regiões, incluindo Maranhão, Bahia (especialmente no vale do São Francisco), Pernambuco e Paraíba. (Alves e Coelho 2006; D'Alva 2007).

A carnaúba é caracterizada por sua altura variável, geralmente entre 7 e 10 metros, mas podendo alcançar até 15 metros. Possui um tronco reto e cilíndrico com um diâmetro que varia de 15 a 25 centímetros. Essa espécie vegetal é comumente encontrada em áreas próximas a rios, preferindo solos argilosos e aluviais, que são típicos das margens fluviais. Além disso, tem a notável capacidade de resistir a alagamentos prolongados durante o período chuvoso e suporta altos níveis de salinidade. Destaca-se ainda por sua notável adaptação ao calor, suportando até 3.000 horas de exposição ao sol por ano (Alves e Coelho 2006).

“Uma carnaubeira madura produz entre 35 e 40 palhas por ano, sendo 28 a 32 palhas maduras, e 7 ou 8 novas, ainda não totalmente abertas. As palhas maduras produzem pó tipo B, ou pó preto. As palhas novas, ou fechadas, dão pó tipo A, ou pó de branco, conhecido por pó de olho, por ser obtido das palhas do olho da carnaubeira” (Câmara Setorial da Carnaúba 2009).

As palhas adultas, que são verdes, são separadas das palhas novas (olho). Durante o processo de secagem e batição da palha, é essencial manter uma separação adequada entre o pó da palha e o pó do olho para garantir a qualidade do produto. Qualquer contaminação entre o pó do olho e o pó da palha é considerada adulteração. O uso de secadores solares ajuda a produzir um pó cerífero com menos impurezas, após a secagem o processo começa removendo o pó ceroso, o qual é coletado por meio de uma máquina chamada derriçadeira. Esta máquina é equipada com palhetas vibratórias que, ao entrar em contato com as palhas, fazem o pó cair. A derriçadeira é alimentada por um motor de dois tempos e funciona com gasolina como combustível. O pó resultante da agitação é direcionado para uma lona plástica, de onde é posteriormente recolhido e armazenado em sacos de algodão para ser transportado posteriormente (Câmara Setorial da Carnaúba 2009).

O pó da palha da carnaúba é um material que tem sido objeto de estudo na busca por aditivos impermeabilizantes para materiais de construção. Este material, que é derivado da carnaúba, uma planta típica da região nordeste do Brasil, tem se mostrado promissor na melhoria das propriedades de argamassas e concretos em relação à resistência à penetração da água (Da Silva *et al.* 2016; Coelho *et al.* 2011).

A pesquisa sobre o pó da palha da carnaúba como aditivo impermeabilizante tem investigado sua eficácia na redução da absorção de água por capilaridade em materiais de construção, o que é crucial para evitar danos causados pela umidade e aumentar a vida útil das estruturas (Da Silva *et al.* 2016). Estudos têm avaliado a influência desse aditivo na permeabilidade e na carbonatação do concreto, sob diferentes condições ambientais e exposições (Mesquita *et al.* 2012).

O pó da palha da carnaúba, como mencionado anteriormente, mostra-se promissor não apenas devido às suas propriedades impermeabilizantes, mas também por ser um recurso renovável de origem vegetal (Alves *et al.* 2018). Isso significa que sua utilização na indústria da construção civil não apenas pode melhorar a durabilidade e a resistência à água dos materiais, mas também contribuir para a redução do uso de aditivos de origem sintética que podem ter impactos ambientais negativos.

Além disso, o estudo do pó da palha da carnaúba como aditivo impermeabilizante também lança luz sobre a importância da valorização de materiais regionais e tradicionais em diferentes contextos geográficos. O conhecimento das propriedades desse material e sua aplicação em tecnologias de construção podem beneficiar comunidades locais, especialmente aquelas que dependem do extrativismo da carnaúba como fonte de renda (Alves e Coelho 2006; D’Alva 2007).

2.3 USO DO PÓ DA PALHA DA CARNAÚBA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O uso do pó da carnaúba na construção civil tem sido investigado como uma alternativa promissora para melhorar as propriedades de materiais de construção, especialmente argamassas e concretos. Este aditivo de origem vegetal, derivado da carnaúba, uma planta nativa do nordeste brasileiro, tem demonstrado potencial na área da construção devido às suas propriedades impermeabilizantes e outras características benéficas.

A pesquisa sobre o uso do pó da carnaúba na construção civil tem se concentrado em várias frentes, incluindo a sua incorporação em argamassas para melhorar a resistência à penetração de água, o que é fundamental para a prevenção de danos causados pela umidade em edificações . Além disso, estudos realizados por Mesquita *et al*. (2012), avaliaram como a adição desse aditivo afeta a permeabilidade e a carbonatação do concreto em diferentes condições de exposição e ambientais.

Além das propriedades impermeabilizantes, o pó da carnaúba na construção civil também tem sido explorado em outros contextos. Da Silva *et al.* (2016) investigou sua utilização como um componente em tijolos de solo-cimento, onde atua como um impermeabilizante.

Além disso, o pó da carnaúba também pode ser incorporado a pasta de gesso, onde foram realizadas análises comparativas do seu desempenho em relação a outros impermeabilizantes de origem vegetal ou sintética, segundo o estudo de Gonçalves e Ferraz (2014).

A utilização do pó da carnaúba na construção civil não se limita apenas à sua capacidade impermeabilizante, mas também pode incluir a análise de seu impacto em outras propriedades dos materiais, como resistência mecânica, durabilidade e comportamento em diferentes condições de uso. Isso faz com que esse aditivo seja uma área de pesquisa multidisciplinar com potencial para influenciar positivamente a qualidade e a eficiência de construções em todo o mundo.

Uma das vantagens do uso do pó da carnaúba na construção civil é sua origem renovável e sustentável, uma vez que é obtido a partir de uma planta local. Isso está alinhado com a busca por soluções mais ecológicas e com menor impacto ambiental na indústria da construção. Além disso, o estudo desse aditivo também pode contribuir para o desenvolvimento econômico de regiões onde a carnaúba é uma cultura importante (Alves e Coelho 2006; D'Alva 2007).

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa foram: cimento Portland CP II F 32 (Cimento Portland, com adição de Filer calcário); areia quartzosa de rio, água proveniente do abastecimento da cidade de Mossoró/RN e pó de palha de carnaúba tipo A.

Para garantir que a areia atendesse aos requisitos de granulometria desejados, primeiramente, o material foi passado na peneira de malha com abertura de 4,75 milímetros e em seguida foi submetida ao ensaio de peneiramento para obter a sua distribuição granulométrica conforme a normalização ABNT NBR 17054 (2022).

O pó da palha de carnaúba, apresentado na Figura 1, foi adquirido beneficiado oriundo do Município de Itaiçaba/CE.

Figura 1 - Pó de palha de carnaúba tipo A

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparação e moldagem das argamassas

As argamassas foram preparadas utilizando o traço 1:3 (uma parte de cimento para três partes de areia) em massa, para tal procedimento foi utilizado 500 g de cimento e 1,5 kg de areia e adicionado o pó de palha de carnaúba tipo A em diferentes concentrações de: 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em relação a massa do cimento, após a mistura dos materiais secos foi adicionado a água e misturado manualmente com o auxílio de espátulas apresentado na Figura 2. Para verificar a trabalhabilidade das argamassas foi realizado o ensaio de consistência na mesa de consistência (flow table) conforme a ABNT NBR 13276 (2016) e verificado o espalhamento com a medição do diâmetro dentro do limite de 260 +/- 10 mm apresentados na Figura 3. Após o preparo, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 5 x 10 cm, para cada mistura. Submetidos a cura submersa durante o período de 28 dias.

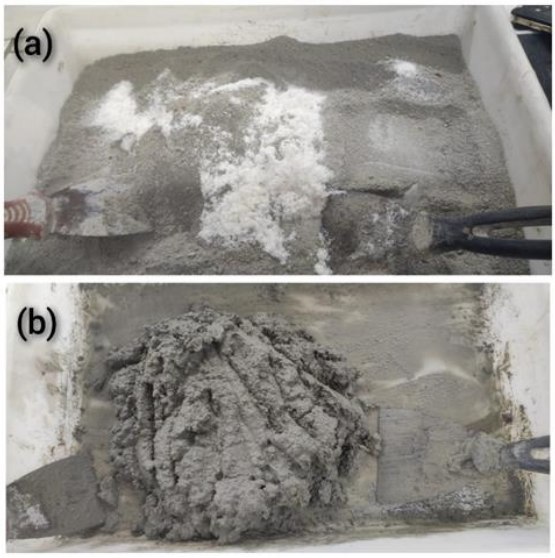


Figura 2 - (a) Mistura dos componentes secos; (b) Mistura após acréscimo da água

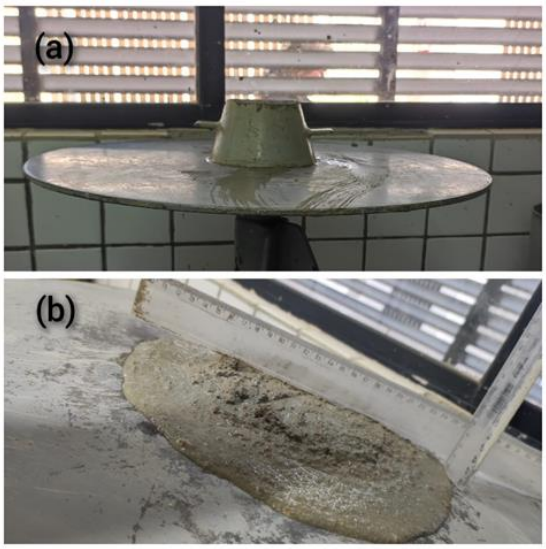


Figura 3 - Determinação da consistência. a) Moldagem; b) Medida do espalhamento

Com o objetivo de obter propriedades no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios:

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7215 (2019), em uma prensa universal da marca Emic.

3.2.3 Ensaio de absorção por capilaridade

O Ensaio de Absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a ABNT NBR 9779 (2012), para sua realização foram utilizados os corpos de prova de argamassa com a adição do pó da palha de carnaúba nas proporções de 0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%. No primeiro estágio do experimento, os corpos de prova foram submetidos a uma estufa com temperatura controlada de 105°C até que atingissem a estabilidade de massa. Em seguida, foram cuidadosamente posicionados em recipientes, de modo que a parte inferior de cada corpo de prova ficasse submersa a uma profundidade de 5 +/- 1 mm, para garantir um contato eficaz entre suas superfícies inferiores e a água foi inserido dois cabos flexíveis na base inferior dos corpos de prova como mostra a Figura 4. Foram feitas medições da massa dos CPs em intervalos de 3h, 6h, 24h e 72h, após 72 horas, os corpos de prova foram posicionados em uma prensa e submetidos à ruptura diametralmente para verificação visual da distribuição de água no seu interior.

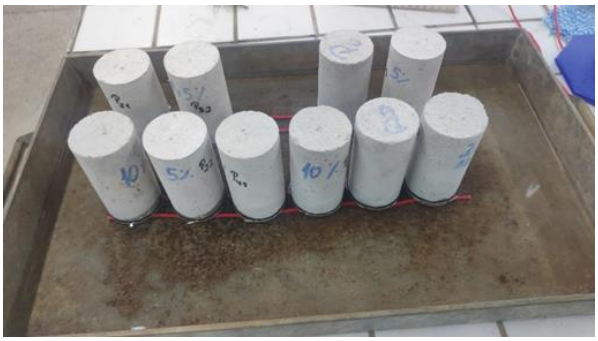


Figura 4 - Ensaio de absorção por capilaridade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO

Verifica-se a conformidade com os parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 17054 (2022), apresentando módulo de finura de 2,7 e diâmetro máximo de 4,75 mm. As quantidades de material que ficaram retidas em cada peneira durante o teste de granulometria são descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Porcentagens de material retido em cada peneira

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Porcentagem retida média	Porcentagem retida acumulada
	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B		
4,75	0,48	0,49	0,1	0,1	0,1	0,1
2,36	31,09	29,05	6,23	5,81	6,02	6,12
1,18	69,68	62,09	13,95	12,43	13,19	19,31
0,6	157,83	172,52	31,61	34,53	33,07	52,38
0,3	182,38	182,95	36,53	36,62	36,57	88,95
0,15	49,69	45,87	9,95	9,18	9,57	98,52
fundo	8,17	6,66	1,64	1,33	1,48	100
∑	499,32	499,63	100	100		

Para determinar as características físicas do agregado miúdo utilizado, determinou-se sua curva granulométrica apresentada Figura 5.

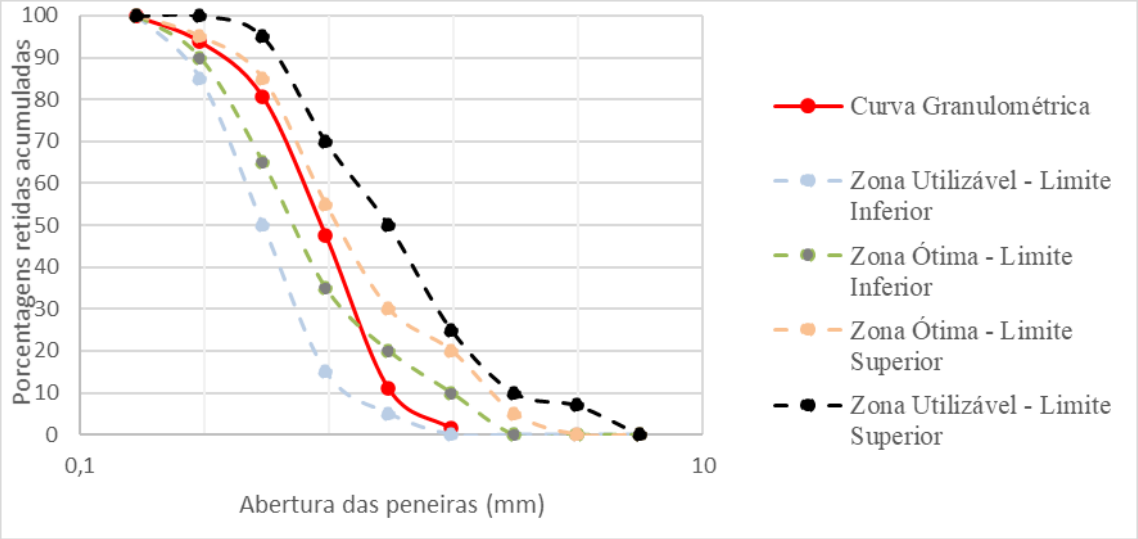


Figura 5 - Curva granulométrica da areia

4.2 CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS

Os resultados obtidos nos ensaios de consistências são apresentados Quadro 3. De acordo com os valores obtidos pode-se verificar que a quantidade de água demandada para a mistura aumentou a medida em que aumentou o percentual de adição do pó da palha de carnaúba e consequentemente a relação água/cimento para atingir o mesmo valor do espalhamento, ou seja a mesma trabalhabilidade.

Quadro 3 - Índice de consistência e relação água/cimento.

Pó da palha de carnaúba (%)	Cimento (g)	Areia (kg)	Água (ml)	Índice de consistência	Relação água/cimento
0	500	1,5	270	258	0,54
2,50			286	258	0,57
5			302	261	0,60
7,50			318	267	0,64
10			334	267	0,67

Observa-se no Quadro 3 um aumento de 23,7% na quantidade de água da argamassa quando comparada com o caso em que não houve adição de pó (0%) em relação à argamassa com 10% de adição de pó da palha de carnaúba. Esse aumento pode ser justificado pelo fato superfície específica do pó ser alta e demandar mais água na mistura para a mesma trabalhabilidade.

4.3 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para absorção por capilaridades das argamassas estudadas.

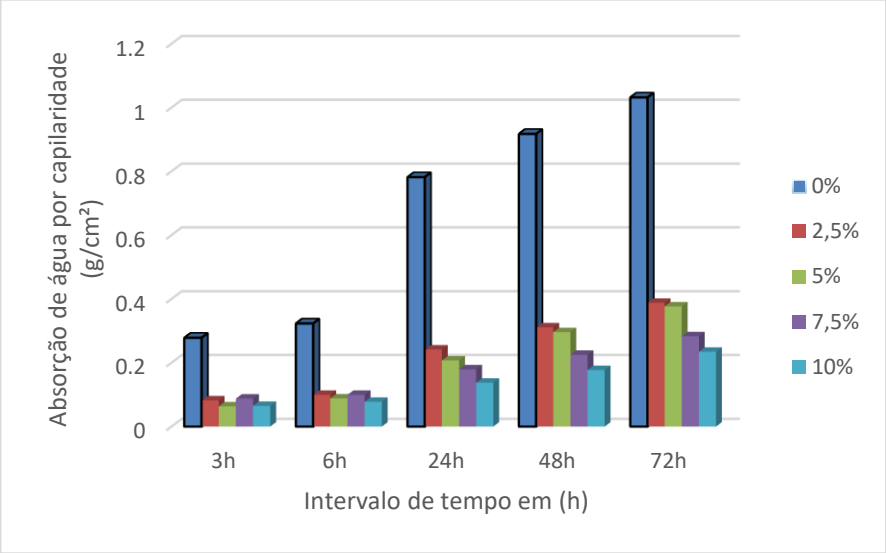


Figura 6 - Resultado do ensaio de absorção por capilaridade

A análise dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade revela que a média da absorção de água por capilaridade para os corpos de prova contendo 0% de pó de palha de carnaúba

demonstrou-se significativamente superior em comparação aos valores obtidos nas argamassas com 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de adição de pó, em todos os intervalos de tempo analisados. Além disso, observou-se que a taxa de absorção de água diminuiu à medida que o teor de pó de palha de carnaúba aumentava, especialmente nos intervalos de 24 horas, 48 horas e 72 horas. Esta redução na absorção se deve a capacidade hidrofugante do pó da palha da carnaúba. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos nos trabalhos de Da Silva *et al.* (2016) e Coelho *et al*. (2011) que perceberam reduções na absorção de água em tijolos de solo cimento e argamassas . A Figura 7 ilustra a distribuição de água no interior do corpo de prova.

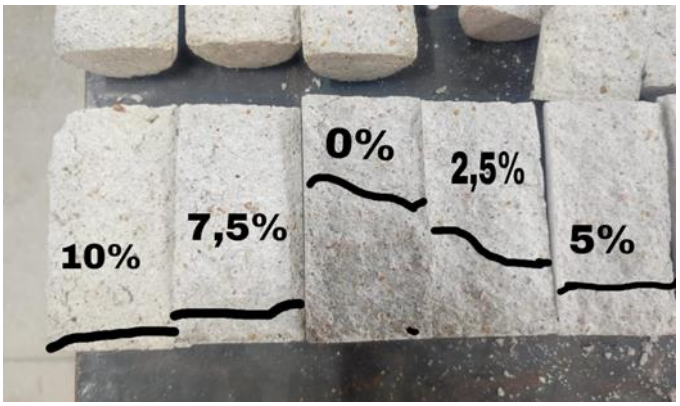


Figura 7 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova

O quadro 4 fornece a média da altura da absorção de água.

Quadro 4 - Análise visual da altura média de distribuição de água nos corpos de prova

Pó da palha da carnaúba (%)	**Altura Média (cm)**
0	6,7
2,50	4,5
5	2,5
7,50	0,9
10	0,5

Os resultados apresentados na Figura 6 e Quadro 4 demonstram claramente que, à medida que a porcentagem do pó foi aumentada, houve uma redução considerável na absorção de água pelos corpos de prova.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos a partir do ensaio de compressão simples das argamassas, que continham adições de pó de palha de carnaúba nas concentrações de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, estão representados graficamente na Figura 8.

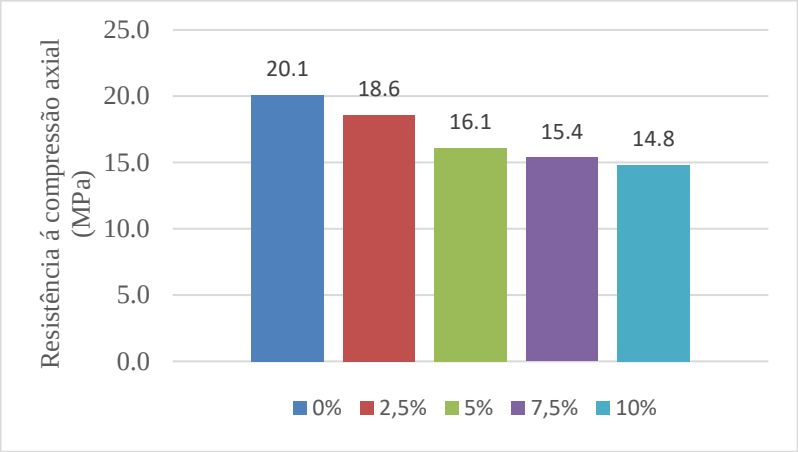


Figura 8 – Resistência média à compressão axial

Nota-se no Gráfico, à medida que a porcentagem de pó de palha de carnaúba aumentava, houve uma correspondente redução na resistência das argamassas. Esta tendência de diminuição na resistência em função do aumento da adição de pó de palha de carnaúba também foi corroborada pelos estudos conduzidos por Da Silva *et al*. (2016), no qual se observou uma queda nas resistências dos blocos de solo-cimento quando os percentuais de pó de palha de carnaúba atingiram 5% e 10%. O mesmo fenômeno foi verificado no trabalho de Gonçalves e Ferraz (2014), obtiveram uma diminuição na resistência à compressão de pastas de gesso quando o teor de pó de palha de carnaúba variou entre 1%, 5% e 10% %.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados discutidos anteriormente, a respeito do uso do pó da palha de carnaúba adicionado em argamassas de cimento Portland como aditivo impermeabilizante nas argamassas, conclui-se que:

- O aumento do teor de pó de carnaúba leva a uma maior quantidade de água para atingir a consistência padrão. Possivelmente o pó existente na mistura promoveu o aumento da superfície específica dos materiais secos, o que justificou a maior necessidade de água.

- A incorporação do pó da palha de carnaúba conferiu um aumento da impermeabilidade das argamassas na medida em que se aumentava a quantidade adicionada, consequência da ação hidrofugante do pó.

- Á medida que aumentou a porcentagem do pó de carnaúba na mistura, observou-se uma redução significativa na resistência à compressão axial.

REFERÊNCIAS

A carnaúba: preservação e sustentabilidade. / Câmara Setorial da Carnaúba.(2009) - Fortaleza: Câmara Setorial da Carnaúba.

Alves, M. O., Coelho, J. D. (2006). Tecnologia e relações de produção no extrativismo da carnaúba no nordeste brasileiro. 44º Congresso, 23-27 de julho de 2006, Fortaleza, Ceará, Brasil, Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER).

Alves, P. F. S., Moreira, S. A. F., Lopes, P. A. P., Kondo, M. Q. (2018) Cera de carnaúba como impermeabilizante e tamanho do torrão na determinação da densidade do solo. Cienc. Suelo (Argentina), v. 36, n. 2, p. 76-79.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13529. (2013) - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17054 (2022). Agregados - Determinação da composição granulométrica - métodos de ensaio. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276 (2016). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 (2019) Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779 (2012). Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro.

Coelho, F. C. A., Mesquita, E. F. T., Marques, A. S. (2010) Análise da Incorporação do Pó de Carnaubeira Sobre as Propriedades de Durabilidade do Concreto Autoadensável. 2010. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto.

Coelho, F. C. de A., Mesquita, E. F. T., Souza, L. do C., Silveira, M. V. (2011) Argamassa com incorporação do pó de Carnaubeira: análise da permeabilidade e carbonatação. In: Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto.

Costa, A. C. S. de S. (2014) Utilização de Aditivos à Base de Cacto em Argamassa de Cimento Portland. 54 páginas. Monografia - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró-RN.

D'Alva, O. A. (2007). O extrativismo da carnaúba no Ceará. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2007. 172 p. (Série BNB Teses e Dissertações, n. 4).

DA Silva, A. R. G., Diniz, M. J., Oliveira, M. P. (2016) Uso do pó da palha de carnaúba como impermeabilizante em tijolo de solo-cimento. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat), Nata l- RN, Brasil.

Gonçalves, I. C. M., Ferraz, A. de V (2014). Estudo comparativo do efeito de materiais impermeabilizantes e pigmentos de origem vegetal e de origem sintética na pasta de gesso. EVOLVERE SCIENTIA, v. 3, n. 1, p. 84-98.

Mesquita, E. F. T., Coelho, F. C. de A., Montenegro, I. N. S. (2012) Avaliação da carbonatação e da interface agregado-argamassa do concreto autoadensável com incorporação do pó de Carnaúba submetidos à condições aceleradas em câmara climática. In: Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PEGADA DE CARBONO DO CONCRETO PRODUZIDO A PARTIR DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO

Lorena Rodrigues Cunha[a]; Edna dos Santo Almeidas[a]; Lucas Sarmento Neves da Rocha[a]; Marianna Luna Sousa Rivetti[b]; Ana Lucia Santana Freitas Conceição[b]; Pedro Victor Correia e Reis[b]; Bruna Bueno Mariani[b]; Pedro Manoel Novaes Santos[c]

[a](Área de Meio Ambiente – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, nº 1845, 41650-010, Salvador, BA, Brasil), lorena.cunha@fbter.org.br, ednasa@fieb.org.br; lucas.sarmento@fieb.org.br,
[b](Área de Construção Civil – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, nº 1845, 41650-010, Salvador, BA, Brasil),marianna.rivetti@fieb.org.br,
[c](Grupo Civil, Rua Arthur de Azevedo Machado, nº 1225, 41760-000, Salvador, BA, Brasil), pedromanoel@civil.com.br.

RESUMO

Na indústria da construção civil as emissões significativas de gases de efeito estufa (GEE) contribuem para as alterações climáticas. O cimento, material de ligação principal que confere resistência a misturas convencionais de concreto, é responsável por emissões de dióxido de carbono (CO_2), que em média, representam entre 5% e 8% das emissões globais destes gases. Entretanto, a transição e manutenção de uma economia de baixo carbono demanda o desenvolvimento de estratégias para minimizar as emissões de GEE, a exemplo da incorporação de materiais residuais à produção de concreto. Assim, este estudo apresenta uma revisão das pesquisas realizadas até o momento para alcançar uma tecnologia de produção de concreto com emissões de carbono reduzidas a partir da incorporação de resíduos industriais. Para isto, foram analisados estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da produção de concreto a partir de resíduos para produção de concreto visando reduzir as emissões de GEE frente ao concreto convencional. O desenvolvimento de materiais cada vez mais sustentáveis, que apresentem redução de emissões de GEE ao longo do seu ciclo de vida, figura como uma alternativa relevante para mitigar os impactos ambientais associados a indústria da construção. As análises realizadas demonstraram potencial de redução da pegada de carbono entre 25 a 39% por 1 m^3 de concreto com a incorporação de resíduos como escória granulada de alto forno, pó de calcário e/ou cinzas volantes. Os resultados deste estudo apoiarão o desenvolvimento de estratégias para redução de GEE nas indústrias de construção civil.

Palavras-chave: Desempenho ambiental; ACV; Concreto; Resíduos industriais.

1 INTRODUÇÃO

A produção global anual de cimento Portland atingiu aproximadamente 3,3 bilhões de toneladas métricas (mt). Essa quantidade de cimento, quando consideradas as proporções típicas de mistura para o concreto comum, é incorporada em cerca de 27 bilhões de toneladas de concreto (IEA, 2022; USGS,2011). Esse volume demanda 22 bilhões de toneladas de agregados e 2,2 bilhões de toneladas de água doce, resultando em uma média global anual de consumo de aproximadamente 4 toneladas de concreto por pessoa. Esse ciclo de produção e consumo massivo de concreto tem um impacto ambiental significativo (Mehta,2014; Sacchi et al., 2022).

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da fabricação de cimento Portland são um dos principais desafios de sustentabilidade enfrentados pela indústria de concreto (Santos et al., 2022). Apesar dos avanços consideráveis em eficiência energética durante a fabricação do cimento, dados da indústria indicam que aproximadamente 866 kg de CO_2 são emitidos para cada 1000 kg de clínquer produzidos (Marceau et al., 2006; Zhang et al., 2021;). Aproximadamente 60% dessas emissões advêm da calcinação do calcário, a principal matéria-prima para a fabricação do clínquer de cimento Portland. Globalmente, as emissões anuais de CO_2 provenientes da fabricação de cimento somam quase 2,3 bilhões de toneladas, representando cerca de 7% das emissões globais resultantes da combustão de combustíveis fósseis (Bonen e Shah,2005; Moura et al., 2020).

A substituição parcial do cimento Portland por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) emerge como uma solução promissora na tentativa de mitigar esse impacto (Tomkins, 2009). Mehta (2010) apontou que essa substituição poderia resultar em uma economia anual de até 1 bilhão de toneladas de CO_2 se 50% do cimento Portland fosse substituído por alternativas de baixo carbono. Portanto, é necessária uma abordagem abrangente que envolva a diminuição do consumo de cimento em misturas de concreto, a redução do uso de concreto em novas estruturas e a redução do uso de clínquer na fabricação de cimentos. A substituição de metade do cimento Portland exigiria cerca de 1,7 bilhão de toneladas de materiais alternativos, como cinzas volantes de alto forno e pó de calcário (Malhotra,2002; Bruhn, 2023).

O pó de calcário, na forma de calcita, surge como um recurso amplamente disponível e promissor para essa substituição. Pesquisas recentes demonstraram que quantidades significativas desse material podem ser incorporadas com sucesso em misturas de baixa relação água-cimento para conservar cimento Portland (Mehta, 2006). Essa adição de calcário desempenha um papel crucial no processo de hidratação do cimento Portland, resultando em uma redução das emissões de CO_2 e melhorias na durabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto (Vasanth et al., 2021; Mehta, 2010). Além disso, o desenvolvimento de misturas de concreto auto-consolidantes com baixo teor de cimento, contendo cinzas volantes de alto forno e pó de calcário, apresenta-se como uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO_2 associadas à produção de concreto. Essas misturas, além de proporcionarem vantagens técnicas, também demonstram ser mais sustentáveis do ponto de vista ambiental (Bentz, 2009).

No entanto, para avaliar adequadamente o impacto ambiental dessas misturas, é essencial utilizar ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que levem em consideração todos os estágios do processo de produção de concreto, desde a extração de matérias-primas até o transporte dos materiais e produtos dentro do sistema (Bentz, 2010; Ho et al., 2020). Essa abordagem abrangente é fundamental para tomar decisões fundamentadas e promover práticas mais sustentáveis na indústria de concreto. O presente trabalho envolve a identificação de estudos de ACV a partir de uma revisão

de literatura com foco em pegada de carbono aplicada a concretos com a incorporação de materiais residuais. Essa abordagem permite identificar oportunidades específicas para otimizar processos, reduzir emissões decarbono e promover uma transição mais responsável e sustentável para o uso de recursos naturais.

2 METODOLOGIA

Para compilar a literatura disponível sobre concreto com incorporação de materiais residuais, foram feitas pesquisas por artigos acadêmicos nas bases de dados Science Direct, Scopus e SciELO. Na Scopus, utilizou-se a ferramenta Bibliometrix para executar a busca, permitindo a realização de análises bibliométricas com o objetivo de catalogar e analisar as produções acadêmicas relacionadas aos temas relevantes para este estudo. As palavras-chaves utilizadas foram "Cement", "Concrete", "Residue", waste "Carbon footprint" e "Life Cycle Assessment".

Os critérios de exclusão foram estabelecidos para garantir a relevância e a qualidade dos estudos selecionados. Estes critérios incluíram a remoção de trabalhos duplicados, artigos sem acesso completo e estudos que não abordassem diretamente a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com dados de pegada de carbono aplicados a materiais residuais incorporados ao concreto.

No total, foram recuperados 159 trabalhos no Science Direct, 38 na Scopus e 9 na Scielo. Após a aplicação dos critérios de exclusão, restaram 45 trabalhos na Science Direct, 20 na Scopus e 5 na Scielo, totalizando 70 trabalhos. Destes, foram avaliados os títulos e resumos de 30 trabalhos e selecionados apenas artigos científicos que abordassem estudos de ACV com dados de pegada de carbono aplicados a materiais residuais incorporados ao concreto. Foram selecionados 10 artigos para uma análise detalhada, com objetivo de identificar a unidade funcional, a extensão das fronteiras do estudo, os principais achados relativos à pegada de carbono e as limitações e/ou otimizações do concreto a partir dos materiais aplicados.

Com base na redução da pegada de carbono, os compostos cimentícios suplementares foram hierarquizados para determinar sua eficácia na diminuição das emissões de CO_2 equivalente. Esta hierarquização orienta a escolha dos materiais mais sustentáveis para a produção de concreto, priorizando os que oferecem maiores benefícios ambientais. Classificar e priorizar esses materiais permite maximizar a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo a sustentabilidade na construção civil e alinhando-se aos objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados dos estudos sobre ACV em materiais cimentícios.

Tabela 1. Estudos de Avaliação do ciclo de vida em materiais cimentícios

Referência	Resíduo incorporado	Unidade funcional	Extensão do sistema	Informações relevantes
Tait e Cheung, 2016	Cinzas volantes (FA) e escória granulada de alto forno (GGBS)	m^3de concreto	Berço ao portão	A adição de GGBS resultou em uma pegada de carbono de 127 kg CO_2 equivalente,uma redução de 63% em comparação com o cenário sem incorporação de materiais cimentícios. Já o cenário contendo FA apresentou uma pegada de carbono de 227 kg

Referência	Resíduo incorporado	Unidade funcional	Extensão do sistema	Informações relevantes
				CO_2 equivalente, correspondendo a uma redução de 33%.
Celik et al., 2015	Cinzas volantese calcário	m³de concreto	Berço ao portão	A substituição de até 75% do cimento Portland por cinzas volantes classe F e pó de calcário pode resultar em uma baixa pegada de carbono na produção de concreto a 1.82 kg CO_2 equivalente.
Teixeira et al., 2016	Cinzas volantesde biomassa ecinzas volantes de carvão	m³de concreto	Berço ao portão	O cenário em que 60% do cimento foi substituído por cinzas volantes de carvão apresentou o melhor desempenho ambiental em comparação ao concreto convencional, com uma redução de 25% na pegada de carbono.
Kurad et al., 2017	Cinzas volantes	m³de concreto	Berço ao portão	A substituição de parte do cimento por cinzas volantes, agregados naturais e agregados de concreto reciclado reduziu a pegada de carbono em até 39%.
Miller et al., 2016	Cinzas volantes(FA) e escória granulada dealto forno (GGBS)	m³de concreto	Berço ao portão	A mistura de concreto que apresentou o melhor desempenho ambiental, com 487 kg CO_2 equivalente, foi a que utilizou a segunda maior proporção de FA em relação ao cimento.
Cheng et al., 2024	Cinzas de fundo de incineração de resíduos sólidos urbanos de alto volumealto	m³de concreto	Berço ao portão	A pegada de carbono reduziu em até 54% quando a substituição do cimento por resíduos variou de 0% a 60%, resultando em uma diminuição de 411,5 kg CO_2equivalente para 190,6 kg CO_2 equivalente.
Rawaz et al., 2018	Agregados reciclados de concreto (ACR)	m³de concreto	Berço ao portão	Foi observada uma redução de até 8% da pegada de carbono ao incorporar 100% dos ACR na mistura de concreto.
Shahmansouri et al., 2021	Pozolana natural (NZ)	m³de concreto	Berço ao portão	A substituição de 20% de cimento Portland por NZ reduziu a pegada de carbono em até 69,7%, sugerindo que NZ tem potencial para produzir concreto sustentável.
Valipour et al., 2020	Zeólita natural	m³de concreto	Berço ao portão	A substituição de 10%, 20% e 30% do cimento por zeólita resultou em reduções na pegada de carbono de 60,3%, 69,7% e 64,3%, respectivamente.
Xing et al., 2023	Agregado reciclado (RA) e materiais cimentícios suplementares (MCS)	m³de concreto	Berço ao portão	O impacto ambiental do concreto com RA e MCS está relacionado à resistência à compressão e à relação água/aglomerante efetiva. As cinzas volantes apresentaram os cenários mais promissores de pegada de carbono 0,21 kg CO_2 equivalente (sem alocação).

Abordagens inovadoras, como o desenvolvimento de cimentos de baixo carbono, o uso de materiais reciclados na construção e a implementação de práticas construtivas energeticamente eficientes, desempenham um papel crucial na redução do impacto ambiental da indústria da construção (Teixeira et al., 2016). Os estudos sobre materiais cimentícios geralmente investigam o efeito da substituição parcial do cimento por adições na redução da poluição ambiental associada à produção de concreto, além de seus efeitos na microestrutura e nas propriedades mecânicas (Ho et al., 2021; Vasanth et al., 2021). Pesquisas como a conduzida por Tait e Cheung (2016), avaliaram a incorporação de cinzas

volantes (FA) e escória granulada de alto forno (GGBS) para reduzir os impactos ambientais na produção de concreto. Eles observaram que a mistura de concreto com FA reduziu as emissões de CO_2 equivalente em 33%, enquanto o GGBS alcançou uma redução de 65% em comparação com misturas sem adição de materiais cimentícios.

A literatura sobre materiais cimentícios destaca que a incorporação de escória granulada moída de alto-forno e cinzas volantes pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 22% e 14%, respectivamente, nas formulações de concreto (Flower e Sanjayan, 2007). Huntzinger e Eatmon (2009) investigaram o uso de pozolanas naturais em formulações de cimento Portland comum (OPC) e constataram uma redução de aproximadamente 22% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com o cimento tradicional. Esta análise comparativa dos resultados obtidos pela incorporação de resíduos industriais ao concreto demonstra que diferentes materiais cimentícios têm impactos variados na redução das emissões de gases de efeito estufa. A hierarquia desses materiais pode ser determinada pelos percentuais de redução alcançados e pela eficiência ambiental de suas formulações, destacando a importância de escolhas sustentáveis na construção civil.

O Quadro 1 apresenta a análise comparativa da redução de emissões de CO_2 equivalente por diferentes materiais cimentícios suplementares utilizados na produção de concreto sustentável. Esses materiais são essenciais para mitigar o impacto ambiental da indústria da construção, especialmente considerando a alta emissão de CO_2 associada à produção de OPC. As porcentagens são aproximadas e baseadas em estudos e pesquisas na área.

Quadro 1. Comparativo de Redução de Emissões por Materiais Cimentícios Suplementares

Material Cimentício Suplementar	Redução Média de Emissões de CO_2 equivalente	Hierarquia	Referência
GGBS (Escória de Alto Forno)	60% - 70%	1	Flower e Sanjayan, 2007; Bentz et al., 2010
FA (Cinzas Volantes)	30% - 40%	2	Celik et al., 2015; Xing et al., 2023
Pozolanas Naturais	20% - 30%	3	Meddah et al., 2023; Sanjuán et al., 2023
Resíduos de Agregados (RA)	10% - 20%	4	Toghroli et al., 2020; Turkoglu et al., 2023

A análise dos dados apresentados no Quadro 1 revela informações cruciais sobre a eficácia dos materiais cimentícios suplementares na redução das emissões de CO_2 equivalente na produção de concreto. Notavelmente, a escória de alto-forno (GGBS) demonstra o melhor desempenho ambiental, com uma redução média de emissões de 60% a 70% (Flower e Sanjayan, 2007; Tait e Cheung, 2016). Este resultado posiciona o GGBS como o material mais eficiente na mitigação do impacto ambiental em comparação aos outros avaliados (Bentz et al., 2010).

Em segundo lugar, as cinzas volantes (FA) apresentam uma redução média de emissões de 30% a 40% (Celik et al., 2015; Xing et al., 2023), mostrando-se como uma alternativa viável e eficaz para a redução das emissões de CO_2 na indústria da construção. As pozolanas naturais e os resíduos de agregados (RA)

também contribuem para a sustentabilidade ambiental, com reduções médias de emissões de 20% a 30% e 10% a 20%, respectivamente (Ho et al., 2021; Vasanth et al., 2021).

A hierarquia estabelecida neste estudo destaca a importância de considerar não apenas a redução absoluta das emissões de CO_2, mas também a eficiência relativa de cada material (Toghroli et al., 2020). A utilização de materiais como GGBS e FA pode não apenas reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, mas também promover práticas construtivas mais sustentáveis, uma vez que reduz o passivo ambiental da geração de resíduos, e alinhadas com os objetivos de mitigação das mudanças climáticas (Turkoglu et al., 2023).

Portanto, a escolha criteriosa de materiais cimentícios suplementares é fundamental para avançar em direção a uma construção mais sustentável e ecoeficiente, contribuindo para a preservação do meio ambiente e para a construção de um futuro mais sustentável para as gerações futuras (Turkoglu et al., 2023).

4 CONCLUSÕES

Os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresentados no presente trabalho destacaram a eficácia de diversos materiais cimentícios incorporados na redução da pegada de carbono do concreto. As análises realizadas revelaram que a substituição parcial do cimento Portland por cinzas volantes (FA), escória granulada de alto forno (GGBS), calcário, agregados reciclados e outros materiais suplementares pode resultar em significativas reduções das emissões de CO_2. Por exemplo, a adição de GGBS mostrou uma redução de 63% na pegada de carbono, enquanto a utilização de FA de carvão alcançou uma redução de 25%. Esses resultados destacam a importância de promover a utilização de materiais alternativos na produção de concreto, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas à construção civil. Assim, a adoção de práticas mais ecológicas, como a incorporação de materiais reciclados e suplementares, é essencial para enfrentar os desafios ambientais e promover a sustentabilidade na indústria da construção.

REFERÊNCIAS

Awoyera, P.; Perumal, P.; Ohenoja, K.; Iman, M. (2022). Upcycling CO2 for enhanced performance of recycled aggregate concrete and modeling of properties. In P. O. Awoyera, C. Thomas, M. S. Kirgiz (Eds.), *The Structural Integrity of Recycled Aggregate Concrete Produced with Fillers and Pozzolans* (pp. 349-364). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824105-9.00017-2

Bonen, D., & Shah, S. P. (2005). Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7, 14-26.

Bentz, D. P.; Irassar, E. F.; Bucher, B. E.; Weiss, J. (2009). Limestone Fillers Conserve Cement Part 1: An analysis based on Powers' model. *Concrete International*.

Bentz, D. P.; Irassar, E. F.; Bucher, B. E.; Weiss, W. J. (2010). Limestone Fillers Conserve Cement Part 2: Durability issues and the effects of limestone fineness on mixtures. *Concrete International*, December, 35-39.

Bruhn, S., Sacchi, R., Cimpan, C., & Birkved, M. (2023). Ten questions concerning prospective LCA for decision support for the built environment. *Building and Environment*, 242.

Celik, K., Meral, C., Gursel, A. P., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 56, 59-72. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003

Chen, X., Qiao, L., Zhao, R., Wu, J., Gao, J., Li, L., Chen, J., Wang, W., Galloni, M. G., & Scesa, F. M. (2023). Recent advances in photocatalysis on cement-based materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 109416.

Cheng, L., Jin, H., Liu, J., & Xing, F. (2024). A comprehensive assessment of green concrete incorporated with municipal solid waste incineration bottom: Experiments and life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 413. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134822

Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 282-288. https://doi.org/10.1007/s11367-007-0327-3

Habibi, M., Samet, B., El Hafiane, Y., & Smith, A. (2023). Synthesis and characterization of cement clinker based on Tunisian dam sediments. *Construction and Building Materials*, 394. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132254

Ho, H., Iizuka, A., & Shibata, E. (2021). Utilization of low-calcium fly ash via direct aqueous carbonation with a low-energy input: Determination of carbonation reaction and evaluation of the potential for CO2 sequestration and utilization. *Journal of Environmental Management*, 288. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112411

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17, 668-675.

Ige, O. (2021). A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129213.

Kurad, R., Silvestre, J. D., Brito, J. D., & Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485-502. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.236

Marceau, M. L., Nisbet, M. A., & Vangeem, M. G. (2009). Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture. Portland Cement Association (PCA), Skokie, IL.

Mehta, P. K. (2002). High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete. *Concrete International*, 24, 30-34.

Mehta, P. K., & Manmohan, D. (2006). Sustainable High-Performance Concrete Structures. *Concrete International*, 28, 37-42.

Mehta, P. K. (2010). Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change Era – A Review. In P. C. Zachar, T. R. Naik, & E. Ganjian (Eds.), *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies* (pp. 45-48). Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization, Italy.

Meddah, S., Al Owaisi, M., Abedi, M., & Hago, A. W. (2023). Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*, 393. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132098

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill, USA.

Miller, S. A., Monteiro, P. J. M., Ostertag, C. P., & Horvath, A. (2016). Concrete mixture proportioning for desired strength and reduced global warming potential. *Construction and Building Materials*, 128, 410-421. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.081

Moura, J., Pinheiro, I., & Rohden, A. (2018). Concreto permeável com incorporação de resíduos: uma revisão. *Revista de Estudos Ambientais*, 2020.

Kurda, R., Silvestre, J. D., & Brito, J. D. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 407-417. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004

Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V., & Luderer, G. (2022). Prospective Environmental Impact Assessment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160.

Sanjuán, M., Frías, M., Monasterio, M., García-Giménez, R., Vigil de la Villa, R., & Álamo, M. (2023). Volcanic ash from La Palma (Canary Islands, Spain) as Portland cement constituent. *Journal of Building Engineering*, 78. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107641

Santos, P. M. N., Lied, E. B., Trevisan, A. P., & Mprejon, C. F. M. (2022). Avaliação do potencial de reaproveitamento de resíduo industrial da produção de tio2 como agregado para fabricação de concreto. *13º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos*, São Paulo, Brasil.

Tait, M. W., & Cheung, W. M. (2016). A comparative cradle-to-gate cycle assessment of three concrete mix designs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 847-860. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1045-5

Tavares, C., Lucena, L. F. L., Henriques, G. F., Ferreira, R. L. S., & Anjos, M. A. S. (2022). Use of banana leaf ash as partial replacement of Portland cement in eco-friendly concretes. *Construction and Building Materials*, 346. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128467

Teixeira, E. R., Aires, R. M., Bragança, L., & Branco, F. C. (2016). Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2221-2230. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.

Toghroli, A., Mehrabi, P., Shariati, M., Trung, N. T., Jahandari, S., & Rasekh, H. (2020). Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers. *Construction and Building Materials*, 252. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118997

Tomkins, C. D. (2009). Redefining What's Possible for Clean Energy by 2020. In *Gigaton Throwdown*, San Francisco.

Turkoglu, M., Bayraktar, O. Y., Benli, A., & Kaplan, G. (2023). Effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the performance of one-part alkali-activated hybrid slag/clinker composites. *Journal of Building Engineering*, 68. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106164

USGS. (2011). Cement - Mineral Commodity Summaries. In *Cement Statistics and Information - Annual Publications*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Valipour, M., Yekkalar, M., Shekarchi, M., & Panahi, S. (2014). Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. *Journal of Cleaner Production*, 65, 418-423. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.055

Vasanth, S., & Muthuramalingam, T. (2021). Application of laser power diode on leather cutting and optimization for better environmental quality measures. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, 54. https://doi.org/10.1007/s43452-021-00208-4

WBCSD-CSI. (2009). Cement Industry Energy and CO2 Performance: "Getting the Numbers Right". Washington DC.

Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2023). Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 193. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106947

Zhang, X., Li, H., Harvey, J. T., Liang, X., & Jia, M. (2021). Purification effect on runoff pollution of porous concrete with nano-TiO2 photocatalytic coating. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103101.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CINZA DA FOLHA DE BAMBU COMO POZOLANA SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO DA HIDRATAÇÃO EM PASTAS CIMENTÍCIAS

Laura Ferreira Velasco[a]; Guilherme Chagas Cordeiro[b]

[a] (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brasil), laurafvelasco02@gmail.com

[b] (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, 28013-602, Campos dos Goytacazes, Brasil), gcc@uenf.br

RESUMO

A substituição parcial de cimento Portland por materiais alternativos surge como uma resposta eficaz, com vistas à transição para uma produção de cimento mais ecoeficiente. Neste contexto, este estudo objetivou avaliar a hidratação de pastas cimentícias contendo dois tipos de cinza da folha de bambu (CFB). Uma CFB foi produzida após um pré-tratamento das folhas por lixiviação em água a temperatura ambiente e outra após lixiviação ácida. As cinzas foram caracterizadas quanto à composição química, mineralogia, superfície específica e atividade pozolânica. Além da pasta de referência, misturas com 20% de substituição de cimento por cada CFB foram produzidas. Uma mistura com substituição de cimento por quartzo, material inerte, foi elaborada para discernir o efeito pozolânico das cinzas. A hidratação foi avaliada em ensaios de calorimetria isotérmica e retração química. Os resultados indicaram cinzas ricas em sílica amorfa, com elevada superfície específica e atividade pozolânica adequada ao emprego como material cimentício suplementar pozolânico. As pastas com adição de CFB exibiram aceleração na hidratação e maior retração química em comparação com a pasta de referência. Ademais, o efeito pozolânico das cinzas na hidratação foi avaliado, evidenciando que a alta reatividade desses materiais influencia significativamente a cinética de hidratação das pastas cimentícias.

Palavras-chave: Cinza da folha de bambu; Pozolana; Material cimentício suplementar; Pasta de cimento; Hidratação.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção está associado a uma série de processos que geram significativos impactos ambientais, que abrangem desde a extração de recursos naturais para a produção de materiais de construção até a considerável geração de resíduos (Yemal *et al*., 2011). Segundo o Instituto de Pesquisa Chatham House, a fabricação de cimento isoladamente contribui com aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (Lehne e Preston, 2018). Essas emissões de CO_2 resultam principalmente da utilização de combustíveis fósseis e da calcinação do calcário durante o processo de produção do clínquer. Portanto, torna-se essencial a implementação de novas tecnologias nos materiais de construção à base de cimento com vistas a mitigar os impactos gerados por esta indústria. Nesse contexto, a Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA) tem se empenhado em promover a descarbonização da indústria de cimento e concreto até 2050, alinhada com a agenda Net-Zero proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU). Uma das estratégias propostas consiste na redução do consumo de clínquer Portland por meio da incorporação de adições minerais (GCCA, 2021).

Nas últimas décadas, observa-se um aumento significativo no estudo da utilização de diversos materiais como substitutos parciais do cimento, em geral provenientes de subprodutos industriais ou agroindustriais, tais como cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa e cinza da casca de arroz. Especificamente em relação aos resíduos agroindustriais, a exploração desses materiais tem ganhado destaque no Brasil devido à considerável quantidade de resíduos gerados, como couro, cascas, bagaço e folhas. Conforme destacado por Tripathi *et al*. (2019), o Brasil produz anualmente um total de 451 megatoneladas de resíduos provenientes da agroindústria, posicionando o país como o quarto maior gerador mundial desses resíduos, precedido apenas por China, Estados Unidos e Índia.

Diferentes estudos têm identificado materiais pozolânicos provenientes dos resíduos gerados pela agroindústria, como a cinza da espiga de milho (Adesanya e Raheem, 2009), cinza do capim-elefante (Cordeiro e Sales, 2015), cinza da casca de arroz (James e Subba Rao, 1986), cinza do bagaço de cana (Cordeiro *et al*., 2016), cinza da palha de trigo (Memon *et al*., 2018) e cinza da folha de bambu (Dwivedi *et al*., 2006). Entretanto, uma das limitações associadas à utilização de subprodutos agroindustriais como pozolanas é a potencial presença de contaminantes, incluindo compostos cristalinos e carbonáceos. Além disso, é importante destacar a possibilidade de contaminação por compostos alcalinos, como óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O), conforme evidenciado por estudos anteriores (Krishnarao *et al*., 2001; Vayghan *et al*., 2013; Abebaw *et al*., 2021).

Para remover os compostos alcalinos dos materiais cimentícios suplementares, a técnica mais amplamente descrita na literatura é a lixiviação utilizando solução ácida (Krishnarao *et al*., 2001). O ácido dissocia os componentes alcalinos dos contaminantes, promovendo sua redução ou completa remoção. Diversos ácidos têm sido empregados na lixiviação de materiais pozolânicos, como ácido sulfúrico (Blanco *et al*., 2005), ácido clorídrico (Vayghan *et al*., 2013), ácido cítrico (Lima e Cordeiro, 2021) e até mesmo vinhoto (Almeida e Cordeiro, 2023), que é um efluente ácido. Além disso, alguns estudos têm realizado tratamento químico de lavagem utilizando água quente em capim-elefante (Cordeiro e Sales, 2015), palha de cana-de-açúcar (Cordeiro *et al*., 2017) e casca de arroz (Xu *et al*., 2018) para produzir cinzas pozolânicas altamente reativas. Nesses casos, o aumento da temperatura da água acelera a velocidade de dissolução dos óxidos contaminantes.

No contexto delineado acima, este estudo investigou a hidratação de pastas cimentícias contendo dois tipos diferentes de cinza da folha de bambu. A primeira cinza foi obtida após um pré-tratamento das folhas por lixiviação em água à temperatura ambiente, enquanto a segunda foi lixiviada com solução de ácido cítrico. As cinzas foram submetidas à caracterização quanto à composição química, perda ao fogo, mineralogia, área superficial específica BET e atividade pozolânica. A hidratação foi avaliada por

meio de ensaios de calorimetria isotérmica e retração química em quatro pastas distintas. Além da pasta de referência, foram produzidas misturas contendo 20% de substituição de cimento por cada tipo de cinza da folha de bambu. Adicionalmente, uma pasta com 20% de substituição de cimento por quartzo, um material inerte, foi caracterizada para fins de comparação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 COLETA DE FOLHAS DE BAMBU E PRODUÇÃO DAS CINZAS

Folhas de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* foram coletadas na cidade de Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil. Após a coleta, as folhas passaram por secagem ao ar por 24 h, seguida de secagem em estufa a 100°C por 12 h adicionais. O material foi, então, dividido em três amostras de aproximadamente 10 kg cada. A amostra 1 seguiu diretamente para a etapa de queima; a amostra 2 passou por tratamento químico preliminar, que consistiu em lixiviação em água deionizada à temperatura ambiente; e a amostra 3 também passou por tratamento de lixiviação em solução de ácido cítrico.

Os dois tratamentos foram realizados de forma semelhante, modificando apenas a solução de lixiviação. Os procedimentos de lixiviação foram similares ao adotado por Lima e Cordeiro (2021). Para a lixiviação com água, as folhas foram imersas em água deionizada à temperatura ambiente por 72 h, a uma relação de 2 L de água a cada 100 g de folhas. Analogamente, para a lixiviação ácida, as folhas foram imersas em solução de ácido cítrico anidro ($C_6H_8O_7$) a 0,25% em temperatura ambiente. A concentração de ácido foi definida a partir de um estudo experimental prévio (Velasco, 2023). Posteriormente, para a remoção do ácido, as amostras foram lavadas em água deionizada corrente até a neutralização.

Nesse ponto, é válido pontuar que, apesar da alta utilização de água para purificação da matéria-prima, o efluente da lixiviação possui elevada concentração de macronutrientes (K, Ca e S), devido à solubilização desses compostos durante o procedimento (Almeida e Cordeiro, 2023). Dessa forma, o efluente tem potencial para ser totalmente reaproveitado para fertirrigação no cultivo de outros produtos agrícolas, evitando os possíveis impactos ambientais relacionados ao uso de substâncias tóxicas para aumento de produtividade na lavoura (Dos Santos *et al.*, 2013).

Na sequência, as três amostras distintas de folhas de bambu (*in natura* e lixiviadas em água e em ácido) seguiram para a etapa de queima. Neste trabalho, optou-se por realizar a queima conjugada, conforme o procedimento definido por Andreão *et al*. (2019), que consiste na queima autógena seguida por uma queima posterior, em mufla. Para esse procedimento, foi utilizado um forno rudimentar (Andreão *et al*., 2019), que foi montado utilizando um tambor de aço revestido internamente por tijolos refratários. A segunda etapa de queima foi realizada em forno mufla, com taxa de aquecimento de 10 C/min e um patamar de queima de 600°C durante 3 h.

Por fim, as cinzas foram moídas de forma a obter um D_{50} próximo a 10 µm, conforme os procedimentos de Barbosa e Cordeiro (2021). Neste caso, a moagem foi realizada a seco em circuito aberto, utilizando um moinho de jarro Solab SL-34 com capacidade de 7,5 L, 7,5 kg de corpos moedores (esferas de alumina) e 290 g de material. A velocidade de rotação foi de 30 rpm. O tempo de moagem de ambas as cinzas lixiviadas foi de 30 min, enquanto a cinza *in natura* foi moída por 38 min. Após moagem, as cinzas lixiviadas com água deionizada e com ácido cítrico foram nomeadas de CFB*ag* e CFB*ac*, respectivamente, e a cinza *in natura*, identificada como CFB*in*.

2.2 MATERIAIS COMPLEMENTARES

Um quartzo ultrafino foi utilizado como adição mineral inerte nas pastas. O quartzo foi moído nas mesmas condições das cinzas, durante 315 min, até obter D_{50} próximo a 10 µm. Após a moagem, esse material foi denominado QTZ. Um cimento Portland CPP Classe G (ABNT, 2020) foi selecionado para a pesquisa por se tratar do cimento mais puro disponível no mercado brasileiro, uma vez que não possui adição mineral em sua composição. Um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico com massa específica e teor de sólidos iguais a 1210 kg/m³ e 28,9%, respectivamente, foi utilizado na produção das pastas.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A granulometria das adições minerais foi determinada em um analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer 3000, com acessório Hydro LV. A dispersão das partículas foi feita em água deionizada com agitação a 1500 rpm por 10 minutos. A composição de óxidos foi determinada pelo ensaio semi-quantitativo de espectroscopia de raios X, utilizando o equipamento Shimadzu EDX-720. A perda ao fogo foi determinada de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012). A mineralogia das cinzas e do quartzo foi identificada através da difratometria de raios X, com emprego de um difratômetro Rigaku Miniflex 600. Os dados foram coletados em ângulos entre 8 e 70°, passo angular de 0,02° e velocidade de rotação de 5°/min. A radiação utilizada foi de Cu k-α, com tensão de 40 kV e corrente de 15 mA. A superfície específica das cinzas e do quartzo, foi determinada pelo método BET a apartir de resultados de adsorção-dessorção de nitrogênio em equipamento ASAP 2020 da Micromeritics.

Para a determinação da atividade pozolânica das cinzas, dois métodos distintos foram utilizados: o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (método indireto) e o Chapelle modificado (método direto). O índice de desempenho foi obtido conforme as prescrições da NBR 5752 (ABNT, 2014a), em que são testadas à compressão uma argamassa de referência (sem adição mineral) e outra contendo 25% de cinza ou quartzo em substituição ao cimento Portland, ambas curadas a 28 dias. O índice de desempenho é calculado pela razão entre a resistência da argamassa contendo adição mineral e a de referência. A ruptura dos corpos de prova (5 cubos com 50 mm de aresta por mistura) foi feita em máquina universal servo-controlada Shimadzu UH-500kNI. A atividade pozolânica pelo método de Chapelle modificado foi determinada conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010). Por este método, a atividade pozolânica de um material é obtida de forma direta, por meio do teor de hidróxido de cálcio fixado por reação pozolânica em solução aquosa. O procedimento, de forma simplificada, consiste na mistura de 1 g do material analisado, 2 g de CaO e 250 mL de água, em um frasco Erlenmeyer, o qual é colocado em banho-maria sob constante agitação, por um período de 16 ± 1 h a uma temperatura de 90 ± 5°C. O resultado, obtido por titulação, é dado em função da quantidade, em miligramas, de $Ca(OH)_2$ fixado por grama de material em análise.

2.4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Para a avaliação da hidratação, 4 diferentes pastas foram confeccionadas. Uma pasta de referência (P-REF) foi produzida sem nenhum tipo de adição mineral. As demais foram confeccionadas com a utilização de materiais cimentícios suplementares, no teor de substituição de cimento de 20% em massa, e foram nomeadas como P-CFB*ag*, P-CFB*ac* e P-QTZ, de acordo com o mineral utilizado. As pastas foram produzidas com relação água-aglomerante fixa em 0,40 e foi utilizado aditivo superplastificante com teor ajustado para todas as misturas, visando manter uma consistência fixa (Kantro, 1980). Todas as pastas foram preparadas com um único procedimento de mistura, iniciado pela adição da água de aditivo superplastificante em um béquer de 250 mL. Em seguida, todo o

material sólido, homogeneizado, foi adicionado à parte líquida e, então, realizou-se a mistura manual por 30 s. Imediatamente após, uma mistura mecânica foi feita utilizando um misturador elétrico portátil Hamilton Beach, com velocidade baixa (260 rpm) por 30 s e velocidade alta (600 rpm) por mais 1 min.

O ensaio de calorimetria isotérmica foi realizado em um equipamento Calmetrix I-CAL 2000. Cerca de Aproximadamente 50 g de cada uma das pastas foi adicionada ao recipiente plástico e acoplada aos canais do calorímetro. As réplicas foram monitoradas por 72 h, com temperatura constante de 25 ± 0,1°C. A retração química, por sua vez, foi obtida pelo método empregado por Barbosa e Cordeiro (2021), adaptado da ASTM-C1608 (ASTM, 2017). Neste ensaio, aproximadamente 6 g de pasta foi adicionada a frascos de vidro, que, posteriormente, foram completados com água e vedados com uma rolha de borracha com orifício central. No orifício de cada rolha, foi introduzida uma pipeta graduada de 1 mL, preenchida com algumas gotas de óleo de parafina com corante vermelho. O monitoramento foi iniciado cerca de 110 min após o início da mistura, e foi realizado com registros fotográficos a cada 30 min durante 5 dias. O processamento das imagens para identificação da variação de volume nas pipetas foi feito a partir de uma rotina no programa computacional MatLab. Finalmente, a retração química foi calculada pela Equação 1. Cabe destacar que os ensaios foram realizados em triplicatas, para certificação do resultado.

$$R_{(t)} = \frac{h_{(t)} - h_{(i)}}{m_{cim}} \quad (1)$$

Considerando: $R_{(t)}$ - retração química no tempo t, em mL/g; $h_{(t)}$ - nível de água no tubo capilar no tempo t, em mL; $h_{(i)}$ - nível de água no tubo capilar ao início do ensaio, em mL; e m_{cim} - massa de material cimentício (g).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS ADIÇÕES MINERAIS

A moagem controlada das cinzas e do quartzo foi eficaz para promover uma distribuição de tamanho de partícula similar entre eles, como mostram as curvas granulométricas apresentadas na Figura 1. Todas as adições apresentaram D_{50} próximo a 10 µm (Tabela 1), que é um tamanho característico utilizado previamente para garantir a obtenção de materiais com pozolanicidade adequada e melhor empacotamento (Sensale, 2010; Calligaris *et al*., 2015; Barbosa e Cordeiro, 2021). Vale ressaltar que a similaridade de granulometria das adições minerais é de extrema importância para possibilitar a comparação das cinzas quanto à pozolanicidade e equiparar os efeitos físicos provocados pelas diferentes adições minerais nas misturas cimentícias (Cordeiro e Kurtis, 2017). As cinzas e o quartzo apresentaram, propositalmente, tamanhos de partícula menores do que o cimento utilizado na pesquisa, o que favorece a ação física das adições minerais.

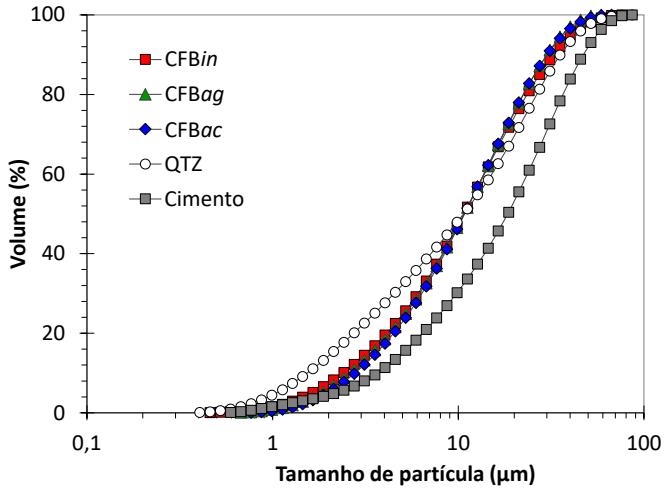


Figura 1 – Distribuição do tamanho de partículas das adições minerais e do cimento

Tabela 1 – Propriedades das adições minerais

Característica	CFB*in*	CFB*ag*	CFB*ac*	QTZ
D_{50} (µm)	10,7	10,	10,8	10,7
Superfície esp. BET (m^2/g)	10,4	33,5	86,9	0,95
Índice de desempenho (%)	127	126	128	70
Atividade Chapelle (mg/g)	958	1162	1133	38

A composição de óxidos e a perda ao fogo do quartzo e das cinzas estão apresentadas na Tabela 2.Os resultados mostraram que os pré tratamentos realizados possibilitaram a obtenção de cinzas distintas em comparação com a amostra *in natura* (CFB*in*). Na Tabela 2 é possível notar a presença expressiva de contaminantes na CFB*in*, que apresentou 17,6% de K_2O e 4,0% de SO_3, provavelmente provenientes do solo e que são típicos para esse tipo de cinza (Dwivedi *et al.*, 2006). A composição química das cinzas tratadas mostrou que, embora o ácido tenha proporcionado a eliminação do K_2O na CFB*ac*, com teor residual de 0,5%, a lixiviação com água deionizada à temperatura ambiente foi eficaz na dissolução do potássio, reduzindo significativamente o teor de K_2O para 3,0%. Também houve redução do teor de SO_3 para 2,1% na CFB*ag* e na CFB*ac*, mostrando que não houve diferença entre as cinzas tratadas com relação a esse importante óxido.

Tabela 2 – Composição de óxidos e perda ao fogo das adições minerais (%, em massa)

Composição	CFB*in*	CFB*ag*	CFB*ac*	QTZ
SiO_2	66,1	87,3	89,3	97,9
Fe_2O_3	0,2	0,2	0,2	0,1
CaO	6,5	5,1	5,1	0,1
SO_3	4,0	2,1	2,1	1,5
K_2O	17,6	3,0	0,5	0,2
MnO	0,1	0,1	–	–
Perda ao fogo	5,5	2,6	2,8	0,3

Conforme esperado, todas as cinzas apresentaram elevados teores de SiO_2. Entretanto, a CFB*in* não cumpriu com o requisito químico da NBR 12653 (ABNT, 2014b) quanto ao teor mínimo da soma de sílica, alumina e óxido de ferro (70%). Enquanto a CFB*in* apresentou 66,1% de SiO_2, para a CFB*ag* e a CFB*ac*, os teores de sílica foram de 87,3% e 89,3%, respectivamente. Esse aumento de sílica nas amostras tratadas foi atribuído à eliminação de contaminantes durante os processos de lixiviação

(Vayghan *et al*., 2013; Cordeiro *et al*., 2017). Vale ressaltar que houve pouca diferença no teor de sílica entre as cinzas tratadas, de apenas 2,0%. Todas as cinzas apresentaram um teor de CaO relativamente alto, também encontrado na literatura para outras cinzas de folha de bambu (Dwivedi *et al*., 2006; Frías *et al*., 2012; Abebaw *et al*., 2021). Em todas as cinzas, a perda ao fogo foi satisfatória de acordo com os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014b). Uma vez que essa característica pode ser controlada pela queima, os resultados indicaram que o procedimento de queima conjugada adotado foi adequado para eliminação de compostos carbonáceos. Vale destacar, ainda, que a perda ao fogo de 5,5% da CFB*in* foi reduzida para 2,6% e 2,8% na CFB*ag* e na CFB*ac*, respectivamente, indicando que os procedimentos de lixiviação contribuíram para a eficiência da queima. A composição química do quartzo revelou sua pureza, com aproximadamente 98% de sílica em sua composição e perda ao fogo quase nula.

Na Figura 2 estão apresentados os difratogramas de raios X das cinzas, que indicaram um comportamento predominantemente amorfo, caracterizado por halo de amorfismo entre os ângulos 15 e 30°. Esse halo é ainda mais pronunciado para CFB*ag* e CFB*ac*, devido ao aumento no teor de sílica amorfa consequente dos pré tratamentos. Não foi observada a presença de sílica cristalina (cristobalita) em nenhuma das cinzas, corroborando com as constatações de Lima e Cordeiro (2021) e Almeida e Cordeiro (2023) de que a temperatura na queima autógena não ultrapassa os 800°C, a partir da qual poderia ocorrer a cristalização da sílica (Cordeiro *et al*., 2009). A CFB*in* apresentou picos de sulfato de potássio e cloreto de potássio (silvina), confirmando o alto teor de K_2O observado na composição de óxidos (Tabela 2). Esses compostos não foram observados nos difratogramas da CFB*ag* e da CFB*ac*, visto que o potássio foi praticamente eliminado em ambos os processos de lixiviação, reduzindo ainda mais a baixa cristalinidade da cinza. Foi possível identificar picos de sulfato de cálcio (anidrita) na CFB*ag* e na CFB*ac*, também observados em cinzas de bagaço de cana tratadas com lixiviação ácida (Barbosa e Cordeiro, 2021; Almeida e Cordeiro, 2023).

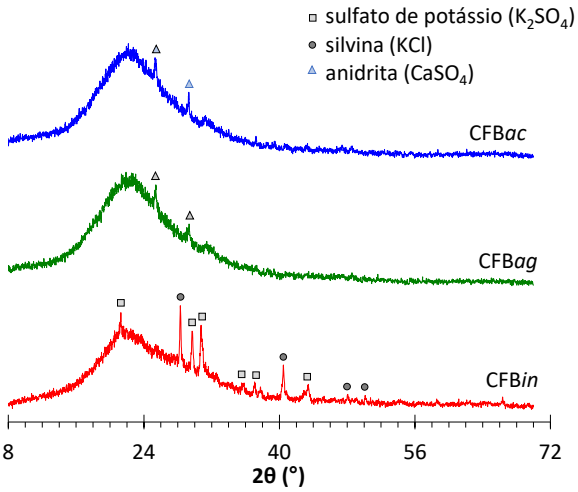


Figura 2 – Difratograma de raios X das três cinzas. Picos em unidade arbitrária

Os resultados de superfície específica BET estão apresentados na Tabela 1. Embora a granulometria das cinzas e do quartzo tenha sido similar, os valores de superfície específica BET foram significativamente distintos entre os materiais, indicando diferenças em sua porosidade. Como esperado, os tratamentos químicos aumentaram a superfície específica BET das cinzas, que variou de 10,4 m²/g na CFB*in* para 33,5 m²/g na CFB*ag* e 86,9 m²/g na CFB*ac*. O aumento na superfície específica está relacionado à remoção do K_2O, que ocorreu de forma quase total na CFB*ac*. Para a CFB*ag*, entretanto, a eliminação não foi completa, restando, ainda, um baixo teor desse composto (3,0%). Isso

explica a diferença de superfície específica entre as duas cinzas tratadas. Um resultado semelhante foi encontrado ao comparar os tratamentos de palha da cana de açúcar com lixiviação ácida e com lavagem em água quente (Cordeiro *et al*., 2017). O quartzo, por sua vez, mostrou superfície específica significativamente mais baixa que as cinzas, devido à ausência de porosidade em suas partículas.

Os resultados de atividade pozolânica obtidos pelos dois métodos de ensaio utilizados estão sumarizados na Tabela 1. Com relação às cinzas, o ensaio de índice de desempenho não mostrou diferenças significativas de atividade pozolânica entre elas, que apresentaram valores próximos, entre 126% e 128%, embora a CFB*ag* e CFB*ac* apresentem maior teor de SiO_2 e superfície específica superior à CFB*in*. Isso sugere que há um excesso de sílica reativa em todas as argamassas, inclusive aquela produzida com CFB*in*. Uma vez que a sílica presente nas cinzas é amorfa, é possível que todo o hidróxido de cálcio disponível nas argamassas tenha sido consumido ao se utilizar o teor de substituição estabelecido em norma (25% em massa). Isso motivou a escolha de um teor inferior (20%) para substituição nas pastas estudadas neste trabalho.

Os resultados de reatividade pelo método de Chapelle modificado reforçam a hipótese de haver excesso de sílica nas cinzas de bambu avaliadas nos ensaios mecânicos de atividade pozolânica. Ao contrário do índice mecânico, no teste de Chapelle modificado há saturação de cal. Assim, toda sílica disponível nas cinzas pode participar das reações pozolânicas. A CFB*ag* apresentou consumo de 1162 mg/g, que foi ligeiramente superior ao da CFB*ac* (1133 mg/g), demostrando pouca diferença de reatividade entre as duas cinzas tratadas. Ambas se mostraram mais reativas do que a CFB*in*, que apresentou consumo de 958 mg/g, o que indica a eficácia das duas formas de lixiviação no aumento da atividade pozolânica. Trabalhos anteriores também observaram aumento na atividade pozolânica de cinzas lixiviadas com ácido (Vayghan *et al*., 2013; Lima e Cordeiro, 2021) e cinzas lixiviadas com água (Cordeiro *et al*., 2017; Xu *et al*., 2018).

Os ensaios de atividade pozolânica confirmaram o caráter inerte do quartzo, com índice de desempenho de apenas 70%, o que indicou um efeito de diluição considerável devido à substituição de 25% de cimento (Cordeiro e Kurtis, 2017). A NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabelece um valor mínimo de índice de desempenho de 90% para um material pozolânico. No ensaio de Chapelle modificado, esse material apresentou um consumo insignificante de 38 mg/g. É importante destacar que a CFB*in* apresentou pozolanicidade satisfatória nas duas metodologias distintas utilizadas no trabalho e, a princípio, poderia ser utilizada em sistemas cimentícios. No entanto, os pré-tratamentos foram essenciais para ajustar a composição química das cinzas CFB*ag* e CFB*ac*, com redução dos altos teores de K_2O e SO_3, que podem contribuir com a formação de compostos hidratados expansivos em reações álcali-agregado e etringita tardia (Lawrence, 1998). Assim, o estudo de hidratação foi conduzido apenas com CFB*ag*, CFB*ac* e quartzo.

3.2 HIDRATAÇÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Os resultados de taxa de calor, calculados em função da massa de material cimentício, das pastas contendo 20% de adição mineral, em relação à referência, estão indicados na Figura 3. As misturas foram feitas fora do calorímetro e, portanto, o primeiro pico exotérmico, na fase de pré indução, não será discutido neste trabalho. Os gráficos nos detalhes i e ii na Figura 3 possibilitam uma melhor visualização do período de indução e do pico de taxa de calor associado à hidratação do silicato tricálcico (C_3S), respectivamente. Nas primeiras 6 h de hidratação (detalhe i no gráfico), P-CFB*ag* e P-CFB*ac* proporcionaram uma elevação na liberação de calor e um leve retardo na indução em comparação à P-REF, justificados pelo alto consumo de superplastificante nas pastas (Lima e Cordeiro, 2021).

Como mostra o detalhe ii na Figura 3, o efeito de nucleação heterogênea na P-CFB*ag* e na P-CFB*ac* foi responsável pelo aumento das taxas de calor no período de aceleração e pela antecipação da hidratação da hidratação do C_3S (Lothenbach *et al*., 2011). A antecipação do pico máximo de fluxo de calor da P-CFB*ag*, em relação à P-REF, foi de 2 h. Esse efeito foi ainda mais pronunciado para P-CFB*ac*, que alcançou a liberação máxima de calor cerca de 3 h antes da P-REF. Esse comportamento foi justificado pela maior superfície específica da CFB*ac*, que fornece mais sítios de nucleação. A redução na liberação de calor observada na P-QTZ em relação à P-REF foi causada pelo efeito de diluição, o que foi mostrado, também, em pesquisas anteriores (Barbosa e Cordeiro, 2021). A modificação na hidratação dos aluminatos foi evidente com a adição das cinzas de alta superfície específica às pastas cimentícias. Claramente, o pico relacionado à depleção do sulfato, caracterizado pelo ombro no período de desaceleração (indicado pelas setas no detalhe ii da Figura 3), ocorreu mais cedo na P-CFB*ac* e na P-CFB*ag* em relação à P-REF. Esse efeito também foi observado em pesquisas anteriores com substituição de cimento por cinza de casca de arroz (Cordeiro e Kurtis, 2017).

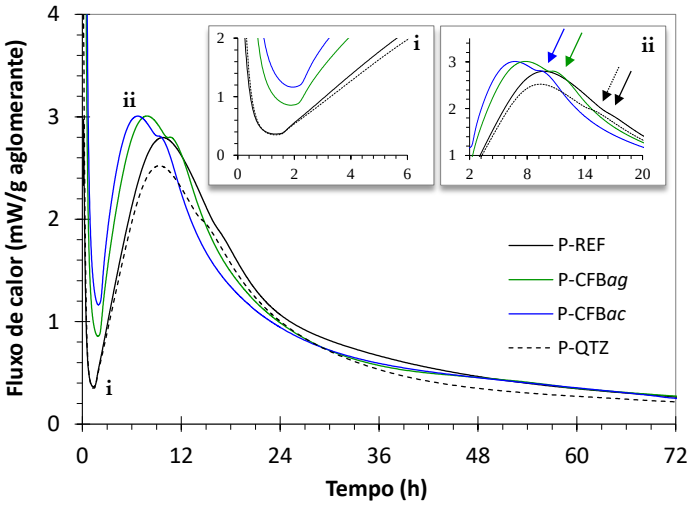


Figura 3 – Curvas de fluxo de calor das pastas produzidas

As curvas de retração química das pastas em função da massa de material cimentício até 120 h de hidratação estão apresentadas na Figura 4. Durante as primeiras 48 h de ensaio, P-QTZ apresentou retração similar a P-REF. Dessa forma, esse teste não possibilitou a identificação do efeito de diluição provocado pelas adições minerais nos primeiros dois dias. A partir desse tempo, a curva de retração da P-QTZ se mantém ligeiramente abaixo da P-REF, indicando a diminuição na retração da pasta devido à menor quantidade de cimento na mistura. Nas primeiras 25 h de hidratação, P-CFB*ag* e P-CFB*ac* apresentaram retração similar entre si e superior à P-REF. Uma vez que nas primeiras horas de hidratação ainda não é possível notar ação pozolânica significativa, o aumento na retração das pastas contendo CFB foi atribuído à nucleação heterogênea, dada a alta superfície específica das cinzas (Cordeiro e Kurtis, 2017). No entanto, após cerca de 25 h, a retração da P-CFB*ag* superou a observada para P-CFB*ac*, embora essa última contenha uma cinza de maior superfície específica. Uma vez que a amostra CFB*ag* foi a que apresentou maior atividade pozolânica, esse resultado corrobora com a constatação de Berodier e Scrivener (2014) de que, após certo tempo, os efeitos químicos começam a influenciar significativamente na hidratação.

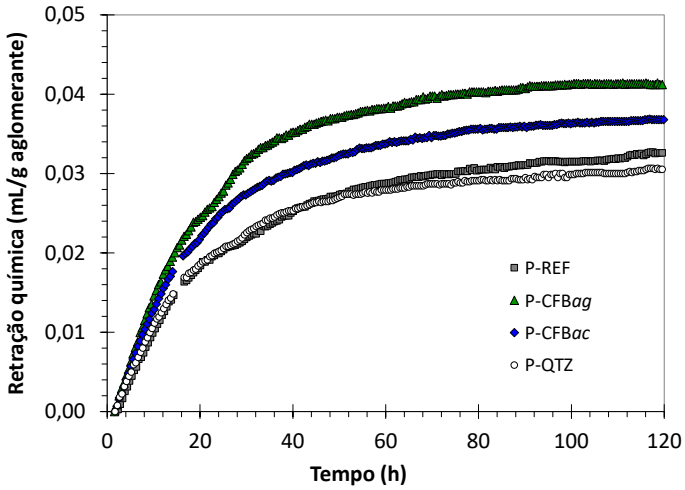


Figura 4 – Curvas de retração química das diferentes pastas

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, a seguintes conclusões foram obtidas:

• Os tratamentos de lixiviação adotados foram eficazes na produção de cinzas de folha de bambu de baixa contaminação, ricas em sílica e de alta reatividade. Foi possível perceber um aumento da atividade pozolânica nas cinzas lixiviadas em comparação com a *in natura*. Ambas as cinzas (CFB*ag* e CFB*ac*) apresentaram composições química e mineralógica similares, alta superfície específica e elevada reatividade;

• As cinzas de folha de bambu de alta superfície específica provocaram modificações na cinética de hidratação de pastas, com aumento no calor liberado e maior retração química, indicando um pronunciado efeito de nucleação heterogênea, suficiente para compensar a diluição provocada pela substituição de cimento., tornando-as aptas para aplicação em materiais cimentícios.

Estes resultados confirmam a eficácia do método de lixiviação com água em temperatura ambiente para ajustar a composição química e potencializar a reatividade da cinza da folha de bambu. Isso viabiliza um processo mais sustentável e econômico, já que não é preciso recorrer ao uso de ácido. Estudos adicionais são necessários para avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade ao utilizar cinzas em concretos. Ademais, é importante realizar uma análise de viabilidade econômica e energética do processo de produção das cinzas de folha de bambu a partir da lixiviação das folhas com água, da queima conjugada e da moagem controlada.

REFERÊNCIAS

Abebaw, G.; Bewket, B., Getahun, S. (2021). Experimental investigation on effect of partial replacement of cement with bamboo leaf ash on concrete property. Hindawi: Advances in Civil Engineering, 2021:1-9. https://doi.org/10.1155/2021/6468444

Adesanya, D.A., Raheem, A.A. (2009). Development of corn cob ash blended cement. Construction and Building Materials, 23:347-352. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.013

Almeida, R.P.A., Cordeiro, G.C. (2023). Sustainable approach to simultaneously improve the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash and the vinasse fertilization potential. Cleaner Engineering and Technology, 13:e100617. https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100617

American Society For Testing And Materials. (2023). ASTM C618-23e1: Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

Andreão, P.V., Suleiman, A.R., Cordeiro, G.C., Nehdi, M.L. (2019). Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. Green Materials, 7:61-70. https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00016

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014a). NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). NBR 9831: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014b). NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). NBR 15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, Brasil.

Barbosa, F.L., Cordeiro, G.C. (2021). Partial cement replacement by different sugar cane bagasse ashes: Hydration-related properties, compressive strength and autogenous shrinkage. Construction and Building Materials, 272: e121625. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121625

Berodier, E., Scrivener, K. (2014). Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. Journal of the American Ceramic Society, 97(12): 3764-3773. https://doi.org/10.1111/jace.13177

Blanco, F., Garcia, M.P., Ayala, J. (2005). Variation in fly ash properties with milling and acid leaching. Fuel, 84(1):89-96. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.05.010

Calligaris, G.A., Franco, M.K.K.D., Aldrige, L.P., Rodrigues, M.S., Beraldo, A.L., Yokaichiya, F., Turrillas, X., Cardoso, L.P. Assessing the pozzolanic activity of cements with added sugar cane straw ash by synchrotron X-ray diffraction and Rietveld analysis. Construction and Building Materials, 98:44-50. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.103

Cordeiro, G.C., Kurtis, K.E. (2017). Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. Cement and Concrete Research, 97:41-49. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008

Cordeiro, G.C., Sales, C.P. (2015). Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. Cement & Concrete Composites, 55:331–336. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.019

Cordeiro, G.C., Tavares, L.M., Toledo Filho, R.D. (2016). Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. Cement and Concrete Research, 89:269-275. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020

Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M.R. (2009). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. Construction and Building Materials, 23:3301-3303. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013

Cordeiro, G.C., Vieira, A.P. Lopes, E.S. (2017). Study on the pozzolanic activity of sugar cane straw ash produced using different pretreatments. Química Nova, 40:264-269. http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170002

David, N.L., Hassan, L.K. (2018). Physical and mechanical properties of cement mortar using lime and bamboo-ash as partial replacements. Malaysian Journal of Civil Engineering, 30(2): 254-268. https://doi.org/10.11113/mjce.v30.16028

dos Santos, J.D., da Silva, A.L.L., Costa, J.L., Scheidt, G.N., Novak, A.C., Sydney, E.B., Soccol, C.R. (2013). Development of a vinasse nutritive solution for hydroponics. Journal of Environmental Management, 114:8–12. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.045.

Dwivedi, V.N., Singh, N.P., Das, S.S., Singh, N.B. (2006). A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. International Journal of Physical Sciences, 1(3): 106-111.

Frías, M. Savastano, H., Villar-Cociña, E., Rojas, M.I.S., Santos, S. (2012). Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. Cement and Concrete Composites, 34(9):1019-1023. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.005

GCCA, Associação Global de Cimento e Concreto. (2021). Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf. Acesso em 3 mar. 2023.

James, J., Subba Rao, M. (1986). Reaction product of lime and silica from rice husk ash. Cement and Concrete Research, 16(1):67-73. https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90069-4

Kantro, D.L. (1980). Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. Cement, Concrete and Aggregates, 2:95-102. https://doi.org/10.1520/CCA10190J

Krishnarao, R.V., Subrahmanyam, J., Kumar, T.J. (2001). Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. Journal of the European Ceramic Society, 21:99-104. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00170-9

Lawrence, C.D. (1998). The constitution and specification of Portland cements. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-075066256-7/50016-3. In: HEWLETT, C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4 ed. London: Elsevier Science & Technology, 131 193.

Lehne, J., Preston, F. (2021). Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. Disponível em: https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete. Acesso em 18 nov. 2021.

Lima, C.P.F., Cordeiro, G.C. (2021). Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. Cement, 4:e100007. https://doi.org/10.1016/j.cement.2021.100007

Lotenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011). Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, 41:1244-1256. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001

Memon, S.A., Wahid, I., Khan, M.K., Tanoli, M.A., Bimaganbetova, M. (2018). Environmentally friendly utilization of wheat straw ash in cement-based composites. Sustainability, 10(5):1-21. https://doi.org/10.3390/su10051322

Sensale, G.R. (2010). Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 32:718-725. https://10.1016/j.cemconcomp.2010.07.008

Tripathi, N., Hills, C.D., Singh, R.S., Atkinson, C.J. (2019). Biomass waste utilization in low-carbon products: harnessing a major potential resource. Nature NPJ: Climate and Atmospheric Science, 2(35):1-10. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5

Vayghan, A.G., Khaloo, A.R., Rajabipour, F. (2013). The effects of a hydrochloric acid pre-treatment on the physicochemical properties and pozzolanic performance of rice husk ash. Cement and Concrete Composites, 39:131-140. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.022

Velasco, L.F. (2023). Cinza pozolânica da folha de bambu: produção controlada e impactos na hidratação, resistência à compressão e durabilidade de sistemas cimentícios. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil.

Xu, W., Wei, J., Chen, J., Zhang, B., Xu, P., Ren, J., Yu, Q. (2018). Comparative study of water-leaching and acid-leaching pretreatment on the thermal stability and reactivity of biomass silica for viability as a pozzolanic additive in cement. Materials, 11(9):e1697. https://doi.org/10.3390/ma11091697

Yemal, J.A., Teixeira, N.O.V., Naas, I.A. (2011). Sustentabilidade na Construção Civil. In: International Workshop: Advances in Cleaner Production, São Paulo. Anais... São Paulo: Donald Huisingh *et al*. (Orgs.), 7p.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

GEOPOLÍMEROS FABRICADOS COM RESÍDUOS DE BAMBU: UMA ABORDAGEM ECOEFICIENTE PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

Ana Carolina Constâncio Trindade[a]; MobinaSadat SeyedSalehi[a]; Marzieh Kadivar[a,b]; Holmer Savastano Junior[a]

[a] Departamento de Engenharia de Biossistemas, Universidade de São Paulo (USP), Rua Duque de Caxias, 225, Pirassununga, SP, Brasil, holmersj@usp.br

[b] Bambuild Company, Pirassununga, SP, Brasil

RESUMO

Este estudo aborda a inclusão de resíduos de bambu como fonte de fibras e partículas naturais em compósitos geopoliméricos, com o objetivo de fomentar a sustentabilidade na indústria da construção. A partir de uma formulação convencional, os resíduos de bambu foram avaliados em comparação com resíduos de construção e demolição (areia reciclada). Os resíduos foram incorporados em diferentes proporções e submetidos a análises reológicas, mecânicas e de absorção de água. No geral, os resultados demonstraram que a adição de resíduos de bambu contribuiu para o aumento da resistência. Em particular, na compressão, os compósitos com bambu atingiram 43 MPa, enquanto os com areia reciclada alcançaram 49 MPa. Na flexão, os compósitos reforçados com fibras de bambu apresentaram resistência de 11 MPa, com deflexão 9 vezes maior em comparação ao outro material. No entanto, a presença de vazios nas amostras indica a necessidade de aprimoramento na distribuição desses resíduos, ressaltando a importância de considerar os efeitos da porosidade dos materiais de reforço. Esses achados evidenciam o potencial dos resíduos de construção e bambu como alternativas sustentáveis na fabricação de compósitos geopoliméricos, contribuindo para a redução do desperdício, a diversificação dos materiais de construção e o estímulo à economia circular.

Palavras-chave: geopolímeros, compósitos, bambu, areia reciclada, sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A busca por práticas construtivas sustentáveis tem impulsionado o interesse crescente no reaproveitamento de materiais, seja como componentes na composição cimentícia, como o uso de cinzas provenientes da agroindústria, ou como agentes de reforço, como resíduos de construção e demolição e fibras naturais, entre outros. Paralelamente, o desenvolvimento contínuo de novos materiais de construção visa reduzir a dependência de componentes cimentícios em favor de alternativas mais sustentáveis.

Os geopolímeros surgem como uma alternativa aos materiais cimentícios tradicionais, e podem oferecer benefícios significativos em termos de desempenho e sustentabilidade (Kriven *et al*., 2024). Estudos demonstram que a produção de concreto convencional resulta em emissões de CO_2 significativamente maiores do que a produção de materiais álcali-ativados e geopoliméricos (Provis e Bernal, 2014). No entanto, a transição desses materiais da pesquisa acadêmica para a indústria enfrenta desafios, como custos elevados e disponibilidade limitada de matéria-prima, o que restringe sua adoção em larga escala.

No setor de construção e demolição, uma variedade de materiais pode ser reaproveitada, promovendo a redução do desperdício e impulsionando a economia circular. Na agroindústria brasileira, abundam fontes naturais com potencial para integração à indústria da construção. Materiais como fibra de coco e fibra de sisal (dos Santos *et al*., 2021) emergem como alternativas viáveis para reforçar materiais geopoliméricos, apresentando propriedades mecânicas desejáveis e sendo biodegradáveis, renováveis e amplamente disponíveis. Além disso, outras fibras naturais, como fibra de abaca e fibra de curauá (Trindade *et al*., 2024), também se destacam como opções viáveis para o reforço de materiais de construção, contribuindo para a sustentabilidade do setor ao aproveitar recursos renováveis e de baixo impacto ambiental.

O bambu é reconhecido por sua sustentabilidade e versatilidade na indústria da construção, sendo frequentemente utilizado na produção de materiais, em razão de suas notáveis propriedades estruturais, o que inclui os compósitos geopoliméricos (Ribeiro *et al*., 2016). No entanto, a produção de produtos à base de bambu resulta na geração de resíduos, que representam uma oportunidade para explorar novas formas de reciclagem e aproveitamento, potencializando a sustentabilidade do bambu e seus subprodutos. A disponibilidade desses resíduos oferece uma vantagem significativa para a produção de compósitos geopoliméricos no Brasil, e outros materiais de construção sustentáveis, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e minimizando o impacto ambiental do descarte inadequado.

A integração desses materiais provenientes da agroindústria não apenas diversifica as opções de materiais disponíveis, mas também promove a sustentabilidade ambiental, o desenvolvimento econômico local e a redução da pegada de carbono da construção civil. Portanto, explorar o potencial desses recursos naturais pode contribuir significativamente para a promoção de práticas construtivas mais sustentáveis e resilientes no Brasil.

Diante desse contexto, esta pesquisa visa explorar as oportunidades e os desafios associados à utilização de resíduos de construção e demolição e resíduos de bambu em geopolímeros, destacando seus benefícios em termos de sustentabilidade e desempenho na construção civil, promovendo a adoção de práticas construtivas mais conscientes e ecologicamente responsáveis.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E PROCESSAMENTO

Para assegurar a consistência e possibilitar a comparação com estudos anteriores, o material geopolimérico foi sintetizado utilizando uma formulação padrão conhecida na literatura (Trindade *et al*., 2021). A composição é apresentada a seguir:

$$2NaOH•2SiO_2•10H_2O + 2SiO_2•Al_2O_3 \rightarrow Na_2O•Al_2O_3•4SiO_2•11H_2O \quad \text{(Equação 1)}$$

As razões molares utilizadas no design desta mistura geopolimérica e suas justificativas são:

- $SiO_2/Al_2O_3 = 4$: Proporciona a formação da rede tridimensional geopolimérica, garantindo boas propriedades mecânicas e elevada durabilidade.
- $H_2O/Na_2O = 11$: Controla a reatividade, proporciona alta fluidez e reduz a alcalinidade. A última é especialmente importante ao usar fibras naturais, evitando sua degradação e prolongando a vida útil do compósito.
- $Na_2O/SiO_2 = 0,25$: Promove a formação de cadeias e anéis de silicato, conferindo resistência e estabilidade térmica ao material.

A solução alcalina de silicato de sódio ($2NaOH•2SiO_2•10H_2O$) foi obtida diretamente da empresa Diatom (Mogi das Cruzes, SP, Brasil), enquanto o Metacaulim HP Ultra foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil (Jundiaí, SP, Brasil). A razão em massa entre a solução alcalina e o metacaulim (SA/MC) foi mantida em 1,71, conforme os parâmetros definidos na Equação 1. Um misturador IKA Eurostar 60 (Wilmington, NC, EUA), acoplado a uma lâmina do tipo dissolvente, foi utilizado para misturar a suspensão a uma taxa de cisalhamento de 2000 rpm por 10 minutos, garantindo o cisalhamento das partículas e uma alta reatividade da mistura.

Três tipos de reforço foram utilizados: (i) fibras de resíduos de bambu com 10-15 mm de comprimento, (ii) partículas de resíduos de bambu passantes por uma peneira com abertura máxima de 0,5 mm, e (iii) areia reciclada passante por uma peneira com abertura máxima de 0,5 mm. Os materiais são designados ao longo do texto da seguinte forma: GP-0, para indicar o geopolímero de referência sem reforço; GP-RBF-3%, para o compósito reforçado com 3% de fibras de resíduos de bambu; GP-RBP-3%, para o compósito reforçado com 3% de partículas de resíduos de bambu; e GP-AR-50%, para o compósito com 50% de areia reciclada.

Os resíduos de bambu foram reaproveitados do processamento dos colmos para a produção de placas pela empresa Bambuild (Pirassununga, SP, Brasil). Antes de serem transformados em placas, os colmos passam por etapas de corte, lixamento e adensamento, gerando uma considerável quantidade de resíduos. A areia reciclada foi obtida da empresa Multilix (Guarulhos, SP, Brasil), onde passou por um processo de coleta e triagem de resíduos de construção e demolição. A Figura 1 ilustra o processo de coleta e reaproveitamento desses resíduos.

Os resíduos de bambu foram adicionados em 3% em massa, enquanto a areia reciclada foi adicionada em 50% em massa da mistura total. Essa proporção garantiu que a reologia fosse similar entre os diferentes tipos de reforços, sem comprometer significativamente a fluidez da mistura. Os materiais foram incorporados na pasta fresca de geopolímero utilizando um misturador IKA 60 Eurostar, equipado com uma lâmina do tipo *propeller*, operando a 200 rpm por 2 min, assegurando sua dispersão adequada.

As misturas frescas foram vertidas em moldes de acrílico, especificamente projetados para atender às geometrias exigidas para testes de flexão e compressão. Após a moldagem, as misturas foram

uniformemente distribuídas por todo o volume dos moldes usando uma espátula. Para garantir a compactação ideal, foi aplicada vibração e uma placa superior foi utilizada para aplicar pressão. Para os testes de compressão, foram preparadas amostras cúbicas com dimensões de 40 mm de lado. Amostras prismáticas com dimensões de (40 x 15 x 140) mm^3 (largura x altura x comprimento) foram fabricadas para os testes de flexão. Para garantir a confiabilidade dos dados, pelo menos três amostras foram fabricadas para cada grupo. Uma vez selados, os moldes foram mantidos a 60°C por 24 h. Em seguida, as amostras foram removidas dos moldes e curadas em temperatura ambiente e condições de umidade por um período de 2 semanas antes dos testes. A Figura 2 apresenta imagens dos compósitos manufaturados para compressão e flexão.

Figura 1 – Processos de coleta e reaproveitamento de materiais: (i) areia reciclada proveniente de resíduos de construção e demolição e (ii) resíduos de bambu provenientes da fabricação de placas.

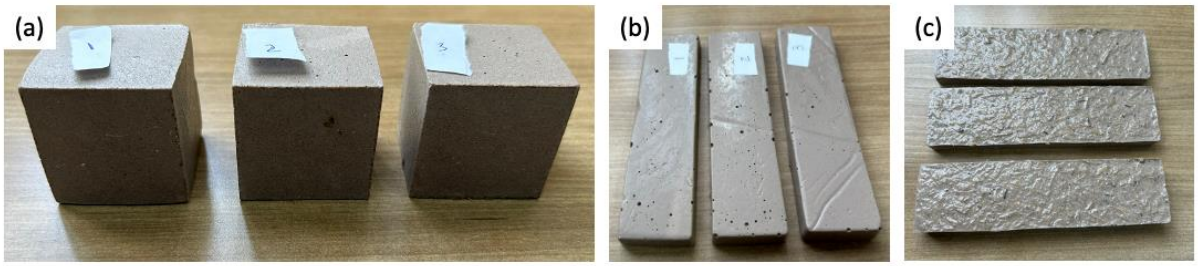


Figura 2 – Imagens dos compósitos geopoliméricos manufaturados para testes de (a) compressão e (b), (c) flexão, com e sem resíduos.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

A investigação experimental progrediu em etapas distintas: inicialmente, os materiais empregados na produção dos compósitos foram caracterizados; em seguida, procedeu-se à análise dos compósitos em seus estados fresco e endurecido; por último, foram examinadas as superfícies de fratura.

2.2.1 Difração de raios-X (DRX)

As estruturas amorfas e cristalinas dos materiais foram avaliadas por meio de um difratômetro de raios-X Rigaku Miniflex 600. A configuração experimental empregou a geometria Bragg-Brentano, operando dentro de uma faixa de 0–80°, com uma velocidade de varredura de 0,1°/min e um tamanho de passo de 0,02°. As varreduras foram realizadas com configurações padrão de 40 kV e 40 mA.

A difração de raios-X (DRX) também foi utilizada para avaliar o índice de cristalinidade (CrI) dos resíduos de bambu. Este foi calculado com os resultados de intensidade obtidos para as frações cristalinas e amorfas, de acordo com o método proposto por Salem *et al.*, 2023:

$$CrI = \frac{I_{200} - I_{Amorph}}{I_{200}} x100 \quad \text{(Equação 2)}$$

onde II_{200} a intensidade máxima da difração no plano (200) correspondente à celulose, e I_{Amorph} é a intensidade da difração a 18° de 2θ, geralmente amorfa respectivamente.

2.2.2 Espalhamento

Para avaliar o impacto da adição de resíduos em formato de partículas e fibras na fluidez e na retenção de forma dos compósitos geopoliméricos, foram conduzidos testes na mesa de abatimento dentro de um período máximo de 5 min após a conclusão do processo de mistura. Utilizando uma mesa de abatimento manual padrão, os testes seguiram as diretrizes especificadas na ASTM C230, onde 25 golpes foram aplicados em um período de 20 s, medindo então o diâmetro do espalhamento em duas direções, sendo o resultado a média dos dois valores obtidos.

2.2.3 Densidade e Absorção d'Água

Os valores de absorção d'água, densidade aparente e volume de vazios foram obtidos aos 14 dias de idade a partir dos corpos de prova testados à flexão, seguindo os procedimentos especificados na norma ASTM C 948. O procedimento incluiu a secagem inicial dos corpos de prova, seguida pela imersão em água por 24 h. Antes da imersão, os corpos de prova foram pesados, e após a imersão, foram removidos, secos superficialmente e pesados novamente para calcular a quantidade de água absorvida.

2.2.4 Resistência à compressão

Os testes de compressão foram conduzidos utilizando uma máquina universal de ensaios Instron, Modelo 23300R, equipada com uma célula de carga de capacidade máxima de 300 kN, conforme as diretrizes estabelecidas na norma ASTM C109. Amostras cúbicas, com dimensões de 40 mm de lado, foram preparadas e submetidas aos testes sem qualquer tratamento adicional além da secagem. A taxa de deslocamento foi mantida constante a 0,5 mm/min. A resistência à compressão (σ_c) foi calculada conforme a seguinte fórmula:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{(Equação 3)}$$

onde P corresponde à carga aplicada e A à área da seção transversal.

2.2.5 Resistência à flexão

Os testes de flexão foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Instron, Modelo 23300R, equipada com uma célula de carga de capacidade máxima de 30 kN. Utilizou-se um arranjo de 4 pontos, conforme preconizado pela norma ASTM C78, e as amostras foram dimensionadas em (40 x 15 x 140) mm^3 (largura x altura x comprimento). A distância entre os apoios finais foi mantida em 100 mm. A velocidade de deslocamento foi ajustada para 0,5 mm/min. Um deflectômetro foi empregado no centro do corpo de prova para a medição da deflexão. A resistência à flexão (σ_f) foi determinada através da seguinte equação:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2(wh^2)} \quad \text{(Equação 4)}$$

onde P corresponde à carga aplicada, L é a distância entre apoios, w é a largura e h a espessura do corpo de prova.

2.2.6 Superfícies de Fratura

Um microscópio eletrônico de bancada Hitachi, modelo TM3000, com uma voltagem de aceleração de 15 kV, foi utilizado para estudar a morfologia dos resíduos. Imagens obtidas por uma câmara fotográfica de alta resolução foram utilizadas para avaliar as superfícies de trincas e fraturas dos compósitos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.1 Caracterização dos resíduos de bambu

A Figura 3 exibe os difratogramas dos resíduos de bambu, evidenciando os picos cristalinos da celulose em 2θ = 15,5° e 22,4°, representativos dos planos (110) e (200) respectivamente. A partir desses picos, calculou-se o índice de cristalinidade dos resíduos de bambu, resultando em um valor de 66,7%. Este alto índice de cristalinidade indica uma estrutura bem-organizada, conferindo à fibra alta resistência à tração e rigidez, assim como excelente estabilidade térmica. Além disso, a alta cristalinidade contribui para a durabilidade da fibra, tornando-a mais resistente à umidade, ao desgaste e à degradação química, o que sugere um vasto potencial para aplicação em materiais geopoliméricos. No entanto, essa característica pode reduzir a ductilidade da fibra, tornando-a mais susceptível a fraturas sob cargas elevadas.

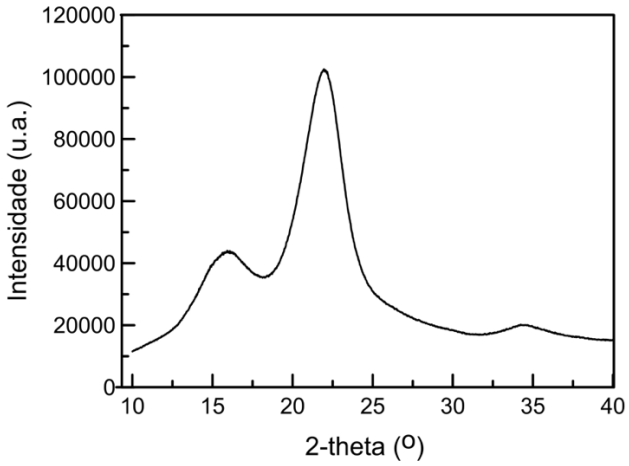


Figura 3 – Difratogramas de raios X dos resíduos de bambu.

A Figura 4 exibe imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, oferecendo uma visualização detalhada da forma e da estrutura dos resíduos de bambu utilizados. Na Figura 4(a), observa-se uma ampliação menor, na qual os filamentos não estão completamente separados, evidenciando a presença de conteúdo de lignina (a parte não fibrosa do feixe de fibras) na superfície. É importante notar que, devido à natureza da estrutura do bambu, os filamentos tendem a se ligar uns aos outros, tornando desafiador separá-los completamente. Na Figura 4(b), também é possível identificar alguns filamentos superficiais danificados, embora em uma proporção reduzida em relação ao total. Esta observação é significativa, pois, em conjunto com o índice de cristalinidade calculado, sugere que os resíduos possuem uma estrutura mecânica robusta e resiliente.

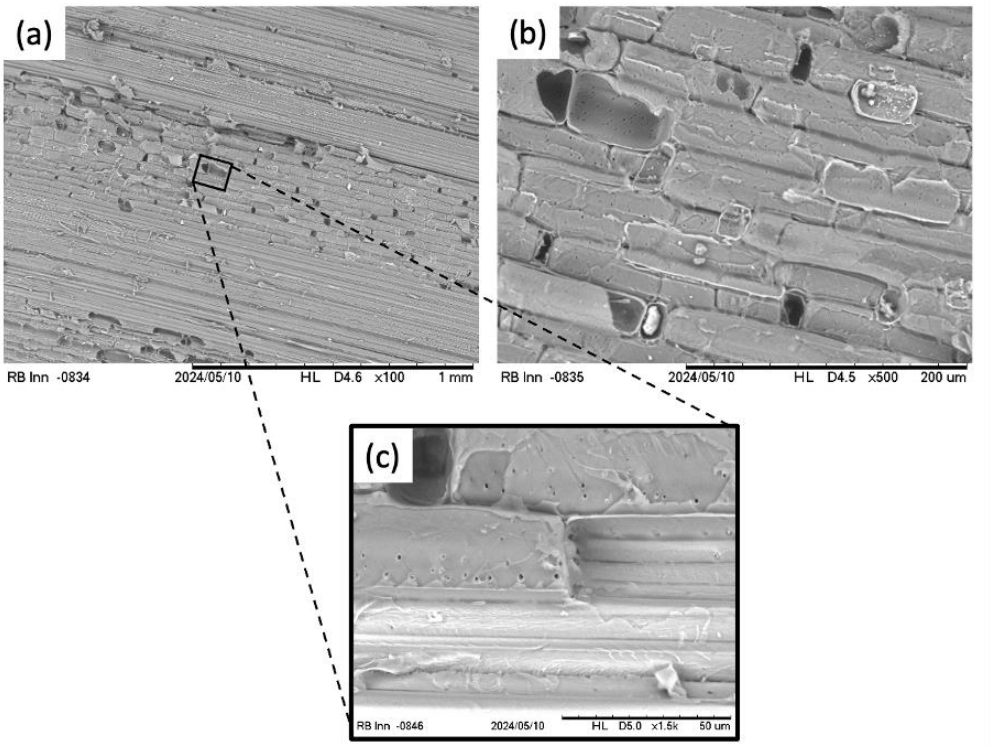


Figura 4 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura dos resíduos de bambu.

Adicionalmente, destaca-se a presença de uma estrutura altamente porosa nas fibras na Figura 4(c), visível em diferentes níveis de ampliação. A microporosidade das fibras de bambu oferece uma série de vantagens, como melhor adesão de resinas e propriedades térmicas e acústicas aprimoradas. No entanto, também apresenta desvantagens significativas, principalmente relacionadas à absorção excessiva de água, que pode levar à degradação e complicações no processo de fabricação de compósitos.

3.1.2 Propriedades no Estado Fresco

A Figura 5 apresenta os valores de espalhamento medidos para as diferentes formulações geopoliméricas. Os dados revelaram uma ligeira redução sistemática na fluidez da pasta fresca, começando com maior fluidez para o geopolímero sem reforço (GP-0), reduzindo em 12% para o geopolímero com resíduos de bambu (GP-RBF-3% e GP-RBP-3%) e 20% com areia reciclada (GP-AR-50%), alcançando um maior efeito de retenção de forma para este último. Essa diminuição pode ser atribuída a diversos fatores, como aumento do teor de sólidos, coesão aprimorada, aumento do atrito interno e obstrução localizada de partículas.

Com a adição de resíduos, observa-se uma diminuição na porção líquida relativa dentro da mistura fresca, em conjunto com a capacidade de absorção de líquidos do bambu, impactando sua capacidade de movimento irrestrito. Ao mesmo tempo, a interação entre a matriz geopolimérica completamente reagida e partículas de areia maiores e mais dispersas promoveu um arranjo de empacotamento progressivamente mais denso. Esse empacotamento, conforme descrito por modelos relevantes citados em estudos anteriores (Jones *et al.,* 2002), enfatiza o atrito entre as partículas e influencia a trabalhabilidade da pasta.

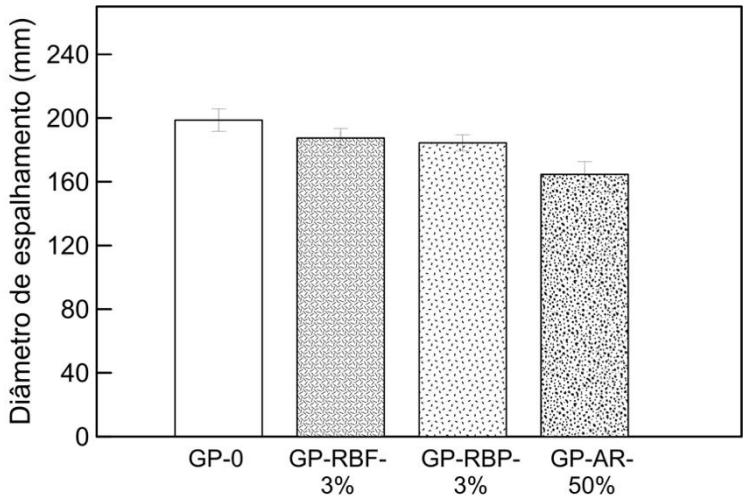


Figura 5 – Médias dos valores de espalhamento dos compósitos geopoliméricos: GP-0 (sem reforço), GP-RBF-3% (com 3% de fibras de resíduos de bambu), GP-RBP-3% (com 3% de partículas de resíduos de bambu) e GP-AR-50% (com 50% de areia reciclada).

É importante mencionar que o geopolímero apresenta comportamento tixotrópico, ou seja, sua viscosidade diminui sob tensão e aumenta quando a tensão é removida (Brandvold *et al.*, 2023). Essa característica contribui para a retenção de forma observada nas formulações com menor fluidez. Na fabricação de compostos, esse comportamento tixotrópico é especialmente útil, pois permite que a pasta fresca flua e se molde sob aplicação de força, mas que mantenha a forma e a estabilidade após o alívio da tensão, facilitando o processo de moldagem e melhorando a qualidade do produto final.

3.1.3 Propriedades no Estado Endurecido

O Quadro 1 e a Figura 6 destacam os resultados de resistência e as curvas representativas dos testes de compressão e flexão para os diferentes compósitos geopoliméricos. As linhas contínuas em preto representam o material de referência sem reforço (GP-0), enquanto as linhas tracejadas em preto representam o material reforçado com areia reciclada (GP-AR-50%). As linhas azuis representam os materiais reforçados com resíduos de bambu, fibroso (GP-RBF-3%,) para as linhas em azul escuro, e particulado (GP-RBP-3%) para as linhas em azul claro.

A análise dos resultados de compressão revela diferentes comportamentos nos compósitos. O material geopolimérico de referência exibiu um comportamento frágil, manifestando uma falha abrupta ao alcançar uma média de 36 MPa em compressão. A incorporação de areia reciclada manteve esse padrão de falha, porém, registrou-se uma melhoria na resistência mecânica, alcançando uma média de 49 MPa. Isso sugere que os resíduos de construção e demolição foram eficazes na criação de mecanismos de desvio de trincas, conferindo ao compósito um comportamento semi-frágil, similar ao daqueles encontrados com chamotte e areia em pesquisas anteriores (Brandvold *et al.*, 2023).

Por outro lado, a adição de resíduos de bambu resultou em comportamentos distintos. A fibra de bambu aumentou a resistência em comparação com a referência, atingindo uma média de 43 MPa e exibindo uma queda gradual na capacidade resistente após o pico. Isso confere maior estabilidade ao compósito, assemelhando-se a resultados anteriores obtidos com fibras de abaca (Trindade *et al.,* 2024), as quais também foram capazes de melhorar o comportamento de geopolímeros em compressão. Essa melhoria é atribuída à capacidade das fibras de prevenir o fenômeno de *spalling*, comumente observado em testes desse tipo com geopolímeros não reforçados.

Por outro lado, a incorporação de partículas de resíduo de bambu resultou em um padrão de queda gradual semelhante após o pico de resistência, porém com valores de resistência consideravelmente inferiores, atingindo uma média de apenas 27 MPa, o valor mais baixo registrado. Uma possível explicação para essa diferença reside na menor rigidez das partículas de bambu em comparação com a areia reciclada, o que as torna menos eficazes como agente de reforço particulado.

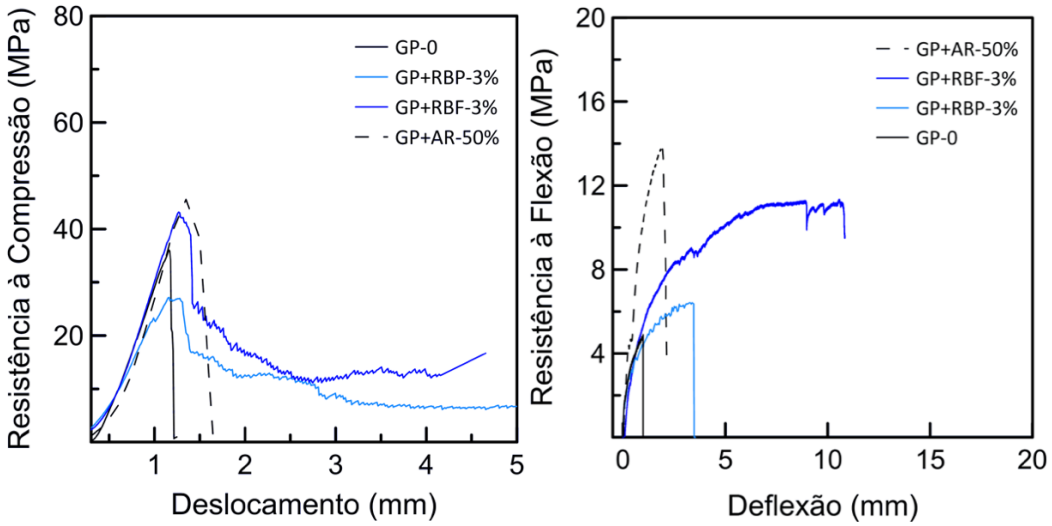


Figura 6 – Curvas representativas dos resultados dos ensaios de compressão e flexão e porosidade dos compósitos geopoliméricos: GP-0 (sem reforço), GP-RBF-3% (com 3% de fibras de resíduos de bambu), GP-RBP-3% (com 3% de partículas de resíduos de bambu) e GP-AR-50% (com 50% de areia reciclada).

Os resultados dos testes de flexão revelaram padrões semelhantes, onde o material de referência não reforçado mostrou apenas 4.9 MPa de resistência à flexão, com uma ruptura abrupta e uma deflexão mínima de apenas 0.9 mm. Em contraste, os compósitos reforçados demonstraram melhor desempenho. O compósito com reforço de areia reciclada registrou a maior resistência à flexão, alcançando 13.8 MPa, embora tenha apresentado apenas 1.5 mm de deflexão, reiterando seu comportamento semi-frágil. A inclusão de partículas de bambu resultou em um aumento ligeiro tanto na resistência à flexão quanto na capacidade de deformação, enquanto as fibras mostraram-se muito mais eficazes, com uma deflexão de 9.1 mm e resistência à flexão de 11.3 MPa. Isso sugere uma capacidade dúctil significativamente maior das fibras, permitindo a ponte de fissuras no compósito por um período considerável de carregamento, semelhante aos resultados observados com fibras de abaca em estudos anteriores (Trindade *et al.,* 2024). Esses resultados destacam as perspectivas promissoras para o aproveitamento dos resíduos de bambu.

O Quadro 1 oferece uma compilação dos dados de densidade aparente, absorção de água e volume de vazios para os diferentes compósitos geopoliméricos. Observa-se que o material sem reforço (GP-0) exibiu uma absorção de água ligeiramente superior àquele reforçado com areia reciclada (GP-AR-50%), mas significativamente inferior aos reforçados com resíduos de bambu (GP-RBF-3% e GP-RBP-3%). A estrutura compacta da areia reciclada pode explicar sua menor absorção de água, enquanto a porosidade natural dos resíduos de bambu favorece tal absorção, conforme indicado na Figura 4. A inclusão de bambu reduziu a densidade do geopolímero, enquanto a adição de areia reciclada a aumentou em comparação com seus pesos específicos individuais. Essa variação também contribuiu para uma melhoria na resistência à compressão, devido ao aumento da densidade proporcionada pela areia reciclada. É notável que os compósitos com fibras de bambu apresentaram um aumento no

volume de vazios, ressaltando a importância da distribuição adequada dessas fibras. Quando aglomeradas, as fibras criam áreas onde a matriz geopolimérica não preenche completamente o espaço entre elas, resultando em mais vazios. Esses vazios podem ser pontos de concentração de tensão, comprometendo a resistência e a durabilidade do compósito. O material com maior volume de vazios mostrou menor resistência mecânica e capacidade de deformação (GP-RBP-3%). Além disso, a presença de vazios pode facilitar a entrada de umidade, acelerando a degradação, o que merece uma investigação mais aprofundada em estudos futuros.

Ao comparar os resultados com os de matrizes semelhantes, mas com fibras longas unidirecionais (Trindade *et al.*, 2019), fica claro que a resistência à flexão encontrada com resíduos de bambu não foi tão alta quanto os resultados encontrados com reforços de sisal e curauá, que alcançaram até 33 MPa. Ainda assim, o compósito GP-AR-50% alcançou um resultado muito próximo ao da juta, com 15 MPa na flexão, o que parece ser uma opção correlacionada quando há necessidade de um compósito de fibra curta em aplicações similares.

Quadro 1 – Valores médios de resistência à compressão, flexão, deflexão máxima relativa, massa específica, absorção de água e volume de vazios dos compósitos geopoliméricos: GP-0 (sem reforço), GP-RBF-3% (com 3% de fibras de resíduos de bambu), GP-RBP-3% (com 3% de partículas de resíduos de bambu) e GP-AR-50% (com 50% de areia reciclada), desvio padrão entre parêntesis.

Compósito	Resistência à compressão (MPa)	Intervalo de Confiança (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Intervalo de Confiança (MPa)	Deflexão máxima relativa* (mm)	Massa específica (kg/m³)	Absorção de água (% em massa)	Volume de vazios (% em volume)
GP-0	36.1 (2.0)	31.7-40.6	4.9 (0.5)	4.2-5.4	0.9 (0.1)	1480 (40)	14,4	13,6
GP-RBF-3%	43.2 (1.3)	39.3-47.3	11.3 (0.8)	10.6-11.7	9.1 (0.5)	1390 (20)	28,4	30,3
GP-RBP-3%	27.0 (2.5)	20-33.5	6.4 (0.7)	5.8-7	3.4 (0.3)	1390 (30)	31,14	37,2
GP-AR-50%	48.7 (4.2)	39-56.7	13.8 (1.5)	13-14.2	1.5 (0.2)	2640 (50)	10,1	11,8

*refere-se à medida da quantidade de deformação que o material experimenta em relação ao ponto de maior resistência durante o teste de flexão.

3.1.4 Superfícies de Fratura

A Figura 7 exibe os padrões de fissuração dos compósitos, juntamente com suas seções transversais correspondentes nas superfícies de fratura sob flexão. Nas imagens, é evidente que o compósito sem reforço apresenta uma fissuração linear, sem desvios, enquanto o compósito com areia reciclada exibe uma formação de fissura mais irregular, destacando a capacidade das partículas de areia em permitir a deflexão das trincas, o que contribui para o aumento da resistência mecânica. Poucos vazios são observados nas seções transversais desses dois compósitos.

Por outro lado, o compósito reforçado com fibras de resíduos de bambu mostra um padrão de fissuração distinto, com evidências de “ponteamento" das fissuras pelas fibras, resultando em uma maior ductilidade do compósito. Múltiplas microfissuras são formadas ao longo da placa, algumas até difíceis de distinguir, facilitando a transferência de tensões e o aumento da capacidade mecânica. É importante ressaltar, no entanto, que ao observar a seção transversal desse compósito, é possível notar a segregação das fibras, já que estas são menos densas que o material geopolimérico. Estudos futuros podem explorar a combinação de dois ou mais tipos de reforço, como areia reciclada e resíduos

de bambu, visando alcançar um comportamento ainda mais favorável e ecoeficiente para a construção civil.

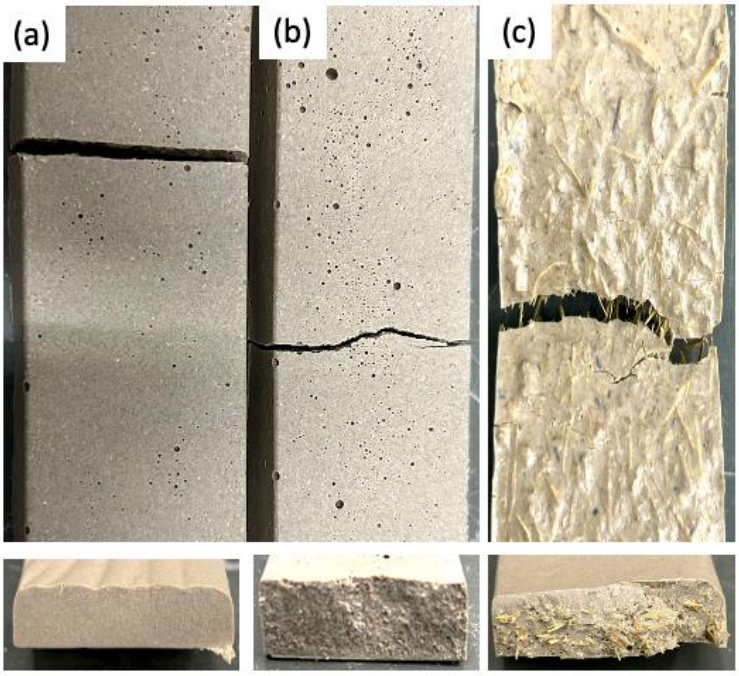


Figura 7 – Padrões de fissuração e superfícies de fratura dos compósitos geopoliméricos: GP-0 (sem reforço), GP-RBF-3% (com 3% de fibras de resíduos de bambu), GP-RBP-3% (com 3% de partículas de resíduos de bambu) e GP-AR-50% (com 50% de areia reciclada).

4 CONCLUSÕES

Este estudo estabeleceu um processo robusto e controlado para a fabricação de compósitos geopoliméricos reforçados com resíduos de bambu e areia reciclada. Por meio da caracterização dos materiais e da análise dos compósitos em seus estados fresco e endurecido, bem como da investigação das superfícies de fratura, foram obtidas informações importantes sobre o desempenho e as propriedades desses materiais inovadores.

Os resultados demonstraram que a inclusão de resíduos de bambu e areia reciclada teve um impacto significativo nas propriedades dos compósitos. Enquanto a areia reciclada contribuiu para uma maior resistência mecânica e uma menor absorção de água, os resíduos de bambu conferiram maior ductilidade e capacidade de deformação aos compósitos. Além disso, a análise das superfícies de fratura destacou os diferentes padrões de fissuração dos compósitos, ressaltando a importância da distribuição adequada das fibras de bambu e o potencial de combinação de diferentes tipos de reforço para otimizar o desempenho ecoeficiente desses materiais na construção civil.

Esses resultados oferecem uma base sólida para futuras investigações a fim de aprimorar ainda mais o desempenho e a sustentabilidade dos compósitos geopoliméricos reforçados com resíduos da agroindústria. Estudos adicionais de durabilidade são cruciais, assim como o desenvolvimento de métodos para o tratamento adequado dos resíduos. Além disso, a possibilidade de utilizar as cinzas destes como fonte reativa de sílica na produção dos compósitos oferece uma estratégia inovadora para reduzir o desperdício e melhorar a eficiência eco-sustentável dos materiais. Essas abordagens ampliam as possibilidades sustentáveis desses compósitos na construção civil.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado como parte do projeto Jovem Pesquisador, apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob o processo nº 2023/02750-9. Agradecemos também o financiamento adicional concedido à pesquisadora Dra. Trindade (Processo FAPESP nº 2023/11397-0) e à mestranda MobinaSadat SeyedSalehi (Processo FAPESP nº 2024/00112-8), cuja contribuição foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo. Agradecemos, ainda, à BAMBUILD pela doação dos resíduos de bambu e à Multilix pelo fornecimento dos agregados reciclados, materiais essenciais para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASTM C78/C78M-22, Standard Test Method For Flexural Strength Of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, www.astm.org.

ASTM C948-81, Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, www.astm.org.

ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org.

ASTM C230/C230M-20, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org.

Brandvold, A. S., Trindade, A. C. C., & Kriven, W. M. (2023). Rheological assessment of metakaolin-based geopolymer composites through squeeze flow. Journal of the American Ceramic Society, 106(7), 4038-4051.

Jones, M. R., Zheng, L., & Newlands, M. D. (2002). Comparison of particle packing models for proportioning concrete constitutents for minimum voids ratio. Materials and structures, 35, 301-309.

Kriven, W. M., Leonelli, C., Provis, J. L., Boccaccini, A. R., Attwell, C., Ducman, V. S., ... & Lombardi, J. E. (2024). Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution. Journal of the American Ceramic Society.

Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. Annual Review of Materials Research, 44, 299-327.

Ribeiro, R. A. S., Ribeiro, M. G. S., Sankar, K., & Kriven, W. M. (2016). Geopolymer-bamboo composite–A novel sustainable construction material. Construction and Building Materials, 123, 501-507.

Salem, K. S., Kasera, N. K., Rahman, M. A., Jameel, H., Habibi, Y., Eichhorn, S. J., ... & Lucia, L. A. (2023). Comparison and assessment of methods for cellulose crystallinity determination. Chemical Society Reviews.

dos Santos, G. Z. B., de Oliveira, D. P., de Almeida Melo Filho, J., & da Silva, N. M. (2021). Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. Journal of Building Engineering, 43, 102568.

Trindade, A. C. C., Borges, P. H. R., & Silva, F. D. A. (2019). Evaluation of fiber–matrix bond in the mechanical behavior of geopolymer composites reinforced with natural fibers. Advances in Civil Engineering Materials, 8(3), 361-375.

Trindade, A. C. C., de Andrade Silva, F., & Kriven, W. M. (2021). Mechanical behavior of K-geopolymers reinforced with silane-coated basalt fibers. Journal of the American Ceramic Society, 104(1), 437-447.

Trindade, A. C. C., Sood, S. S., Silva, D. D. C., Ozer, A., & Kriven, W. M. (2024). Abaca fiber as an efficient reinforcement for high mechanical performance in metakaolin-based geopolymers. International Journal of Applied Ceramic Technology, 21(2), 1154-1169.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

QUANTIFICATION OF CO_2 CAPTURED BY ALKALI-ACTIVATED ELECTRIC ARC FURNACE SLAG AND GROUND BRICK CONCRETE USING A THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS TECHNIQUE

Dany Kassim [a]; David Suescum-Morales [b]; Jorge de Brito [a]; Rui Vasco Silva [a]

[a] CERIS - Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, danykassim@tecnico.ulisboa.pt; jb@civil.ist.utl.pt; rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt

[b] Área de Ingeniería de la Construcción, Edificio Leonardo da Vinci, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, E-14071 Córdoba, Spain, suescun_5@hotmail.com

ABSTRACT

This study concerns the use of aluminosilicate industrial wastes, including electric arc furnace slag (EAFS) and ground brick (GB), as a full replacement for ordinary Portland cement (OPC) in the production of alkali-activated concrete. These binders were activated using sodium hydroxide and sodium silicate. The alkaline activator concentration consisted of 12% of Na_2O/binder and a ratio of 1.0 SiO_2/Na_2O. The main focus of the study was on the influence of accelerated carbonation on the properties of alkali-activated EAFS and GB structural-grade concrete. This study compares the results of carbonated to uncarbonated concrete samples, and both are benchmarked against alkali-activated fly ash (FA) concrete. Thermogravimetric analysis (TGA) coupled with differential thermal analysis (DTA) was conducted to evaluate the amount of CO_2 captured, for three different carbonation periods (i.e. 1, 3, and 6 days) at three depths of investigation, for all concrete samples (i.e. EAFS, GB, and FA). The results from the TGA were then confirmed by scanning electron microscopy (SEM) where carbonates were inspected. Furthermore, the concrete's fresh-state workability, ultrasonic pulse velocity and compressive strength tests were conducted for the carbonated and uncarbonated samples for all testing ages.

KEYWORDS

Alkali-activated materials, industrial wastes, accelerated carbonation, concrete

1 INTRODUCTION

In the United States of America, industrial facilities collectively generate an estimated 7.6 billion tonnes of industrial solid waste annually according to data from the Environmental Protection Agency (EPA) (2016). Inadequate management of these wastes poses a significant threat to the environment. Introducing these waste materials into the construction sector, a major consumer of raw materials, presents a viable solution to mitigate these environmental concerns. Proper utilisation of these wastes ensures their effective management, preventing them from ending up in landfills and causing further harm. Additionally, substituting ordinary Portland cement (OPC) with these wastes in construction materials holds the potential to reduce CO_2 emissions associated with cement production substantially. The experimental investigation detailed in this study focuses on utilising alkali-activated electric arc furnace slag (EAFS) derived from steel manufacturing and ground bricks (GB) from production rejects as alternative binders for OPC in concrete. This study aims to fully carbonate structural grade concrete made with the afforemention precursors using an accelerated carbonation curing process. Moreover, it focuses on enhancing the performance of concrete as well as quantifying the CO_2 captured using a thermogravimetric analysis (TGA). This article outlines the mix design, production, curing, and testing procedures used for the concrete samples, including the workability, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, accelerated carbonation depth, TGA, and scanning electron microscopy (SEM).

2 MATERIALS AND METHODS

Three by-products from industrial processes were used as a substitute for OPC in concrete production. These materials included FA sourced from coal power plants, EAFS obtained from steel recycling, and GB derived from manufacturing rejects. The oxide chemical composition of the precursors are shown in Table 1. The alkaline solution used consisted of a 98% pure and highly reactive NaOH pellets, dissolved in water before adding into the concrete mix. Additionally, a sodium silicate solution, that contained 26.4% SiO_2, 8% Na_2O, and 65.6% H_2O, was used. Siliceous sand and natural limestone gravel were used in the production of concrete specimens according to the specifications in EN 12620 (2008). Two types of admixtures were integrated into the mixes, a water-reducing admixture (WRA) based on naphthalene superplasticiser and a setting time retarder containing borax decahydrate at a concentration of 37% to prevent flash setting. All batches were mixed using the same mix design shown in Table 2, with an alkaline concentration of 12% for Na_2O/binder, and a SiO_2/Na_2O ratio of 1.

Table 1. Oxide chemical composition of the precursors in investigation

Materials	Precursor			Materials	Precursor		
	FA	EAFS	GB		FA	EAFS	GB
SiO_2	64.34	18.19	72.72	**V_2O_5**	0.04	0.12	0.02
Al_2O_3	20.28	8.32	18.09	**Cr_2O_3**	0.02	2.60	0.02
Fe_2O_3	6.14	27.57	4.83	**CuO**	0.02	0.03	0.01
K_2O	2.41	0.04	2.23	**ZnO**	0.02	0.01	0.01
CaO	2.24	31.91	0.43	**SrO**	0.08	0.04	0.00
MgO	1.23	5.28	0.42	**MnO_2**	0.05	4.29	0.02
Na_2O	1.01	0.22	0.17	**BaO**	0.15	0.14	0.04
P_2O_5	0.34	0.34	0.06	**Rb_2O**	0.01	-	0.01
SO_3	0.61	0.29	0.04	**MoO_3**	0.01	-	0.01
TiO_2	0.97	0.55	0.83	**Cl**	-	0.03	0.04

The mix design used for the production of these mixes was equivalent to that of a C30/37 target strength class OPC concrete counterpart. The main purpose of this design methodology is to ascertain the technical feasibility of structural-grade alkali-activated concrete specimens using similar binder and aggregate contents.

Upon casting, the fresh concrete was poured and compacted using a needle vibrator into 150 x 150 x 150 mm^3 cubic steel moulds. Subsequently, the specimens were transferred to a curing oven set at 70 °C and allowed to thermally cure for 24 hours. Following demoulding, the samples were placed in a dry chamber with controlled conditions of ≈65% relative humidity and ≈23 °C temperature. They remained in the chamber for 14 days to stabilise before undergoing an accelerated carbonation curing stage. The carbonation process involved subjecting the samples to 20% of CO_2 concentration for durations of 1, 3, and 6 days. Samples subjected to carbonation were compared against uncarbonated samples tested concurrently with the 6-day carbonated specimens.

Table 2 - Alkali-activated concrete mix design

Material	Amount (kg/m^3)
Binder	350.00
SP	7.00
Water	56.56
Fine sand 0/1	283.67
Coarse sand 0/4	597.84
Sand gravel 2/5.6	102.31
Fine gravel 5.6/11.2	257.61
Coarse gravel 10/20	637.45
Borax	14.00
NaOH	37.99
Na_2SiO_3 solution	149.47

2.1 SAMPLING AND PREPARATION OF POWDER

After each curing age, in order to determine the carbonation content using TGA and evaluate the microstructure via SEM, the concrete cubes were halved longitudinally. The selection of the cutting position was based on the compaction direction to assess multiple layers of the compacted concrete. The sawing process was conducted under a dry condition to prevent any leaching from the water. Soon after, they were sprayed by a phenolphthalein pH indicator solution to evaluate the carbonation depth of the specimen according to EN 12390-10 (2018).

The TGA method seeks to quantify precisely the chemical phases present within concrete samples at various depths. Nonetheless, the application of TGA involves analysing powdered concrete samples without the aggregates, which may cause discrepancies in the findings. These powder samples were collected using a 4-mm drill bit from three depths of the halved samples as shown in Figure 1. The powder samples were preserved in airtight tubes, weighed, and labelled while waiting to carry out the TGA.

The preparation of the SEM samples took place by withdrawing a 1 cm^3 sample and placing them in isopropanol at 98% purity to stop the hydration. The isopropanol solution was renewed every 24 hours between 4-7 days. The specimens were then placed in a drying oven at ≈100 °C for 1 hour before placing them in a vacuum for 24 hours.

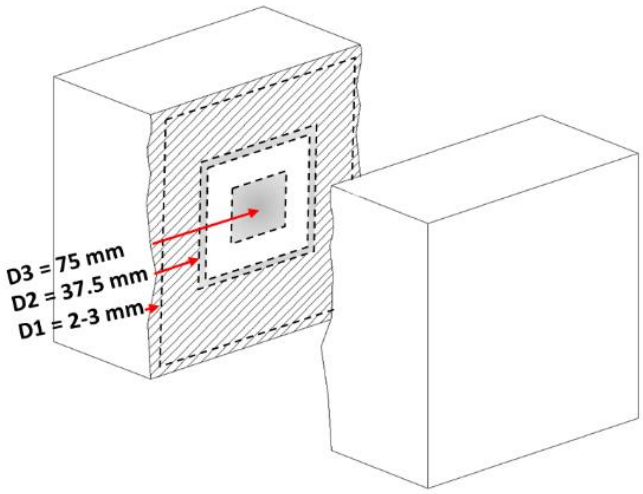


Figure 1. Sampling locations for TGA

2.2 THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS

In this study, the thermal analyser used allows the simultaneous acquisition of the thermogravimetric curve (TGA), the derived thermogravimetric curve (DTG), and the curve from the differential thermal analysis (DTA) for each sample. The powder specimen was placed in the testing ceramic crucible and underwent heating from approximately 28 °C to about 1000 °C. Each phase, including hydrates, exhibits its distinct temperature range of decomposition and associated mass loss. For instance, portlandite ($Ca(OH)_2$) experiences dehydroxylation, while calcite ($CaCO_3$) undergoes a decarbonation with loss of CO_2. Calcium carbonate polymorphs, as a result of the carbonation process, are likely to decarbonate before the calcite from the aggregates as the thermal degradation is influenced by grain size (Platret and Deloye 1994; Villain et al. 2007). The result from this analysis is expressed as the loss in mass in percent of tested powder specimen that corresponds to the carbon dioxide content (C_{CO2}).

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 FRESH-STATE WORKABILITY

The workability of fresh concrete was evaluated by measuring its slump according to standard EN 12350-2 (2009). The slump classes for EAFS, FA, and GB were S4, S5, and < S1, respectively, with WRA contents of 2.0%, 2.0%, and 3.0% by binder mass. Although the mix design intended to maintain consistent binder and water contents across all samples, the higher water demand for GB required an increase in SP content to 3.0% to enhance its workability. However, despite this adjustment, the GB mix remained dry due to the significant water absorption, resulting in a slump class of less than S1, yet compactable using a needle vibrator. The FA concrete mix exhibited high flowability, attributed to the morphology of its particles.

3.2 ULTRASONIC PULSE VELOCITY

The ultrasonic pulse velocity (UPV) test was conducted following EN 12504-4 (2004), and its results are shown in Figure 2. Among the specimens, FA exhibited the highest velocity, likely due to its small particle size and spherical shape, which resulted in well-compacted concrete. Conversely, GB had the lowest velocity values, attributed to the presence of cracks and voids within the core of the samples. Notably, the results for FA and GB did not show significant changes with accelerated carbonation

curing. However, EAFS demonstrated improved UPV values, possibly due to the formation of carbonates during carbonation curing, which may have filled the voids and microcracks.

3.3 COMPRESSIVE STRENGTH

The compressive strength of concrete was measured following EN 12390-3 (2009). As shown in Figure 3, similarly to the UPV results, the FA concrete exhibited higher strength than the mixes with the other two binders. This is due to FA's higher reactivity with the alkaline activator, resulting in the formation of sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H), which enhances strength. The maximum average compressive strength values for carbonated concrete were 42 MPa for FA, 14 MPa for EAFS, and 9 MPa for GB. For the uncarbonated specimens, the strengths were 35 MPa, 7 MPa, and 4.5 MPa, respectively. The FA samples showed a 20% strength increase after 6 days of accelerated carbonation, while EAFS and GB samples demonstrated a 100% increase.

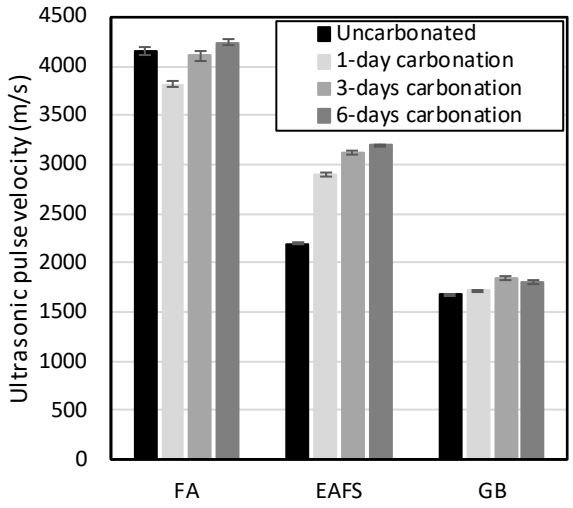


Figure 2. Average ultrasonic pulse velocity

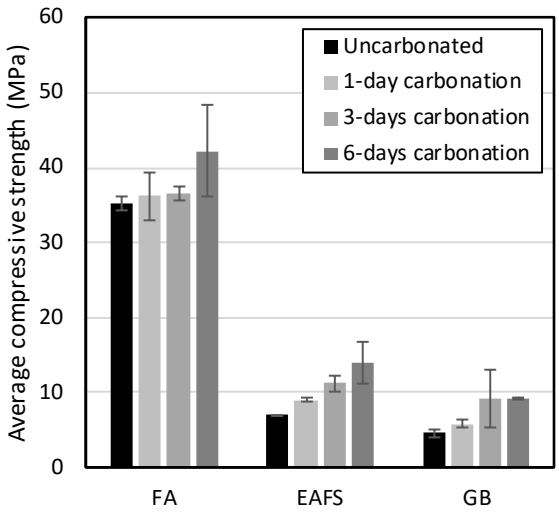


Figure 3. Average compressive strength

The original goal of producing structural-grade concrete was not attained in EAFS and GB specimens as their compressive strength was significantly lower than the intended strength class of C30/37 even after having been subjected to an accelerated carbonation curing process. In spite of the strength enhancement that this method is capable of delivering, it cannot overcome: (i) the shortcomings of the EAFS and GB precursors when it comes to their reactivity when in a highly alkaline medium; (ii) the relatively low porosity due to the adopted mix design for structural concrete production thereby hindering the diffusion and reaction of CO_2 in depth.

3.4 CARBONATION DEPTH

The carbonation depth of the concrete specimens was analysed (results in Table 3) using a phenolphthalein pH indicator solution in accordance with EN 12390-10 (2018). In Figure 4, the presence of a pinkish hue indicates areas that remained uncarbonated. Notably, despite subjecting the samples to a 20% concentration of accelerated CO_2 for a duration of 6 days, it was evident that achieving full carbonation within a 150 mm sample depth proved challenging. However, it is noted that this procedure does not quantify CO_2 captured by the samples but is rather an indicator of the pH level. The maximum carbonation depth observed for the samples produced with FA, EAFS, and GB was 18 mm, 30 mm, and 35 mm, respectively, after 6 days of carbonation.

Table 3 - Carbonation depth of concrete with different binders over time

Binder	Carbonation depth over time (mm)			
	Uncarbonated	1-day	3-days	6-days
FA	0 to 2	9	13	18
EAFS	0	10	15	30
GB	0	14	22	35

3.5 THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS

The main objective in conducting the TGA was to quantify how much carbon dioxide was captured at the three depths of investigation of the samples at different curing ages. Figure 5 presents the results from the TGA/DTA for the uncarbonated and carbonated samples. From the TGA curves, there is a continuous mass loss up to 200 °C due to the exaporation of free adsorbed water. Furthermore, as temperature increases from 200 °C to 600 °C, there is an additional mass loss corresponding to the loss of chemically bound water from the condensation of silanol and aluminol groups (Sore et al., 2020). The mass loss in this stage at the surface of the specimen, and thus more heavily carbonated, appeared to be higher when compared with the inner parts of the specimen, which showed little difference. It is possible that the ongoing carbonation led to the formation of a larger amount of silica gel phases.

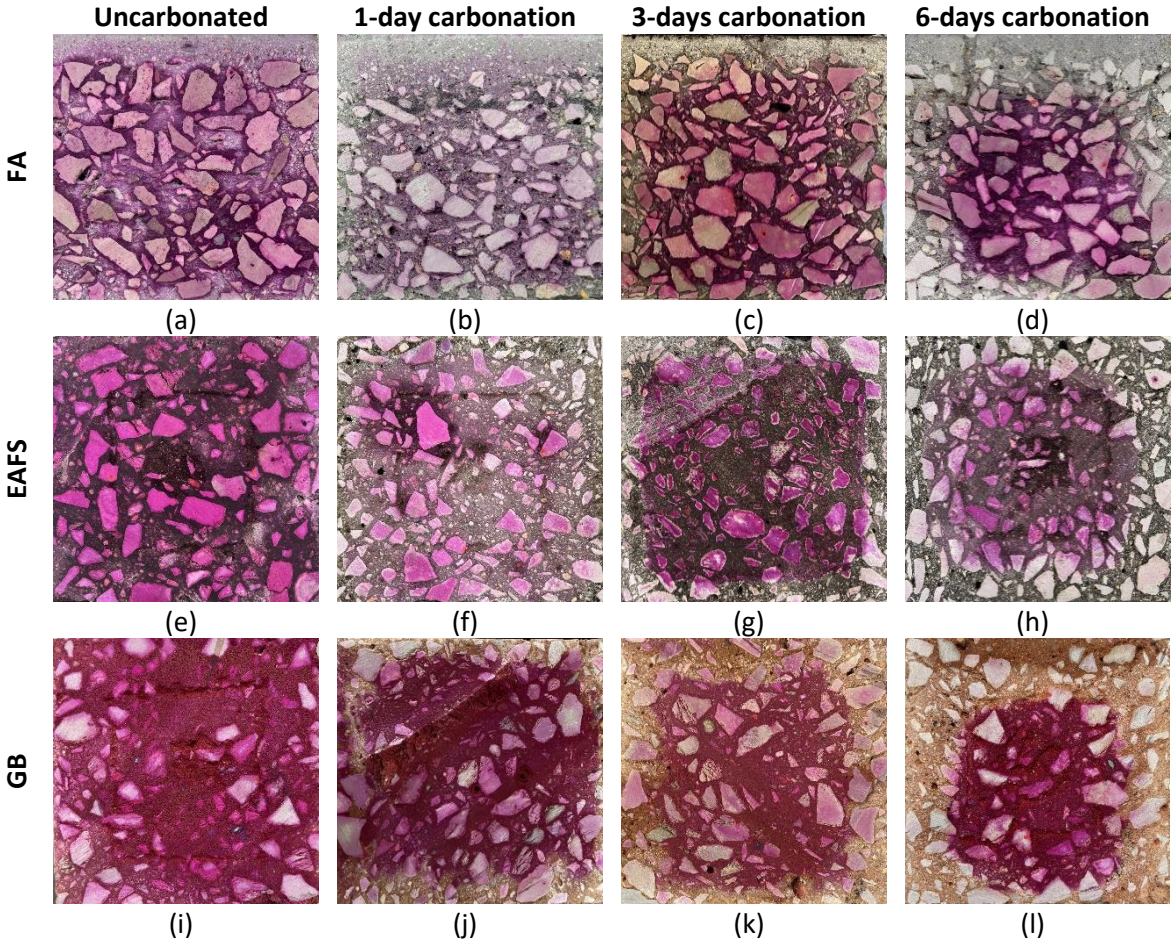


Figure 4. Carbonation depth test; (a, b, c, d) FA; (e, f, g, h) EAFS; (i, j, k, l) GB

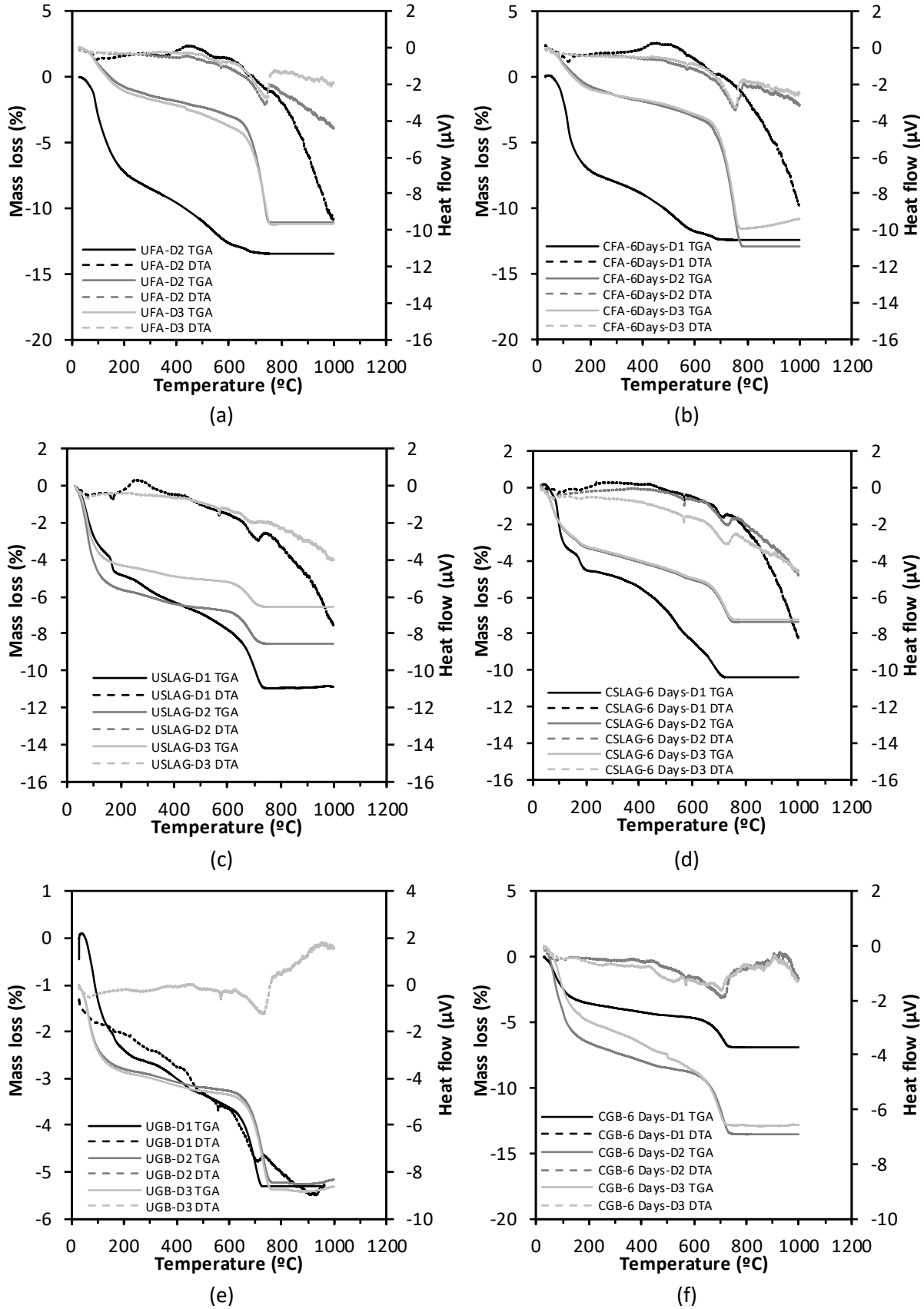
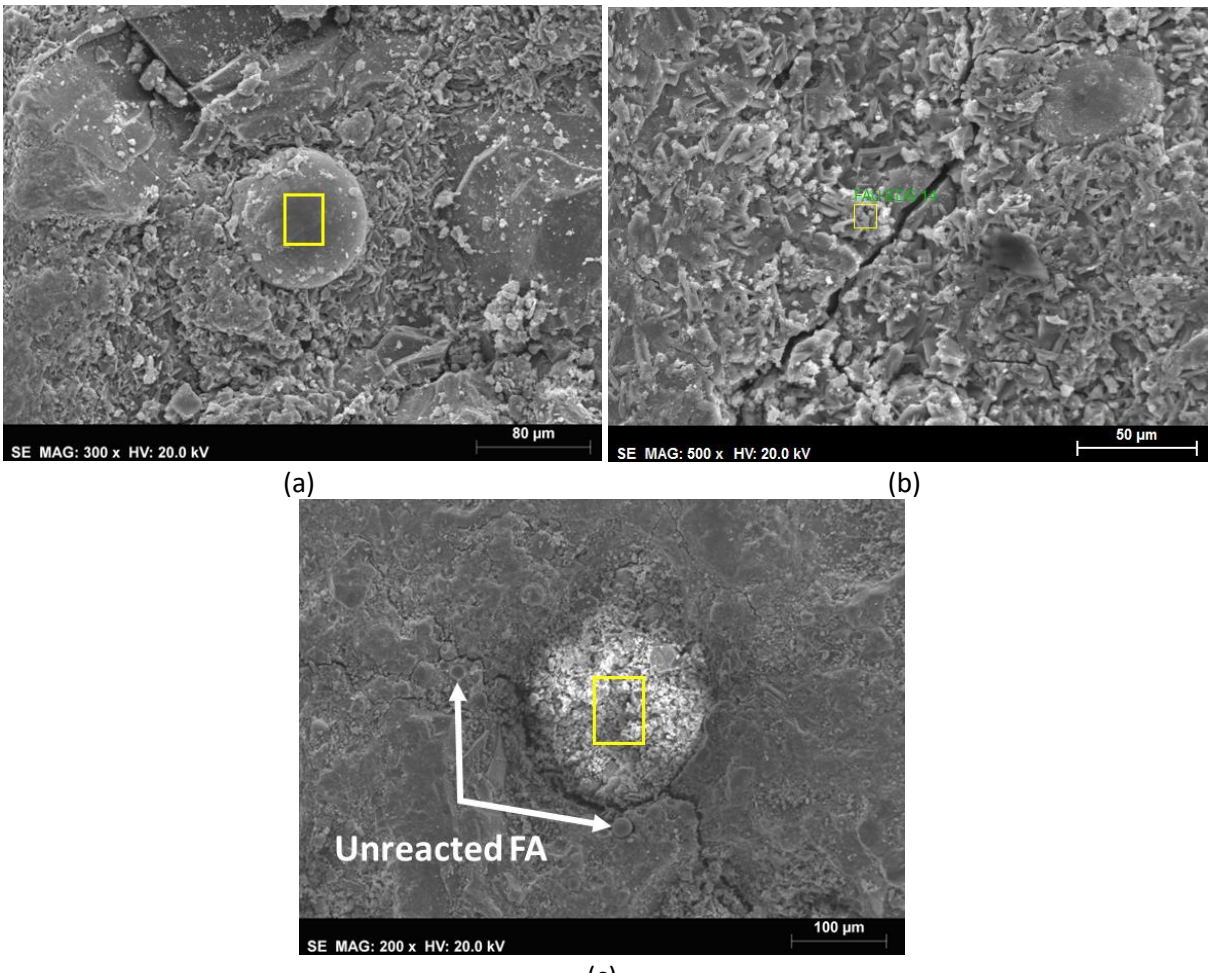


Figure 5. TGA curves for D1, D2, D3; (a) uncarbonated FA; (b) carbonated FA; (c) uncarbonated EAFS; (d) carbonated EAFS; (e) uncarbonated GB; (f) carbonated GB

Furthermore, it is worth noting that the decomposition of amorphous and unstable $CaCO_3$ phases are likely to begin at a temperature under 600 °C (calcite from the limestone aggregates appears from 720 °C) and thus the mass loss may occur in combination with the abovementioned materials during the same stage. Furthermore, DTA peaks from the carbonation process and the aggregates sometimes overlap in the temperature range, which makes it more challenging to identify. Also, due to the heterogeneity of the binder studied here, one of the main expected reaction products for the EAFS is C-A-S-H, as this precursor is a Ca-rich aluminosilicate. The decalcification of this phase due to carbonation is likely to produce $CaCO_3$. However, for alkali-activated FA and GB, it is considerably poor in calcium content, and the main reaction product is expected to be N-A-S-H. On the other hand, it is important to note that it is difficult to clearly identify $CaCO_3$ formation on these concrete samples due to the presence of different aggregate sizes. A study on pastes would be more accurate but significantly less representative in terms of porosity due a different CO_2 diffusion and reaction.

3.6 SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

SEM analyses were carried out to investigate the microstructure of concrete for both uncarbonated and carbonated samples. The SEM micrographs coupled with EDS for the uncarbonated and carbonated FA concrete specimens are shown in Figure 6. The EDS in Figure 6(a) proved that the spherical particles were unreacted FA based on their morphology and composition (i.e. rich aluminosilicate structure).



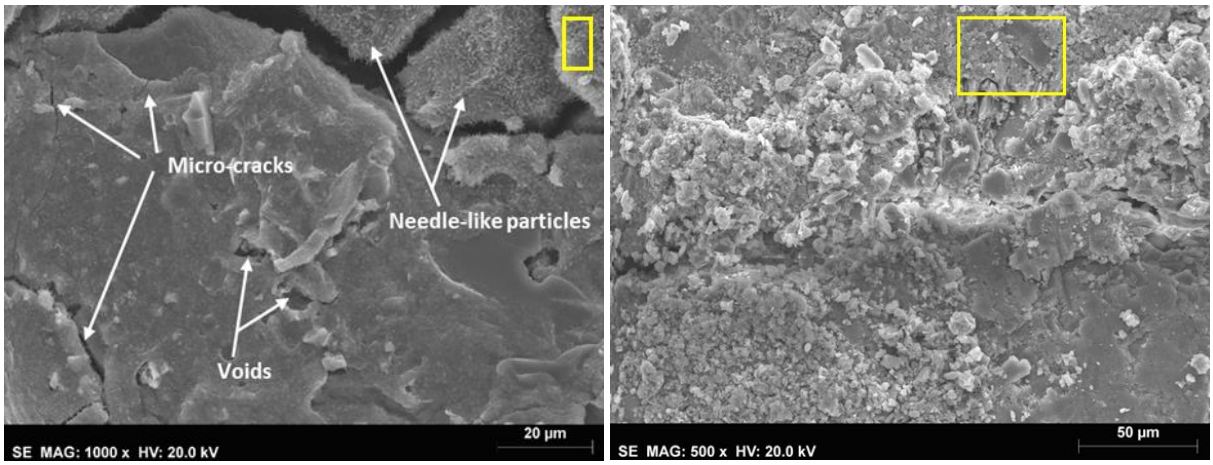
(a) (b)

(c)

Figure 6. SEM/EDS micrographs for: (a,b) uncarbonated FA; (c) carbonated FA

The elements identified were oxygen (36.1% O), silicon (24.8% Si), aluminium (15.0% Al), calcium (11.9% Ca), sodium (4.3% Na) and carbon (4.7% C). The micro-cracks shown in Figure 6(b) could have been caused by two main factors: the curing temperature of 70 °C leading to rapid evaporation of the water (Moghaddam et al., 2021), and the ongoing reactions, which led to tension forces caused by the densification of the matrix (Suescum-Morales et al., 2022). Additionally, the main elements from the EDS in Figure 6(b) were oxygen (46.7% O), sodium (20.0% Na), silicon (14.1% Si), carbon (6.7% C), iron (4.8% Fe), aluminium (4.0% Al), and calcium (1.8% Ca). The high sodium and silicon contents may indicate the presence of N-(A-)S-H phases. Regarding the carbonated FA shown in Figure 6(c), unreacted particles were also present. In addition, a white rounded shape appeared in the SEM micrograph which contained high silicon (29.4 % Si) content as well as carbon (9.1% C), and calcium (8.0% Ca); most likely a grain of sand with some superficial contamination.

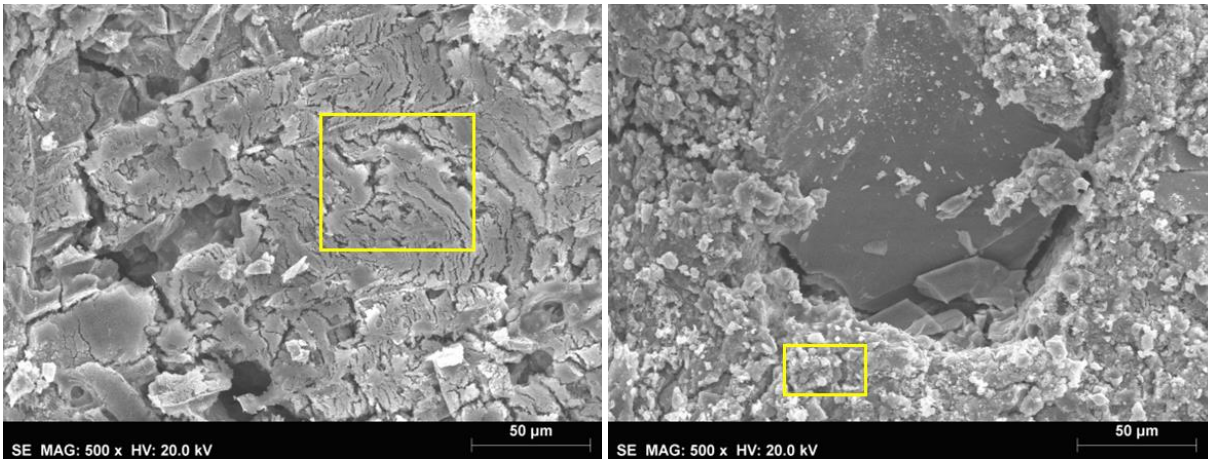
Regarding the EAFS, SEM showed microcracks, voids, and needle-shaped crystal structures in the uncarbonated sample (Figure 7(a)). These needle-shaped crystals may indicate the formation of aragonite ($CaCO_3$), which may have formed during the curing stage or the sample preparation. The EDS analysis (Figure 7(a)) of the microstructure revealed that its main elements were oxygen (34.3% O), iron (14.6% Fe), silicon (7.7% Si), calcium (14.4% Ca), and aluminium (1.12% Al). On the other hand, significant amounts of calcium (23.1% Ca), silicon (14.3% Si) and carbon (7.9% C) were identified for the carbonated sample (Figure 7(b)). This may indicate additional precipitation of $CaCO_3$ due to the reaction between CO_2 and the Ca^{2+} ions of the EAFS's decalcified phases (Kassim et al., 2022). Thus, the precipitated $CaCO_3$ and further polymerization of silica gel may have been the reason for the densified microstructure and the improved performance.



(a) (b)

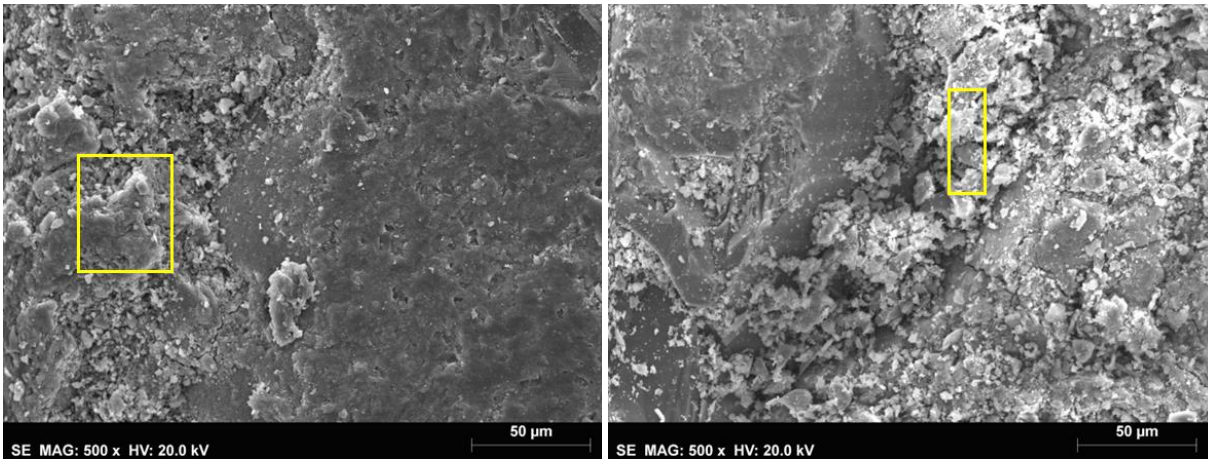
Figure 7. SEM/EDS micrographs for: (a) uncarbonated EAFS; (b) carbonated EAFS

Finally, the SEM micrographs and EDS for the uncarbonated and carbonated GB concrete specimens are shown in Figure 8 and Figure 9, respectively. The uncarbonated GB sample showed significant amounts of voids, microcracks and loose particles. The main elements detected by the EDS analysis for the uncarbonated GB were oxygen (zone 1-38.3%, zone 2-45.2% O), carbon (zone 1-17.6% C), calcium (zone 1-2.0%, zone 2-6.7% Ca), silicon (zone 1-5.8%, zone 2-20.8% Si), sodium (zone 1-35.3%, zone 2-14.4% Na), and aluminium (zone 1-1.1%, zone 2-5.9% Al). Based on these results, the matrix was likely comprised of N-A-S-H phases. However, in the carbonated samples, lower voids and denser microstructure was noticed.



(a) (b)

Figure 8. SEM/EDS micrographs for uncarbonated GB: (a) EDS zone 1; (b) EDS zone 2



(a) (b)

Figure 9. SEM/EDS micrographs for carbonated GB: (a) EDS zone 1; (b) EDS zone 2

4 CONCLUSIONS

This study used aluminosilicate industrial wastes as full replacements for cement in alkali-activated concrete production. The concrete samples underwent an accelerated carbonation curing stage to enhance their physical and mechanical performance and were compared against alkali-activated FA concrete. The results suggested that a 20% CO_2 concentration was inadequate to ensure complete carbonation, particularly for samples with significant depth. Nevertheless, mechanical enhancement was observed in all mixes with ensuing carbonation curing time. The chemical process leading to this improvement, initially thought to be mostly due to the precipitation of different calcium or sodium carbonate species, is still somewhat unknown as both had a negligible presence in FA-based specimens. It is likely that ongoing carbonation catalyzes the polymerisation of silanol and aluminol groups, which are amorphous and not easily identifiable in the characterisation methods used here. These findings highlight the need for further research using “uncontaminated” pastes to optimise the carbonation curing processes further.

REFERENCES

EN-12350-2 (2009). Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, p 12.

EN-12390-3 (2009). Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, p 22.

EN-12390-10 (2018). Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the carbonation resistance of concrete at atmospheric levels of carbon dioxide. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, p 22.

EN-12504-4 (2004). Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, p 18.

EN-12620:2002+A1 (2008). Aggregates for concrete. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, p 56.

EPA (2016). EPA's Guide for Industrial Waste Management Introduction, https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/industrial-waste-guide.pdf, (accessed on April 12, 2024).

Kassim, D., Lamaa, G., Silva, R.V., de Brito, J. (2022). Performance Enhancement of Alkali-Activated Electric Arc Furnace Slag Mortars through an Accelerated CO2 Curing Process. Applied Sciences, 12(3), 1662. https://doi.org/10.3390/app12031662

Moghaddam, S.C., Madandoust, R., Jamshidi, M., Nikbin, I.M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. Construction and Building Materials, 281, 122571. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571

Platret, G., Deloye, F. (1994). Thermogravimetry and carbonation of cements and concretes. *Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Publication LCPC,* 25: 237-243.

Sore, S. O., Messan, A., Prud'Homme, E., Escadeillas, G., Tsobnang, F. (2020) Comparative study on geopolymer binders based on two alkaline solutions (NaOH and KOH). Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 8(06), 407. https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.86026

Suescum-Morales, D., Silva, R.V., Bravo, M., Jiménez, J.R., Fernández-Rodríguez, J.M., de Brito, J. (2022). Effect of incorporating municipal solid waste incinerated bottom ash in alkali-activated fly ash concrete subjected to accelerated CO_2 curing. Journal of Cleaner Production, 370, 133533. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133533

Villain, G., Thiery, M., Platret, G. (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gamma densimetry. Cement and Concrete Research, 37(8):1182-1192. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FRATURA DE ARGAMASSAS UTILIZANDO AREIA DE BRITAGEM DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS COMO SUBSTITUTA DA AREIA NATURAL

Vivianne Machado da Costa[a]; Margareth da Silva Magalhães[b]

[a] Discente de doutorado do Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Maracanã, Rua São Francisco Xavier, 20550-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, viviannemachadoc@gmail.com

[b] Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Maracanã, Rua São Francisco Xavier, 20550-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, margareth.magalhaes@eng.uerj.br

RESUMO

A construção civil é essencial para o desenvolvimento econômico e social, mas também eleva o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos. Apesar do crescente movimento global em prol da sustentabilidade ambiental, a indústria da construção continua a utilizar recursos, como a areia de origem natural, em larga escala. Aliado a isso, a argamassa desempenha um papel fundamental na construção civil, onde seu comportamento de fratura tem um impacto significativo na vida útil das edificações. Considerando a importância dessa propriedade, associada a questões ambientais, este trabalho visa substituir a areia natural, na fabricação da argamassa, pela areia de britagem. Assim, foram produzidas 5 misturas de argamassas com areia de britagem, e analisado o efeito do tamanho máximo do grão da areia, nas propriedades físicas, mecânicas e de fratura das argamassas. Os resultados mostraram que a resistência à compressão foi maior nas misturas com o menor tamanho do grão de areia de britagem, enquanto o módulo de elasticidade permaneceu inalterado. Além disso, houve um aumento da consistência da mistura fresca, tenacidade e energia de fratura, com o aumento do tamanho do grão. Esses resultados são relevantes para aprimorar a formulação de argamassas considerando aspectos técnicos e ambientais.

Palavras-chave: Argamassa, Areia de britagem, Fratura, Tenacidade.

1 INTRODUÇÃO

A argamassa, uma mistura de cimento, areia e água, é um dos componentes cimentícios mais amplamente utilizados na indústria da construção civil, desempenhando um papel essencial na integridade estrutural e no desempenho das edificações (Caldas e Toledo Filho, 2019). Tradicionalmente, a produção de argamassa envolve o uso de areia natural, extraída de várzeas e leitos de rios, o que resulta em diversos impactos ambientais (Gontijo, 2019). Como alternativa para mitigar esses impactos, a utilização de areia de britagem, proveniente do processo de britagem de rochas, tem sido utilizada.

A baixa resistência à tração dos concretos e argamassas fabricados com cimento Portland desempenha um papel importante no crescimento e desenvolvimento de fissuras. O crescimento dessas fissuras irá acelerar a transferência de umidade, gases nocivos e corrosão das armaduras, reduzindo a sua resistência, durabilidade e vida útil. Então, a compreensão abrangente dos parâmetros mecânicos de falha, como a tenacidade à fratura, leva a uma melhor compreensão do crescimento e expansão de fissuras em concretos e argamassas.

Segundo Huang *et al*. (2018), a tenacidade à fratura é um dos parâmetros mais importantes na literatura de mecânica da fratura, a qual descreve a resistência a formação de uma fissura no material, e sua propagação, sob uma condição de carregamento prescrita. Aplicar este parâmetro para determinar a eficiência e comportamento de diferentes tipos de materiais e compósitos, na fase de projeto, e determinar a vida útil de materiais fissurados pode ser muito benéfico (Callister e Rethwisch, 2020).

Como exemplo do projeto de um compósito cimentício reforçado com fibras, que utiliza conceitos da mecânica da fratura, temos o compósito cimentício otimizado, do inglês, *engineered cementitious composites* (ECC). ECC é um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras curtas, o qual é caracterizado pela elevada ductilidade quando submetido a cargas de tração. A estratégia de desenvolvimento adotado para a geração de tais compósitos é baseada em princípios da micromecânica, que estabelecem relações entre o comportamento mecânico macroscópico dos compósitos e a microestrutura do material. Segundo Li (2002), o uso de parâmetros e conceitos da micromecânica, para guiar a combinação dos constituintes do compósito, promove um avanço importante no desenvolvimento das matrizes cimentícias reforçadas com fibras, levando à adoção de estratégias de dosagem fundamentadas em princípios da mecânica da fratura. Segundo o autor, os parâmetros de micromecânica permitem realizar uma otimização dos compósitos com fibras, propiciando a obtenção de um excelente desempenho com um volume pequeno de fibras.

Diversos estudos relatam a influência do tamanho máximo do grão do agregado graúdo na tenacidade à fratura de um concreto. Nallthambi *et al*. (1984), já relatava que a presença de agregados graúdos em uma matriz de cimento tende a aumentar a tortuosidade do caminho de fratura. De acordo com Perdikares e Romeo (1995), o aumento na tenacidade à fratura com o aumento do tamanho das partículas dos agregados, de 6 mm para 25 mm, tem como resultado o aumento da resistência à propagação da fissura. Portanto, espera-se que o tamanho das partículas da areia tenha uma influência significativa nas propriedades de fratura da argamassa.

Segundo Paul e Van Zijl (2013), o aumento do tamanho das partículas da areia natural, resultaram em maior tenacidade à fratura da argamassa, o mesmo resultado foi encontrado em estudos desenvolvidos por Guan *et al*. (2019). De acordo com Li e Yang (2017), ao aumentarem o tamanho da areia de concreto reciclado, nas misturas de argamassa, houve um aumento da tenacidade. Segundo

Chandrasekar e Ransinchung (2023), a tenacidade a fratura das argamassas com areia de britagem mais grossa (2,74 mm) foi maior do que com a areia de britagem mais fina (1,93 mm).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a influência do tamanho da areia na tenacidade à fratura da argamassa, ao substituir a areia natural, comumente utilizada na sua produção, por areia de britagem, ou seja, areia proveniente do resíduo da produção de brita. Na produção das argamassas foi utilizada areia de britagem com 05 (cinco) diferentes tamanhos máximos dos grãos, que foram: 0,15 mm, 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm e 2,4 mm. Além disso, foram estudados também o comportamento físico e mecânico das argamassas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a produção das argamassas foram utilizados cimento Portland, cinza volante, areia de britagem, água e aditivo superplastificante. O cimento Portland utilizado foi do tipo CP II-F-40, com resistência característica mínima à compressão de 40 MPa aos 28 dias de idade, conforme a NBR 7215 (2019), massa específica de 3,03 g/cm³ e índice de finura na peneira de 75 μm de 0% e na peneira de 45 μm de 2,25%. A massa específica e o índice de finura do cimento foram determinados conforme as normas NBR 16605 (2017) e NBR 11579 (2012), respetivamente.

A cinza volante foi fornecida pela empresa Pozo Fly, possuindo massa específica de 2,10 g/cm³, que foi determinada com o auxílio da NBR 16605 (2017). Foi utilizada a NBR 12826 (2014) para determinar o seu índice de finura, que foi de 27,4%, na peneira de 75 μm, e de 43,8%, na peneira de 45 μm. O índice de desempenho de resistência da cinza volante com o cimento Portland, aos 28 dias, foi determinado de acordo com a NBR 5752 (2014), e seu valor é igual a 87,7%, que é superior ao prescrito na ASTM C 618 (2022) para materiais pozolânicos. No Quadro 1 é apresentada a composição química da cinza volante, que foi determinada por espectrometria de fluorescência de raio X, com o auxílio do equipamento Shimadzu EDX-720.

Quadro 1 – Composição química da cinza volante

Principais Componentes	Teor (%)
Al_2O_3	32,24
SiO_2	53,64
SO_3	1,66
K_2O	3,48
CaO	1,97
Fe_2O_3	5,48
TiO_2	1,33
Perda ao fogo	< 2,00

A areia de britagem utilizada na produção das argamassas é originária de rocha gnaisse granítica. As suas partículas possuem um formato mais angulo e lamelar, com grande quantidade de vértices e arestas. A areia foi fornecida pela empresa Ibrata Mineração Ltda, localizada na cidade do Rio de Janeiro. Após análise da sua granulometria, decidiu-se utilizar cinco frações da areia, com diferentes tamanhos máximos dos grãos. Em seguida, a areia de britagem foi seca em estufa e peneirada, e as

frações passantes nas peneiras de 2,40 mm (M2.4), 1,20 mm (M1.2), 0,60 mm (M0.6), 0,30 mm (M0.3) e 0,15 mm (M0.15) foram utilizadas nas diferentes misturas. Na Figura 1 é possível observar a distribuição granulométrica das diferentes frações de areia de britagem, determinadas de acordo com a NBR 17054 (2022). Através desta norma, também foram determinados o diâmetro máximo característico e o módulo de finura das areias de britagem.

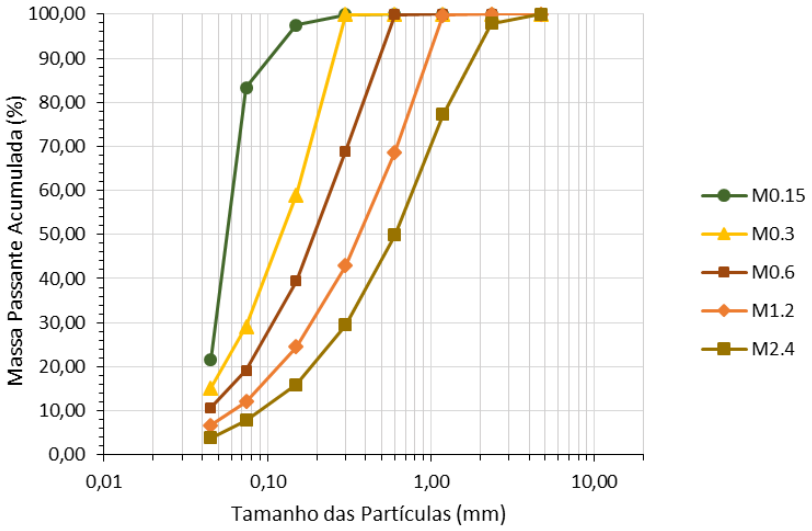


Figura 1 – Curva granulométrica das areias de britagem.

No quadro 2, são resumidas as propriedades físicas de cada fração de areia de britagem. O ensaio de massa específica foi feito seguindo as diretrizes da norma NBR 16916 (2021), exceto a granulometria M0.15 que foi determinada conforme a NBR 16605 (2017).

Quadro 2 – Propriedades físicas das areias de britagem.

Areia de britagem	Diâmetro máximo característico (mm)	Módulo de finura	Massa específica (g/cm³)
M2.4	2,40	2,30	2,59
M1.2	1,20	1,64	2,54
M0.6	0,60	0,92	2,44
M0.3	0,30	0,41	2,53
M0.15	0,15	0,02	2,55

A água utilizada na moldagem é proveniente das instalações hidráulicas do Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, que por sua vez, é fornecida pela rede municipal de abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro. O aditivo superplastificante usado nas misturas foi o Glenium 51 de terceira geração, da fabricante BASF, que possui como base química o éter policarboxílico, com massa específica de 1,10 g/cm³ e teor de sólidos de 27%.

2.2 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram produzidas cinco diferentes misturas de argamassa, onde a sua variação foi o tamanho máximo dos grãos da areia de britagem. As proporções dos materiais foram de cinza volante/cimento igual a 1,2, areia/material cimentício de 0,36 e água/material cimentício igual a 0,31. O material cimentício foi considerado como a soma de cimento e cinza volante. É importante ressaltar que as proporções

foram mantidas constantes em todas as misturas, exceto a proporção de superplastificante/material cimentício. Isso se deve à variação do tamanho máximo dos grãos de areia, o que influencia na consistência das misturas, exigindo diferentes quantidades de superplastificante para atingir um espalhamento entre 22 cm e 24 cm. No Quadro 3 está exposta a quantidade de cada material utilizado nas misturas.

Quadro 3 – Quantidade de materiais utilizados na produção das argamassas (kg/m³).

Mistura	Cimento	Cinza volante	Areia	Água	Superplastificante
M2.4	529,64	635,57	419,47	361,21	0,00
M1.2	527,97	633,56	418,15	360,08	0,00
M0.6	524,46	629,35	415,37	356,84	1,15
M0.3	528,64	634,37	418,69	358,83	2,33
M0.15	530,94	637,13	420,50	359,02	4,22

Para iniciar a moldagem das argamassas, primeiramente foi feita a separação e pesagem dos materiais pertencentes a cada mistura. Os materiais secos (cimento, cinza volante e areia) foram previamente misturados para obter uma boa homogeneidade e metade desta mistura foi colocada em uma argamassadeira com capacidade de 20 litros. Após, foi adicionado aproximadamente 60% da água e feito uma mistura inicial. Ao observar que esta mistura estava devidamente úmida, foi adicionado o aditivo superplastificante e após o tempo mínimo de 3 minutos para a sua correta ativação (dados do fabricante), foi sendo adicionado aos poucos o restante do material seco previamente homogeneizado e o restante da água, até a sua homogeneização total.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos medindo 50 x 100 mm (diâmetro x altura), para os ensaios de compressão axial, massa específica, porosidade e absorção de água. Também foram moldados corpos de prova para o ensaio de tenacidade à fratura, de acordo com a Figura 2. As formas dos corpos de prova de tenacidade à fratura foram feitas de madeira com revestimento para não absorver a água da mistura, no formato de primas retangulares entalhados medindo 40 x 80 x 400 mm. O entalhe nos prismas foi feito no ato da moldagem com o auxílio de uma placa de acrílico fixada a forma. Este pré-entalhe localiza-se na superfície inferior do prisma, no meio do vão, com profundidade de 24 mm (equivalente a 30% da altura do corpo de prova).

(a) (b)

Figura 2 – (a) Forma e (b) moldagem do corpo de prova de tenacidade à fratura.

Os corpos de prova foram moldados em temperatura ambiente, sendo aplicado previamente óleo desmoldante nas formas e após a moldagem foram cobertos com lona plástica úmida, com o objetivo de impedir a perda de água para o meio externo, por 24 horas. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados e levados para cura em tanques com água, onde ficaram até os 28 dias de idade. Na Figura 3 é possível observar o corpo de prova prismático desmoldado.

Figura 3 – Corpo de prova prismático desmoldado.

2.3 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Foram realizados ensaios nas misturas de argamassa para determinar as suas propriedades no estado fresco, como consistência e massa específica, propriedades físicas e propriedades mecânicas no estado endurecido, que foram determinadas através dos ensaios de porosidade, absorção de água, massa específica, compressão axial e de tenacidade à fratura.

2.3.1 Propriedades no estado fresco

Logo após o término da mistura, antes de iniciar a moldagem da argamassa, foi feito o ensaio do índice de consistência, popularmente conhecido como ensaio de espalhamento, que determina o índice de consistência da argamassa a ser produzida com base na NBR 13276 (2016). Também foi determinada a massa específica da argamassa no estado fresco, conforme a NBR 13278 (2005).

2.3.2 Propriedades físicas no estado endurecido

As propriedades físicas foram determinadas através dos ensaios de massa específica, porosidade e absorção de água, que foram realizados conforme a norma NBR 9778 (2005).

2.3.3 Compressão axial

Para o ensaio de compressão foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de cada mistura. O ensaio foi realizado em uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON, com capacidade de 100 KN e velocidade de 0,3 mm/min. Para a correta execução deste ensaio e obtenção de resultados satisfatórios, foi feito o nivelamento dos corpos de prova através da técnica de capeamento, conforme a NBR 5738 (2015). O cálculo do módulo de elasticidade foi feito através da inclinação da reta tangente no gráfico de tensão de compressão versus deformação, até atingir 30% da tensão máxima.

2.3.4 Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura foi feito em quatro prismas pré-entalhados de cada mistura, utilizando uma configuração de teste de flexão de três pontos, baseado na norma ASTM E399 (2013).

Para isto, utilizamos uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON com capacidade de 100 KN e taxa de carregamento de 0,5 mm/min. O comprimento do vão do apoio inferior do prisma foi de 320 mm. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 4.

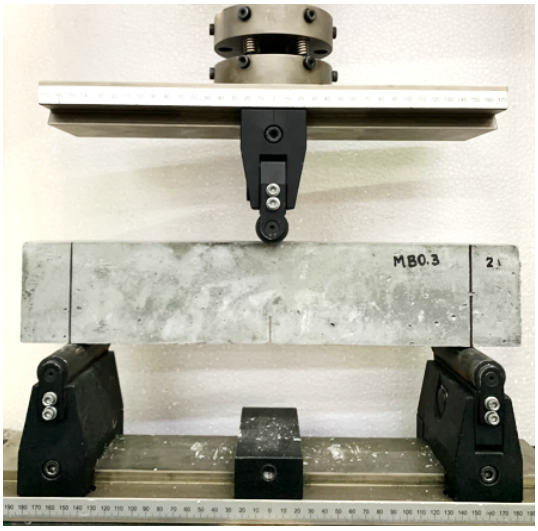


Figura 4 – Configuração do ensaio de tenacidade à fratura.

De acordo com Xu e Reinhardt (1999), a tenacidade à fratura, K_m, pode ser calculada através das Equações 1 e 2.

$$Km = \left(\frac{1{,}5\left(\mathrm{F} + \frac{mg}{2}\right) x\, S\, x\, a0^{\frac{1}{2}}}{th^2} \right) f\,(a) \tag{1}$$

$$f\,(a) = \frac{\left(1{,}99 - a\,(1-a)(2{,}15 - 3{,}99a + 2{,}7a^2)\right)}{(1+2a)(1-a)^{\frac{3}{2}}} \tag{2}$$

Onde F é a carga máxima registada no ensaio, m é a massa do corpo de prova, g é a aceleração da gravidade, S é o vão de aplicação da carga, t é a largura do corpo de prova, h é a altura do corpo de prova, ao é a profundidade do entalhe, e a é a razão entre a profundida do entalhe (ao) e a altura do corpo de prova (h). Já a energia de fratura J_{tip} foi calculada segundo a metodologia de Li (2003), utilizando a Equação 3, onde E é o módulo de elasticidade.

$$Jtip = \frac{Km^2}{E} \tag{3}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades no estado fresco das argamassas podem ser observadas no Quadro 3. Ressalta-se que são apresentados os valores médios, e entre parênteses, encontra-se o respectivo desvio padrão. Através do desvio padrão é possível verificar que não houve grandes variações no diâmetro do espalhamento das misturas frescas de argamassas, indicando que possuem uma consistência homogênea em toda a sua extensão.

Quadro 3 – Propriedades no estado fresco das misturas de argamassa

Mistura	Índice de consistência (cm)	Massa específica (g/cm³)
M2.4	24,00 (0,24)	1,90
M1.2	23,70 (0,34)	1,88
M0.6	23,50 (0,24)	1,85
M0.3	22,50 (0,25)	1,87
M0.15	22,20 (0,17)	1,85

Ao analisar o índice de consistência das misturas, observamos um aumento da fluidez, à medida que o tamanho máximo dos grãos da areia de britagem aumenta. Isso se deve ao fato de que partículas mais grossas têm uma área superficial menor em comparação com partículas mais finas. Consequentemente, a demanda de superplastificante para revestir eficientemente as partículas e manter a mesma fluidez pode ser reduzida. Assim, a quantidade de superplastificante foi ajustada para obter uma fluídez entre 22 cm a 24 cm. Neville (2015) corrobora essa observação, ao afirmar que quanto mais fina for a granulometria da areia, maior será a demanda por água na mistura, que neste estudo foi complementada com adição de aditivo superplastificante.

Já com relação a massa específica no estado fresco, podemos verificar que, embora exista uma tendência de aumento do seu valor à medida que aumenta o tamanho máximo do grão da areia de britagem, esse acréscimo é pequeno, não ultrapassando 2,7%. É conhecido que a relação entre massa específica e teor de ar incorporado na argamassa é inversamente proporcional. Assim, mesmo sem medições diretas do teor de ar incorporado, pode-se inferir que, como a massa específica apresentou uma pequena variação, é provável que o teor de ar tenha variado de forma semelhante, porém de forma inversa.

3.1.2 Propriedades físicas

No Quadro 4 constam as propriedades físicas no estado endurecido das argamassas, e entre parênteses tem-se os respetivos desvios padrões. É possível observar que a porosidade e absorção de água da argamassa com areia de britagem obteve o menor valor na mistura M0.15, que é a que possui menor tamanho máximo dos grãos de areia de britagem. De acordo com Neville (2015), partículas mais finas de areia possuem maior área superficial, portanto, elas preenchem os espaços vazios de forma mais eficiente. Como resultado, há a formação de uma estrutura mais compacta e menos permeável, contribuindo para um material com melhor desempenho e durabilidade.

Quadro 4 – Propriedades físicas das argamassas.

Mistura	Porosidade (%)	Absorção (%)	Massa específica (g/cm³)
M2.4	27,96 (0,10)	16,83 (0,35)	1,66 (0,02)
M1.2	27,36 (0,14)	16,55 (0,59)	1,65 (0,05)
M0.6	27,21 (0,13)	16,11 (0,03)	1,69 (0,01)
M0.3	27,76 (0,77)	16,91 (0,62)	1,64 (0,01)
M0.15	24,16 (0,01)	14,29 (0,11)	1,68 (0,01)

Com relação aos valores de massa específica no estado endurecido, em geral, não foi observada uma variação substancial com a mudança do tamanho máximo do grão da areia de britagem. Isto pode ter acontecido devido à baixa diferença entre as massas específicas das areias com diferentes tamanhos.

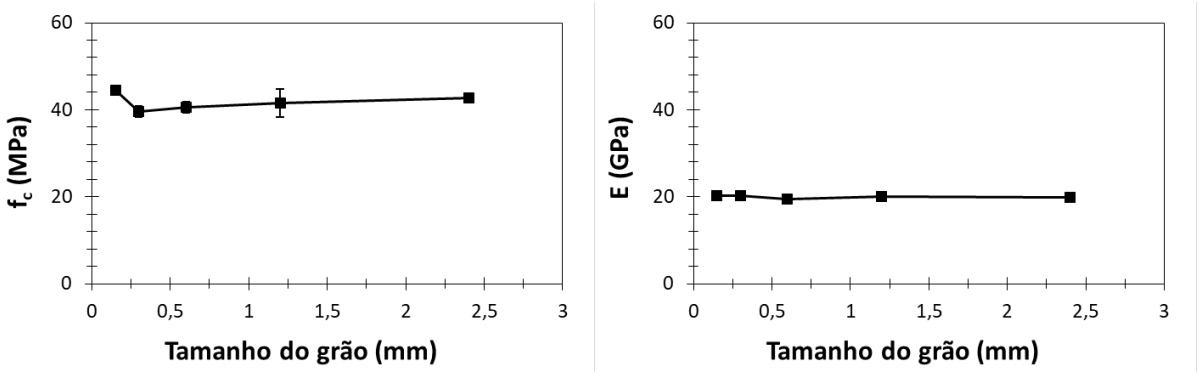
3.1.3 Propriedades mecânicas

No Quadro 5 consta os valores médios das propriedades mecânicas, e seus respectivos desvios padrões de acordo com o tamanho máximo do grão de areia de britagem.

Quadro 5 – Compressão axial, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura e energia de fratura das argamassas.

Mistura	fc (MPa)	Em (GPa)	Km (MPa.m$^{1/2}$)	J_{tip} (MPa)
M2.4	42,67 (0,84)	19,94 (0,42)	0,49 (0,01)	11,95 (0,54)
M1.2	41,54 (3,32)	20,09 (0,11)	0,49 (0,04)	12,29 (1,88)
M0.6	40,53 (1,26)	19,41 (0,79)	0,49 (0,02)	12,38 (1,02)
M0.3	39,52 (1,27)	20,22 (0,09)	0,46 (0,02)	10,36 (0,85)
M0.15	44,47 (0,61)	20,32 (0,30)	0,39 (0,02)	7,68 (0,82)

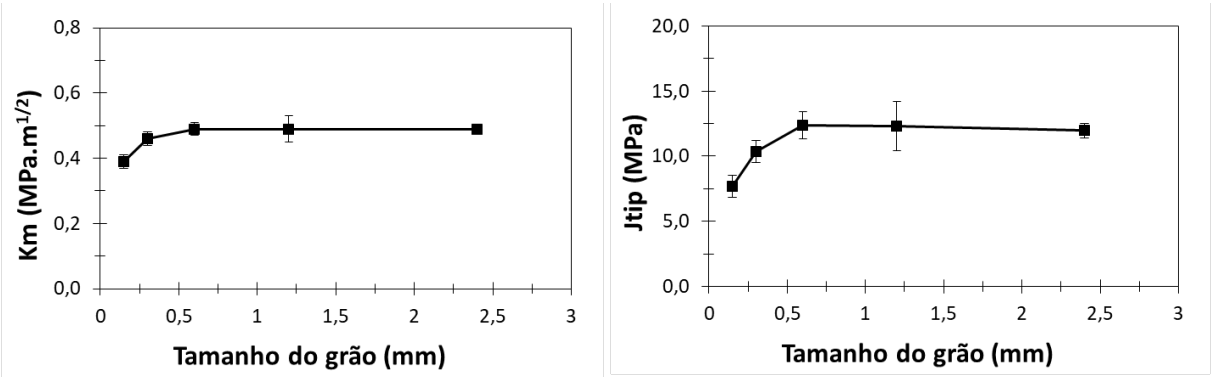
Podemos observar na Figura 5a, que o maior valor de resistência à compressão axial foi da mistura M0.15. Este resultado já era esperado, já que esta mistura foi a que apresentou menores valores de porosidade, o que contribui para uma maior resistência à compressão. Já com relação a resistência à compressão das demais misturas, não houve uma variação, exceto a mistura M0.3 que ao ser comparada com a M0.15, teve seu valor 11,13% menor. Segundo Costa *et al*. (2020), granulometria mais fina resulta em maior resistência à compressão, pois a utilização de finos em argamassas preenche os espaços vazios e favorece uma compactação mais eficiente, podendo resultar em uma estrutura mais coesa e resistente, com menos vazios, o que tende a aprimorar suas propriedades mecânicas. Já com relação ao módulo de elasticidade, não houve variação dos seus valores com a variação do tamanho máximo do grão da areia de britagem, conforme podemos verificar na Figura 5b.



(a) (b)

Figura 5 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão da areia de britagem e (a) resistência a compressão axial e (b) módulo de elasticidade

Na Figura 6a é possível verificar que houve um aumento dos valores de tenacidade à fratura conforme aumentou o tamanho máximo do grão de areia. Este aumento acontece até a mistura M0.6, onde após é possível observar um platô nos resultados de tenacidade à fratura nas demais misturas. A literatura já relata que conforme há o aumento do tamanho máximo dos grãos de agregado, maior será os valores de tenacidade à fratura. Conforme estudo de Guan *et al.* (2019), onde o aumento do tamanho das partículas de areia levou a uma maior tenacidade a fratura da argamassa, já que quando o tamanho do grão de areia aumenta, o caminho de propagação das fissuras torna-se mais longo e a energia consumida é maior, levando a uma maior tenacidade à fratura. Isto dificulta a fissuração múltipla e, consequentemente reduz a ductilidade do material (Li *et al*., 2020).



(a) (b)

Figura 6 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão de areia de britagem e (a) tenacidade à fratura e (b) energia de fratura.

Com os resultados observou-se também que o menor valor de tenacidade à fratura foi da mistura M0.15, sendo que foi a mistura com menor valor de porosidade no estado endurecido. De acordo com a literatura, esperava-se que a correlação seria de menor tenacidade à fratura e maior porosidade (Chang *et al.*, 2002; Marcellino, 2020), pois quanto maior a porosidade na matriz, maior a probabilidade de haver locais propícios para o surgimento de fissuras e a sua propagação. No entanto, neste estudo ao analisar esta mistura, não foi verificada essa correlação. Isto pode ser em decorrência de que, apesar de uma menor porosidade contribuir para uma argamassa mais resistente, ela pode não ser o único fator determinante da tenacidade à fratura. Outros fatores, como o tamanho do grão, também desempenha um papel importante.

Quanto a energia de fratura, no geral obteve-se maior energia de fratura ao aumentar o tamanho máximo do grão da areia de britagem. Segundo Li *et al*. (2020), quando se aumenta o tamanho do agregado, mais complexo será o caminho da fissura. Isso pode levar a um aumento na resistência à fratura e na tenacidade do material, uma vez que as fissuras encontram maior resistência ao se propagarem através do compósito. Este resultado é consistente com o encontrado por Guan *et al*. (2019), onde o aumento do tamanho do agregado levou diretamente ao aumento da energia de fratura.

4 CONCLUSÕES

O estudo conduzido neste artigo apresentou as seguintes conclusões:

- Embora haja uma tendência do aumento do valor da massa específica no estado fresco da argamassa, à medida que aumenta o tamanho máximo do grão de areia de britagem, esse acréscimo é pequeno, não ultrapassando 2,7%.

- Já com relação a massa específica no estado endurecido, em geral não houve uma alteração significativa com o aumento do tamanho máximo do grão de areia de britagem.

- O maior valor de resistência à compressão axial foi da mistura M0.15, que foi a mistura que obteve os menores valores de porosidade e absorção de água, resultando em uma mistura mais compacta.

- Houve um aumento dos valores de tenacidade à fratura conforme aumentou o tamanho máximo do grão de areia de britagem, mas este aumento aconteceu da mistura M0.15 até a M0.6. Após, observa-se um platô nos resultados das misturas M0.6, M1.2 e M2.4.

- Quanto a energia de fratura, no geral obteve-se maior energia ao aumentar o tamanho máximo do grão de areia de britagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ, pelo apoio financeiro na forma de auxílio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASTM C618, 2022. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM international, West Conshohocken, PA.

ASTM E399. (2013). Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness Kic of metallic materials. American Society for Testing and Materials (ASTM).

Caldas, L., Toledo Filho, R. (2019). Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, 2(2):34-61. https://doi.org/10.18225/lalca.v2i2.4143

Callister, W., Rethwisch, D. (2020). Ciência e engenharia de materiais – Uma introdução. Editora LTC, 10ª edição, ISBN 978-8521637288.

Chang, S., Lee, C., Jeon, S. (2002). Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens. Engineering Geology, 66(1-2):79-97. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00033-9

Chandrasekhar, C., Ransinchung, G. (2023). Engineered cementitious composites (ECC) with manufactured sand (M-sand) for pavement applications. Composites Communications, 41. https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101657

Costa, E., Barros, B., Costa, M. (2020). Influência da granulometria e do teor de resíduo de polimento de placas cerâmicas na resistência mecânica de matrizes cimentícias. Matéria, 25(4). https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1167

Gontijo, M. (2019). Controles ambientais em portos de areias. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 4(3):137-150. ISSN: 2448-0959

Guan, X., Li, Y., Liu, T., Zhang, C., Li, H., Ou, J. (2019). An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand. Construction and Building Materials, 201 461-472. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.207

Huang, Y., Guan, Y., Wang, L., Zhou, J., Ge, Z., Hou, Y. (2018). Characterization of mortar fracture based on three point bending test and XFEM. International Journal of Pavement Research and Technology, 11(4):339-344. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.005

Li, V. (2002). Advances in ECC research. ACI Spec. Publ. Concrete, 206:373-400. DOI: 10.14359/12264

Li, J., Yang, E. (2017). Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. Cement and Concrete Composites, 78:33-42. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.013

Li, Y., Guan, X., Zhang, C., Liu, T. (2020). Development of high-strength and high-ductility ECC with saturated multiple cracking based on flaw effect of coarse river sand. J. Mater. Civ. Eng., 32:1-11.

Marcellino, L. (2020). Estudo da mecânica da fratura associada à alterabilidade em rochas básicas intrusivas do quadrilátero ferrífero – MG. Magister Scientiae, Viçosa-MG.

Nallthambi, P., Karihaloo, B., Heaton, B. (1984). Effect of Specimen and Crack Sizes, Water/Cement Ratio and Coarse Aggregate Texture upon Fracture Toughness of Concrete. Magazine of Concrete Research, 36(129):227-236.

NBR 5738 (2015). Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 5752 (2014). Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - índice de atividade pozolânica com cimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 7215 (2019). Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 9778 (2005). Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 11579 (2012). Cimento Portland Comum - Determinação do módulo de finura. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 12826 (2014). Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio do peneirador aerodinâmico. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 13276 (2016). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 13278 (2005). Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 16605 (2017). Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 16916 (2021). Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

NBR 17054 (2022). Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

Neville, A. (2015). Propriedades do concreto. Ed. Bookman, 5ª Edição, ISBN 978-8582603659.

Paul, S., Van Zijl, G. (2016). Assessment of fracture toughness in strain hardening cement-based composite (SHCC) made from fine and coarse sand. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, 1:619–624, ISBN 978-1-138-00061-2.

Perdikaris, P., Romeo, A. (1995). Size Effect on Fracture Energy of Concrete and Stability Issues in Three-Point Bending Fracture Toughness Testing. ACI Materials Journal, 92(5):483-496.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INCORPORAÇÃO DE LAMAS DE ETA EM CALDAS PARA CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIAS

Luis G. Baltazar[a]; Francisco Nunes [b]

[a] CENIMAT & Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal, luis.baltazar@fct.unl.pt

[b] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal, fg.nunes@campus.fct.unl.pt

RESUMO

As estações de tratamento de água (ETA) produzem uma quantidade significativa de resíduos (lamas) que devem ser adequadamente processadas para mitigar o seu impacte ambiental. O presente estudo pretende avaliar a viabilidade da incorporação de lamas produzidas em ETA's na formulação de caldas para consolidação de alvenarias antigas. As construções em alvenaria representam uma parcela significativa da área construída não só em Portugal assim como na Europa e a sua preservação requer muitas vezes necessidade de consolidação com vista à melhoria das suas características estruturais. Uma das técnicas de consolidação consiste na injeção de caldas no interior das alvenarias. Neste sentido, o presente estudo analisa a influência das lamas de ETA's (calcinadas e não calcinadas) nas propriedades reológicas, mecânicas e físicas de caldas à base de cal hidráulica, propondo-se a seleção da composição mais adequada, atendendo a fatores como facilidade de escoamento, maior desempenho mecânico e compacidade no estado endurecido. A escolha da cal hidráulica deve-se ao facto de ser o ligante hidráulico que apresenta propriedades físicas e químicas mais próximas daquelas que existem numa alvenaria antiga. A escassez de informação científica acerca da incorporação de lamas em caldas de injeção justifica a realização da investigação sobre o assunto. Este trabalho insere-se no âmbito de uma linha de investigação mais vasta que visa contribuir para o aumento de conhecimento da comunidade científica e da indústria sobre a potencial destes resíduos no fabrico de materiais de construção. O estudo permitiu concluir que a adição de lamas calcinadas contribui para melhoria do desempenho mecânico, sendo a dosagem das lamas o fator mais determinante no desempenho das caldas. Por outro lado, a calcinação das lamas tem uma contribuição menos favorável na melhoria das propriedades no estado fresco e endurecido. Porém, a partir dos resultados obtidos é possível evidenciar a importância de uma composição correta da calda para se obter uma adequada performance e consequente consolidação da alvenaria.

Palavras-chave: caldas, resíduos, estação de tratamento de água, cal hidráulica

1 INTRODUÇÃO

Até meados do seculo XX a grande maioria dos edifícios construídos baseavam-se em técnicas de construção antigas, cujos materiais utilizados eram maioritariamente a pedra, terra (taipa ou abobe) ou ainda os tijolos cerâmicos maciços. Consequentemente, justifica-se a atual predominância de centros urbanos compostos por edificações constituídas por alvenarias resistentes à base de pedra. Estes edifícios caracterizam-se por possuírem paredes resistentes de elevada espessura, heterogeneidade, e irregularidade dos elementos constituintes, bem como a presença de vazios no interior das mesmas, consequentemente este tipo de alvenaria é particularmente sensível a mecanismos de colapso por desagregação dos seus panos exteriores ou seja um fraco ou inexistente comportamento monolítico (Valluzzi et al., 2004). Quando se trata de intervencionar estruturalmente edifícios antigos com alvenarias de pedra de vários panos, as caldas de injeção afiguram-se como uma possível técnica de intervenção, com a sua eficácia já diversas vezes comprovada. O principal objetivo deste método é aumentar a compacidade das paredes, o que, por sua vez, melhora a coesão entre pedras, argamassas ou outros elementos presentes. Ao promover a união entre panos, e devido ao aumento de aderência e compacidade entre os elementos, leva, consequentemente, à melhoria do comportamento monolítico da alvenaria (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

No entanto este método de consolidação, tal como muitos outros do setor da construção, tem um impacto ambiental elevado, nomeadamente no que toca à quantidade de materiais naturais associadas ao fabrico do ligante hidráulico, desta forma torna-se imperativo procurar mitigar o impacto ambiental causado. Nesse sentido, procedeu-se ao estudo da incorporação de um resíduo nas caldas de injeção, com o objetivo de substituir parcialmente o ligante, reduzindo o seu uso e evitando o depósito do resíduo em aterro, mitigando a exploração de matérias-primas virgens e emissão de gases com efeito de estufa associados ao fabrico dos tradicionais ligantes hidráulicos.

Com aumento da população e da crescente necessidade do uso de água potável, as estações de tratamento de água (ETA) têm vindo a aumentar a sua exploração, extraindo e tratando uma maior quantidade de água (Ahmad et al., 2016). Paralelamente a este aumento, também se verifica um aumento na produção de lamas de ETA. As lamas de ETA, comummente denominadas de LETA, são um resíduo proveniente do tratamento das águas para consumo. Estas, são geradas através dos processos implementados nas ETA e advêm dos processos de coagulação, floculação, decantação e filtração. As LETA são atualmente vistas como um resíduo, tendo sido ainda pouco estudadas as alternativas ao seu depósito em aterro. Por este motivo, o presente estudo tem como objetivo contribuir para o estado de conhecimento deste resíduo e da sua influência nas caldas de injeção, procurando, neste caso, analisar a sua influência nas características físicas e mecânicas das caldas de cal hidráulica. Pretende-se assim, promover a reciclagem/aproveitamento destas lamas de ETA nas atividades de consolidação de alvenarias antigas por injeção de caldas.

Neste estudo, procurou-se realizar a substituição parcial do ligante por lamas de ETA não calcinada e calcinada em percentagens de 5%, 10% e 15% do volume do ligante. O estudo focou-se na análise da influência dessas lamas nas propriedades físicas e mecânicas das caldas de injeção de cal hidráulica. O objetivo passa pela obtenção de resultados que comprovem, ou não, a viabilidade do uso desse resíduo, visando a potencial redução do impacto ambiental ao diminuir o consumo de ligante e ao aproveitar um resíduo evitando o seu depósito em aterro.

2 FORMULAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 DOSAGENS E FABRICO DAS CALDAS

Na formulação das caldas foram utilizados os seguintes constituintes: cal hidráulica (HL 5), superplastificante (SP) em pó, na dosagem de 0,4% da massa do ligante, água canalizada do concelho de Almada, com uma relação de água/pó de 0,5 (em massa) e LETA em percentagens variáveis. De forma a caracterizar a influencia da inserção do resíduo nas caldas de cal hidráulica e considerando os dois tratamentos aplicados, formulou-se uma calda de referência (apenas com cal hidráulica), e seis caldas com substituição, do ligante, em volume. Foram adotadas percentagens de 5%, 10% e 15% para ambos os tratamentos do resíduo, resultando em duas formulações de cada percentagem em volume de substituição. No Quadro 1 é possível observar as dosagens adotadas e a sua respetiva nomenclatura. A calda de referência designa-se de Ref, as caldas de LETA não calcinada, apenas seca em estufa, designam-se por NC_% de substituição e por fim as caldas com LETA calcinada designam-se por C_% de substituição do ligante. Isto é, S_10% equivale à mistura de LETA não calcinada com substituição de 10% do volume do ligante.

Quadro 1 - Dosagens adotadas nas caldas

Caldas	HL5 (g)	LETA (g)	ÁGUA (g)	SP (g)
REF	2800	-	1400,00	11,20
NC_5	2660	201,25	1430,63	10,64
NC_10	2520	402,50	1461,25	10,08
NC_15	2380	603,75	1491,88	9,52
C_5	2660	183,75	1421,88	10,64
C_10	2520	367,50	1443,75	10,08
C_15	2380	551,25	1465,63	9,52

As lamas utilizadas são provenientes de uma estação de tratamento de águas superficiais, localizada em Santarém, Portugal. Este material com aspeto granular, de cor castanha (Figura 1A), foi primeiramente seco em estufa a 100ºC, até massa constante, e posteriormente moído num moinho de corte, da gama *Retsch sk 100* (Figura 1B), utilizando o filtro do equipamento de 2mm. O processo de moagem foi realizado por duas vezes, sendo o resíduo inserido pelo topo e recolhido no recipiente (Figura 1C). O composto que se obteve após este processo é visível na Figura 1D. Devido à natureza deste estudo, e à revisão de literatura efetuada, pretendeu-se analisar a LETA, de duas formas, uma apenas seca e moída, e outra calcinada e moída. Por este motivo, e após se obter o resíduo moído, recorreu-se a uma mufla, com capacidades de temperatura dos 600 ºC aos 1200 ºC, com o intuito de calcinar o resíduo, visando obter comportamento pozolânico e eliminar a matéria orgânica presente (Figura 1E). A temperatura adotada foi de 600ºC por 1 hora, pois, em outros estudos, provou ser a temperatura com maior benefício vs. gasto energético (Bohórquez González et al., 2020; Gastaldini et al., 2015; Godoy et al., 2019).

Figura 1 - A - Resíduo em bruto. B - Moinho de mandibulas. C - Inserção do resíduo em bruto no moinho. D - Resíduo após moagem. E - Resíduo após calcinação

A fim de produzir as respetivas caldas, seguiu-se um processo de amassadura, de forma que, todas as caldas fossem realizadas pelo mesmo procedimento, reduzindo a influência de outros fatores extrínsecos ao estudo. Primeiramente procedeu-se à mistura da cal hidráulica, do SP e da LETA, em um tabuleiro seco. Por fim verteu-se a água para a cuba de amassadura e de seguida o pó (Figura 2A), onde ambos são misturados durante cinco minutos, com o auxílio de uma misturadora (Figura 2B). Para obter os provetes prismáticos, verteu-se a calda para os moldes metálicos (Figura 2C). Seguidamente, os provetes (Figura 2D) foram mantidos até à idade de ensaio nas condições de temperatura e humidade a 16 ^{o}C± 1 ^{o}C e 60 % ± 15 %, respetivamente.

Figura 2 - A - Constituintes adicionados na água de amassadura. B - Haste misturadora. C - Moldes metálicos (4 x 4 x 16) cm^3. D - Provetes desmoldados

2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As medições reológicas realizaram-se com um reómetro rotacional *Bholin Gemini HR^{nano}*, produzido pela *Malvern Instruments*. A geometria usada foi de pratos planos com espaçamento entre pratos de 1,5mm. O programa de ensaio inicia-se com uma pré-carga, visando homogeneizar a amostra, utilizando uma taxa de corte de 0,5 s^{-1} durante 60 segundos. Seguidamente, existe um período de repouso com duração de 60 s, posteriormente são aplicadas uma gama de taxas de corte com uma variação crescente por patamares desde 0,5 s^{-1} a 400 s^{-1}, cada taxa de corte foi aplicada o tempo suficiente para se atingir o estado estacionário. O ensaio de resistência à compressão realizou-se com recurso à máquina universal de tração *Zwick Z050* com célula de carga de 50 kN e taxa de deformação

de 0,7 mm/min., cujo procedimento foi baseado na norma EN 1015-11:2019. O ensaio da porosidade aberta realizou-se de acordo com a norma NP EN 1936:2008. O ensaio de absorção de água por capilaridade, realizou-se com base na norma EN 1015-18:2002.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

A caracterização reológica é fundamental para compreender o comportamento e a adequação das caldas de injeção à sua função. As curvas de escoamento (Figura 3) demonstram que todas as caldas apresentam idêntico comportamento reofluidificante.

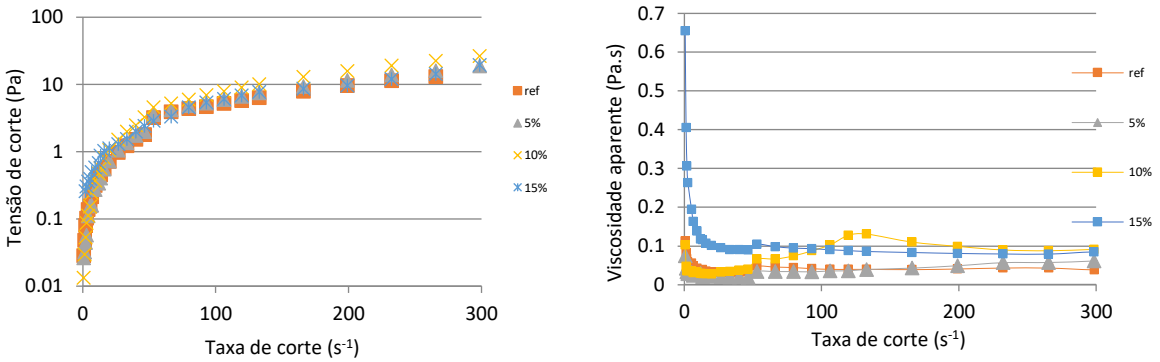


Figura 3 - Curvas de escoamento

Os resultados obtidos através das medições reológicas foram analisados por diversos modelos matemáticos e foi o modelo de Bingham modificado, que apresentou melhor ajustamento. Após o tratamento dos dados, foi possível extrair os valores da viscosidade plástica. A viscosidade plástica representa a resistência ao escoamento, quanto maior é a viscosidade, pior é o desempenho da calda, uma vez que apresenta maior resistência ao escoamento, ocorrendo de forma mais lenta.

Pela Figura 4 verifica-se que todas as composições aumentaram a viscosidade plástica, quando comparadas à calda de referência. No caso da LETA calcinada, obteve-se um desempenho inferior ao da LETA não calcinada, sendo que, para a substituição de 15% obteve-se um aumento da viscosidade de 200%, já para o caso dos 10% este aumento foi de 133%.

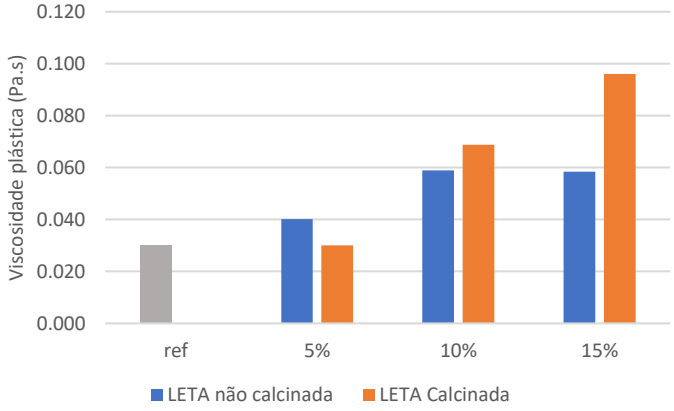


Figura 4 - Viscosidade plástica em função da dosagem de LETA

Uma possível explicação para este acontecimento pode dever-se à redução de SP. De acordo com (Baltazar et al., 2013) o uso de SP impacta significativamente na viscosidade plástica destes materiais, diminuindo-a. Por este motivo, e devido ao facto de se ter utilizado o SP em função da quantidade de ligante, pode estar em causa uma influência não só da LETA, mas conjuntamente da redução da quantidade de SP em relação à massa total do pó. Isto é, à medida que se aumentou a dosagem de LETA, diminuiu-se a dosagem de ligante e, consequentemente, a dosagem de SP, reduzindo a relação superplastificante/pó. Este facto pode ter originado uma escalada da viscosidade plástica por efeito conjunto da redução de SP e aumento da LETA. No entanto, estes resultados, por si só, não permitem esclarecer este acontecimento.

3.2 MASSA VOLÚMICA E POROSIDADE

Através da Figura 5 e 6 constata-se que, à medida que se substitui a cal hidráulica por LETA em maiores quantidades, a tendência da porosidade é diminuir, sendo esta redução mais acentuada para o caso da LETA calcinada. Pode concluir-se que existe um maior benefício na substituição do ligante por LETA calcinada quando comparado à não calcinada. Isto porque, menores valores de porosidade aberta conduzem a compacidades e resistências mecânicas mais elevadas.

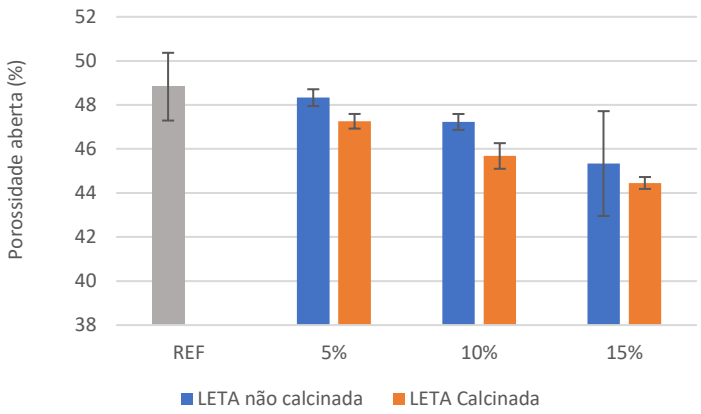


Figura 5 - Porosidade aberta em função da dosagem de LETA

Diversos estudos confirmam este fenómeno, justificando o seu efeito pela pozolanicidade verificada. Durante a cura dos provetes as reações pozolânicas modificam a estrutura interna das caldas e conduzindo a uma menor porosidade (Aly & Pavia, 2015; Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022) Já no caso da LETA não calcinada, cuja variação não é tão acentuada, a diminuição da porosidade pode advir do efeito filler deste composto, que ao preencher os vazios da cal hidráulica leva à diminuição dos poros.

No que respeita à massa volúmica (Figura 6), os valores obtidos para os provetes de referência vão ao encontro dos valores obtidos por outros estudos (Brites, 2016). É possível verificar que a adição de LETA não calcinada causa uma diminuição da massa volúmica de cerca de 70 Kg/m^3, rondando valores na casa dos 1200 Kg/m^3. No entanto, para o caso da LETA calcinada, observa-se um aumento gradual da massa volúmica, variando com a quantidade de LETA incorporada. Os valores obtidos no ensaio de porosidade aberta, no caso da LETA calcinada, refletem o aumento gradual da massa volúmica, pois à medida que a porosidade aberta diminui, a quantidade de poros também diminui, o que provoca a diminuição dos vazios e o aumento da massa volúmica.

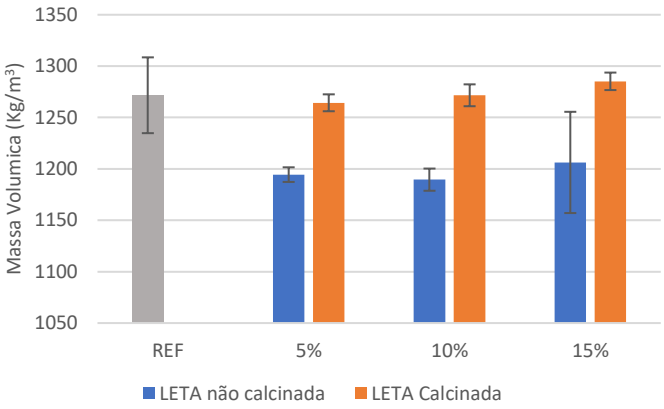


Figura 6 - Massa volúmica em função da dosagem de LETA

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 60 dias de cura (Figura 7), os provetes apresentaram um decréscimo da resistência à compressão (R.C.) conforme o aumento de percentagem de LETA não calcinada e um aumento quando se trata de maiores percentagens de LETA calcinada.

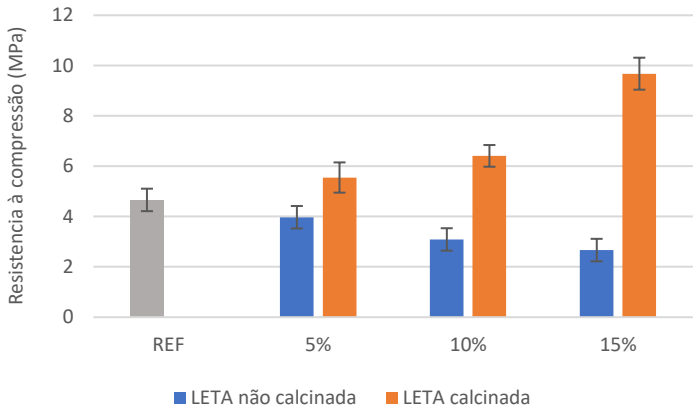


Figura 7 - Resistência à compressão em função da dosagem de LETA

Para a LETA não calcinada, é possível observar um decréscimo acentuado na resistência à compressão, quando comparado com os provetes de referência, diminuindo significativamente com os sucessivos aumentos da LETA não calcinada. Para o caso da substituição de ligante em 5% por LETA não calcinada, existe uma redução de 15 % da R.C., já para o caso de maior substituição, os 15 %, existe uma redução de 43% da R.C., fixando o seu valor em aproximadamente 2,7 MPa. Estes resultados estão em conformidade com diversos estudos que incorporam LETA não calcinada, aplicada a argamassas de cimento e a betão. O estudo realizado por (Sales & de Souza, 2009) indica que existe uma redução da R.C. a partir da inserção de 2% de lamas não calcinadas para argamassas de cimento e areia. Outro estudo realizado por (Pham et al., 2021), também realizado com argamassas de cimento, obteve uma redução da R.C. com uma substituição da areia por 5% de LETA não calcinada. Em relação às caldas com LETA calcinada, verifica-se um aumento crescente da R.C. conforme se aumentam as percentagens de substituição. Para o caso da substituição por 5% existiu um aumento de 19% da R.C., no caso dos 10% um aumento de 38% e para o caso de 15% substituição em volume do ligante, existiu

um aumento de 108% de R.C., fixando o seu valor em cerca de 9,7 MPa. Diversos estudos relatam estes aumentos quando se trata de substituição parcial do ligante em betões, obtendo melhorias de R.C. para percentagens de substituição de 15% no caso de (Hagemann et al., 2019) e de 25% no caso de (Gastaldini et al., 2015). Outros estudos, com foco em argamassas à base de cimento, revelam que 10% de substituição do ligante oferece as melhores R.C. (Bohórquez González et al., 2020; Duan et al., 2020; He et al., 2021). Quando se compara a LETA não calcinada com a calcinada revela-se de forma inequívoca que o desempenho da LETA calcinada é substancialmente melhor. Este ensaio evidencia a existência de pozolanicidade da LETA calcinada, decorrente da sílica e alumina amorfa presente na LETA conforme referido por (Hagemann et al., 2019) no âmbito de um estudo com betão estrutural.

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A redução da absorção de água por capilaridade é um fenómeno bastante relevante na consolidação das alvenarias, uma vez que a água esta diretamente ligada a mecanismos de degradação dos constituintes das alvenarias. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade revelam que as caldas realizadas com LETA não calcinada absorvem uma maior quantidade de água e de forma mais repentina, do que as de referência e que as de LETA calcinada. Para a LETA não calcinada, observa-se (Figura 8) um aumento do coeficiente de capilaridade em relação as caldas de referência, de 14% e 26%, para as percentagens de substituição de ligante de 5% e 15%, respetivamente. Em contraste com estes resultados, o coeficiente de capilaridade para a LETA calcinada, quando comparada com as caldas de referência, apresenta uma diminuição de 40,5 e 87%, igualmente para substituições de ligante de 5 e 15 %, respetivamente.

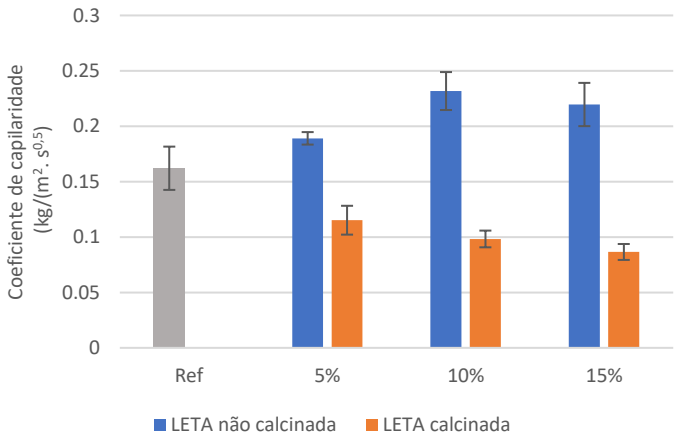


Figura 8 - Coeficiente de Capilaridade em função da dosagem de LETA

Outros estudos obtiveram resultados semelhantes, para o caso da LETA calcinada, (Duan et al., 2020) refere que em argamassas à base de cimento, com uma substituição do ligante de 20%, houve uma redução da capilaridade de cerca de 100%, quando comparado as argamassas de referência. Já para o caso da LETA não calcinada, (Liu et al., 2020; Pham et al., 2021) demonstram a mesma tendência observada neste estudo, em que o aumento da incorporação de LETA não calcinada resulta num aumento da absorção de água por capilaridade.

4 CONCLUSÕES

A percentagem de substituição de 5% de LETA não calcinada obteve resultados que, embora pouco benéficos, não são suficientes para descartar o seu uso. Desta forma, mais estudos necessitam de ser

realizados de forma a averiguar o uso da LETA não calcinada em caldas de cal hidráulica, por exemplo, uma maior gama de dosagens e temperaturas de calcinação. As percentagens de 10% e 15% de LETA não calcinada, apresentam efeitos nefastos para as propriedades frescas e endurecidas e por esse motivo, para as caldas em estudo, não parece existir vantagens no seu uso. No caso da LETA calcinada, a percentagem de 5% apresenta efeitos benéficos, tanto para a calda no estado fresco como para o estado endurecido, obtendo uma melhoria de 19% na resistência à compressão e 29% na absorção de água por capilaridade, sendo que, a absorção de água por capilaridade ocorreu de forma mais lenta. Para percentagens mais elevadas, o cenário acentua-se, com resultados ainda mais expressivos, à exceção da viscosidade plástica, que a partir da dosagem de 10% revela um aumento que embora acentuado (130%), porém de acordo com valores de viscosidades plásticas obtidos por outros estudos, continuando a permitir a sua injeção. Considerando o comportamento reológico um aspeto importante para caldas de injeção, sugere-se por isso que em trabalhos futuros seja aferida se alteração desfavorável na reologia se deve à redução real do superplastificante ou devido à presença da LETA. Sugere-se igualmente que se realizem no futuro ensaios de aderência e injeção destas caldas em diferentes meios porosos.

.

REFERÊNCIAS

Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. In Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073

Aly, M., & Pavia, S. (2015). Mechanical and hygric properties of natural hydraulic lime (NHL) mortars with pozzolans. Third Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54701340

Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., & Cidade, M. T. (2013). The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls. Rheologica Acta, 52(2), 127–138. https://doi.org/10.1007/s00397-013-0674-x

Becerra-Duitama, J. A., & Rojas-Avellaneda, D. (2022). Pozzolans: A review. Engineering and Applied Science Research, 49(4), 495–504. https://doi.org/10.14456/easr.2022.49

Brites, P. (2016). Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de pastas de cal hidráulica na presença de sílica de fumo hidrofóbica. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil]. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de ciências e tecnologias

Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. Materials Today Communications, 23. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930

Duan, W., Zhuge, Y., Pham, P. N., Chow, C. W. K., Keegan, A., & Liu, Y. (2020). Utilization of drinking water treatment sludge as cement replacement to mitigate alkali–silica reaction in cement composites. Journal of Composites Science, 4(4). https://doi.org/10.3390/jcs4040171

Gastaldini, A. L. G., Hengen, M. F., Gastaldini, M. C. C., Do Amaral, F. D., Antolini, M. B., & Coletto, T. (2015). The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. Construction and Building Materials, 94, 513–520. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038

Godoy, L. G. G. de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Costa, E. B. da, Da Dalt, S., & Andrade, J. J. de O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. Construction and Building Materials, 223, 939–950. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333

Hagemann, S. E., Gastaldini, A. L. G., Cocco, M., Jahn, S. L., & Terra, L. M. (2019). Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. Journal of Cleaner Production, 214, 916–926. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324

He, Z., Yang, Y., Yuan, Q., Shi, J. yan, Liu, B. ju, Liang, C. feng, & Du, S. gui. (2021). Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. Journal of Cleaner Production, 290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125832

Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020). Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. Journal of Environmental Management, 262. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110352

Miltiadou-Fezans, A., & Tassios, T. P. (2013). Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening. Materials and Structures, 46(10), 1631–1652. https://doi.org/10.1617/s11527-012-0003-3

Pham, P. N., Duan, W., Zhuge, Y., Liu, Y., & Tormo, I. E. S. (2021). Properties of mortar incorporating untreated and treated drinking water treatment sludge. Construction and Building Materials, 280. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122558

Sales, A., & de Souza, F. R. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. Construction and Building Materials, 23(6), 2362–2370. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001

Valluzzi, M. R., Da Porto, F., & Modena, C. (2004). Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls. In Materials and Structures 37, 184–192. https://doi.org/10.1007/BF02481618

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BIOMIMÉTICA NA ENGENHARIA CIVIL: DESENVOLVIMENTO DE ECO-MATERIAIS POROSOS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES E SUSTENTABILIDADE

Joaquim Constantino[a]; J. Castro-Gomes[b] ; Alexandre Silva de Vargas[c] Elsa Vizier[d]

[a]Centre of Materials and Building Technologies (C–MADE), Department of Civil Engineering and Architecture, University of Beira Interior (UBI), Covilhã, Portugal. Email: joaquim.constantino@ubi.pt
[b]Centre of Materials and Building Technologies (C–MADE), Department of Civil Engineering and Architecture, University of Beira Interior (UBI), Covilhã, Portugal. Email: castro.gomes@ubi.pt.
[c]Departamento de Estruturas e Construção Civil, Univ. Federal de Santa Maria, Brasil. Email: alexandre.vargas@ufsm.br
[d]Bio-inspired R&I, Bioxegy, Paris, França, Email: elsa.vizier@bioxegy.com

RESUMO

Este estudo propõe a biomimética como uma estratégia inovadora para replicar processos e princípios dos ecossistemas naturais, na criação de materiais ecológicos para a construção civil. Esta abordagem visa reduzir a poluição e o desperdício, alinhar a engenharia civil com os objetivos de sustentabilidade e contribuir para a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa. O objetivo central é demonstrar a aplicação da biomimética no desenvolvimento de eco-materiais porosos, com foco na sua viabilidade e eficácia. Os materiais foram desenvolvidos utilizando uma combinação de óxido de magnésio (MgO) e biochar, submetidos a um processo de carbonatação acelerada (ACC). Os resultados experimentais mostraram que a combinação de MgO e biochar produz materiais com uma porosidade suficiente para promover a entrada de CO2, facilitando o processo de carbonatação. A análise de intrusão de mercúrio (MIP) revelou que a estrutura porosa resultante é adequada para essa finalidade. Os provetes cúbicos da escoria e do magnésio atingiram uma resistência média à compressão de 3,58MPa e 71,18MPa. No entanto, a combinação de escória de forno elétrico a arco (EAFS) e biochar embora tenha menor resistência, apresentam resultados significativos na porosidade, sugerindo que os materiais desenvolvidos possuem potencial para aplicações em engenharia civil, tais como isolamento térmico, materiais de enchimento leve e substratos para betão poroso.

PALAVRAS-CHAVE

Biomimética; Eco-materiais Porosos: Engenharia Civil Sustentável; Inovação em Materiais de Construção; Carbonação, Materiais Absorventes de Carbono

1 INTRODUÇÃO

Em face da crise climática emergente, a indústria da construção civil, enfrenta a necessidade de adotar materiais sustentáveis, especialmente considerando as projeções que apontam para um aumento de resíduos de construção e demolição (Masuero, 2021).

Neste contexto, a biomimética surge como uma solução promissora. A biomimética é um método de inovação que consiste em inspirar-se na engenhosidade dos organismos vivos para imaginar, conceber e desenvolver tecnologias sustentáveis. Repensando totalmente a nossa abordagem através desta perspetiva, podemos revolucionar o setor da construção (Tamayo et al., 2023).

Dois elementos podem nos ajudar a adotar essa mentalidade. O primeiro é que, na natureza, a noção de desperdício não existe; todo produto é útil para algum organismo, estabelecendo a base para a economia circular. O segundo é que a natureza tende a otimizar e ser eficiente em recursos e energia. Dessa forma, ela é capaz de produzir materiais multifuncionais com pouca energia, otimizando suas estruturas para minimizar a quantidade de material, mantendo ao mesmo tempo alta resistência mecânica.

Este estudo tem como objetivo, demonstrar como a biomimética pode ser uma ferramenta aplicada para desenvolver eco-materiais porosos, com foco na viabilidade e eficácia, visto que um dos principais emissores de CO2 a nível mundial é a indústria de construção. Por exemplo, a produção de uma tonelada de cimento emite aproximadamente 900kg de CO2. Come a producao massiva actual, esta representa 5 a 7% de total das emissões globais de CO2 (Tamayo et al., 2023).

A importância da inovação sustentável é vista como promissora. No estudo (Roychand et al., 2023) foram utlizados 10, 20 e 30% por volume de biochar na mistura de betão em substituição de agregado fino, melhorando 63,9% e 45,6% na resistência à compressão aos 7 dias.

Em outro estudo (Jaramillo et al., 2023) caracteriza a casca de café, como uma alternativa potencial para a construção sustentável de alvenaria não estrutural. Utiliza técnicas de microscopia eletrónica de varredura (SEM) para observar as microfissuras internas, faz análises químicas, determina a composição, e conclui que a casca de café apresenta uma humidade de 13,3%, em tamanho médio de partícula de 611,93 µm,(Jaramillo et al., 2023).

O estudo de revisão de (Ha & Lu, 2020) aborda que os ossos de animais são potenciais candidatos para inspirar o desenvolvimento de novos materiais resistentes em projetos de engenharia, uma vez que, além de serem resistentes, atuam como absorvedores de energia durante colisões com outros objetos.

A investigação do (Mi et al., 2023), demostra que os corais podem ser utilizados como agregados para sequestro de CO2 e, fixar no CaCO3 nos poros.

Na revisão de (Ahamed et al., 2022), é fornecida uma visão global sobre materiais inspirados na natureza aplicáveis a edifícios e estruturas civis, abrangendo desde compostos cimentícios, sistemas de fachada para controlo de temperatura, humidade e luz, até ao uso de técnicas de fabrico avançadas para produzir estruturas biomiméticas complexas 3D.

A relação entre o tamanho e a força de dois materiais biológicos porosos, o endocarpo do coco e as espinhas do ouriço-do-mar Heterocentrotus mamillatus é avaliado pelo (Lauer et al., 2018), onde é analisado a distribuição de falhas da teoria de Weibull, sugerindo a compreensão dessas relações possa

fornecer contribuição para design bioinspirado de materiais e estruturas com propriedades mecânicas superiores (Lauer et al., 2018).

Segundo (Siddique et al., 2022), as estruturas porosas bioinspiradas, oferecem propriedades mecânicas superiores para aplicações de absorção de energia de impacto, permite a criação de materiais com padrões complexos inspirados em processos biológicos.

(Zhou et al., 2021) relatam que os agregados de coral possuem estruturas porosas e características de baixa resistência. Essas propriedades são distintas em comparação com o betão convencional. O betão de agregado de coral apresenta-se como uma solução promissora para os desafios relacionados à corrosão do aço, contribuindo para a melhoria da durabilidade e resistência de estruturas em ambientes agressivos (Zhou et al., 2021).

O conceito de biomimética foi introduzido por Otto Schmitt em 1950, como o estudo da formação, estrutura ou função de substâncias e materiais produzidos biologicamente (Siddique et al., 2022).

A biomimética tem se destacado na engenharia e no projeto arquitetónico, o seu objetivo aplicar-se em soluções funcionais da natureza para resolver problemas técnicos (Sommese et al., 2022).

A biomimética inspira a engenharia e a arquitetura de três maneiras: organismo (imitação da natureza), comportamento (imitação de processos naturais) e níveis de ecossistema (imitação dos princípios de funcionamento dos ecossistemas), são os três elementos essenciais da biomimética (emular, (re)conectar e ética projetual) (Jamei & Vrcelj, 2021).

A figura 1, ilustra como podemos explorar a emulação, uma prática científica inerente à biomimética. Esta baseia-se numa metodologia de investigação focada na extração de princípios biológicos para a sua subsequente aplicação em soluções de engenharia. Assim, constitui-se como uma ferramenta imprescindível para o desenvolvimento de eco-materiais inspirados, como demonstrado neste estudo que utiliza biochar derivado de madeira.

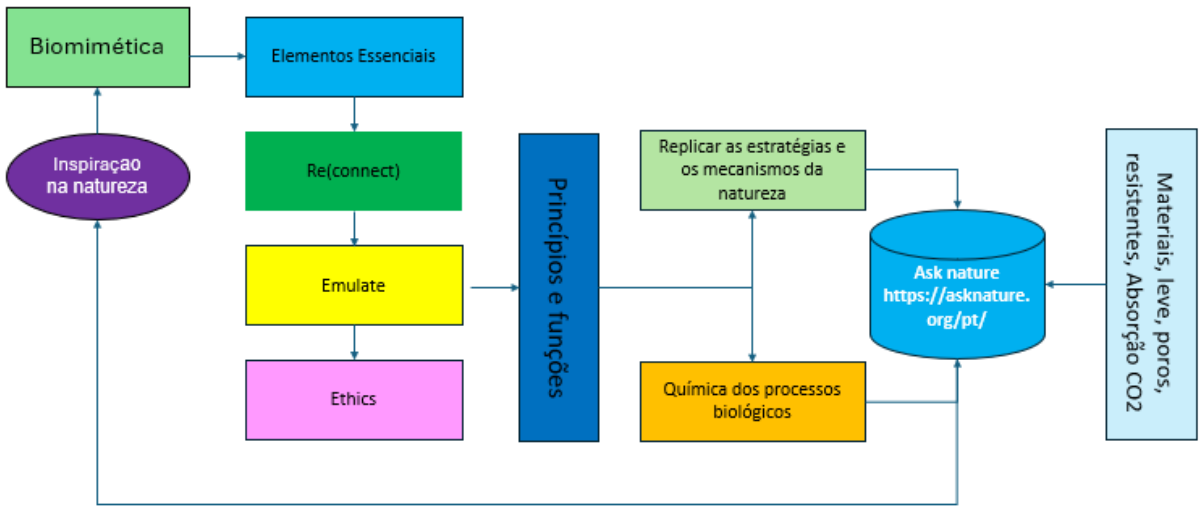


Figura 1: O fluxograma descreve o processo de aplicação da biomimética na engenharia. Inicia-se com a identificação de estruturas biológicas inspiradoras, avançando para os pilares da biomimética: (re)conectar, emular e ética. Estas etapas conduzem à emulação de princípios e funções biológicas em soluções de engenharia, focando em inovações como materiais leves, resistentes, porosos ou com capacidade de absorção de CO2, apoiadas por uma base de dados especializada: https://asknature.org/pt/

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O biochar derivado de madeira (Wood-Based Biochar - WBC) utilizado foi adquirido da empresa Kool Nature, integrante da Aleatory Concept, LDA, com sede em São Paio do Mondego, Portugal. O produto é comercializado sob a designação de Biocarvão, é produzido conforme a norma EN 1860-2, através da pirólise de acácia totalmente proveniente de fontes portuguesas, refletindo sua origem sustentável e sua contribuição para o equilíbrio ecológico.

A Magnésia Reativa (r-MgO), comercializada sob o nome "Calcined Magnesite 92/200", foi fornecida pela Richard Baker Harrison Ltd., de Liverpool, Inglaterra(Grünhäuser Soares & Castro-Gomes, 2022). A sua reatividade registou-se em 48 segundos,(Shand, 2006) o que a classifica como magnésia de reatividade média (Jin & Al-Tabbaa, 2014).

A EAF-Escória, recebida na forma de agregados provenientes da indústria siderúrgica nacional da Maia e da Aldeia de Paio Pires, Seixal, foi inicialmente seca durante 24 horas numa estufa à temperatura de 60 °C. Posteriormente, os agregados de EAF-Escória foram triturados num moinho de disco vibratórios RS 300 da Retsch para serem transformados em pó.

Por fim, o pó de EAF-Escória foi peneirado para obter tamanhos de partículas inferiores a 125 µm. Considerando o aspeto prático de peneirar cada resíduo no contexto de uma aplicação industrial, foi considerada adequada uma fração retida inferior a 150 µm para a EAF-Escória. Para estar em conformidade com as normas NP EN 933-1 e utilizar uma granulometria adequada ao tamanho dos provetes, apresentam-se na Figura 2 os ensaios de análise granulométrica(Humbert et al., 2019; Sedira & Castro-Gomes, 2020).

O agregado miúdo utilizado consistiu em areias siliciosas para construção, obtida por britagem de materiais naturais provenientes de pedreira. Este material foi fornecido pela Tabal-Sepor Areias e Argamassas LDA, localizada em Salvaterra de Magos, Portugal.

A análise granulométrica revelou que a areia apresentou diâmetros variando de 0 mm a 2 mm, com um diâmetro médio das partículas (D50) de aproximadamente 1 mm e um coeficiente de uniformidade (Cu) estimado em 2,5. A composição dos óxidos das matérias-primas que constituem os ligantes são apresentados na tabela 1.

O Magnésia Reativa (r-MgO), foi estudada por (Grünhäuser Soares & Castro-Gomes, 2022). A análise foi efetuada através da espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX) utilizando o espectrómetro S-3400N da Hitachi, Tóquio, Japão. A escória (EFA) foi estudada por (Humbert et al., 2019), tendo a sua composição sido determinada pela análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). As análises permitiram constatar que a escória é rica em cálcio (CaO), ferro (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), além de conter outros óxidos menores.

Tabela 1. Composição do óxido.

Matéria-prima	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	AS	Cl-	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3
r-MgO	-	93.3	-	1.6	-	-	-	3.5	-	-	-	1.6
EAFS		5.58	12.00	14.18	-	-	-	-	30.21	-	-	29.51

A tabela 2, apresenta as propriedades físicas das matérias-primas, descrita no estudo de (Grünhäuser Soares & Castro-Gomes, 2022), nomeadamente a densidade real, a finura de Blaine e a perda por ignição (LOI). A densidade real foi determinada utilizando um picnómetro de deslocamento de gás hélio (AccuPyc 1330, Micromeritics, Norcross, GA, EUA). A finura de Blaine dos pós (r-MgO) foi estabelecida com recurso a um aparelho de permeabilidade ao ar Blaine (BSA1, Acmel Labo, Champlan, França). O LOI foi obtido mediante análise termogravimétrica e termogravimétrica diferencial (TG-DTG) (SDT Q-50, TA Instruments, New Castle, DE, EUA). A escória foi estudada por (Humbert et al., 2019), pós que passaram por peneira de 45 µm, apresentando densidade de 3,771 g/cm³, e índices de finura de Blaine de 529 m²/kg.

Tabela 2. Propriedades físicas.

Matéria-prima	Densidade (g/cm³)	Finura Blaine (cm²/g)	LOI (%) a 1000°C
r-MgO	3,50	6263	10.4
EFA	3,771	529	7.5

2.2. Design de mistura e produção de amostras

A composição das misturas encontra-se detalhada na Tabela 3 e 4., compreendendo duas proporções distintas, nas quais cada uma inclui uma relação de volume de ligante para areia de 1:3 e uma proporção em massa de água para sólidos no ligante de 0,10. Os principais ligantes são constituídos por Escória (S1) e r-MgO(M2).

Cinco provetes cúbicos com arestas de 40 mm foram fabricados para cada composição de mistura, seguindo a metodologia: a argamassa preparada foi vertida moldes e, compactada sob uma pressão estática de compactação de 30 MPa. Uma vez atingido o nível de compactação pretendido, a pressão foi mantida durante 120 segundos para garantir uma compactação uniforme e um melhor assentamento das partículas (Grünhäuser Soares & Castro-Gomes, 2022; Humbert et al., 2019). Depois, os provetes foram extraídos dos moldes por extrusão, procedendo-se à medição da massa com uma balança eletrónica RADWAG PS 6100.R2.M, fabricada na Polónia. Os provetes foram então conservados numa caixa de cura húmida para manter a humidade enquanto os restantes eram preparados.

Foi utilizada uma câmara pressurizada com uma capacidade de aproximadamente 75 litros e aplicada uma pressão inicial de vácuo parcial de 0,2 bar, onde os provetes cúbicos foram submetidos a um período de cura por carbonatação acelerada (ACC) durante 24 horas, sob condições atmosféricas

controladas: concentração de CO2> 99%; pressão parcial de CO2 = 0,9 bar; temperatura ± 60°C; humidade relativa (HR) > 99%. Após o período de ACC, as amostras foram colocadas numa estufa a uma temperatura de 60 ˚C durante 24 horas para estabilizar as reações químicas e a estrutura interna, bem como para reduzir a humidade. No final, foram conservadas em condições ambientais húmidas (temperatura de 20 ± 2 °C; humidade relativa de 80 ± 2 %) durante sete dias, após os quais os provetes foram submetidos a testes de resistência à compressão.

Tabela 3. Composição de misturas S1.

Mistura S1	*Volume de Sólidos*			
	Binder	Agregados fino	Rácio água/sólido	Água (g)
Proporções = 1:3:0 - w/s = 0,1	1	3	10,0%	17,46
Volume (%)	25%	75%		
Ligante	Densidade	Massa	Volume	
	(g/cm³)	(%)	(%)	(cm³)
EAF-Slag	3,82	35,00%	25,0%	16,00
	Subtotal	35,00%	25,0%	16,00
Agregados finos	Densidade	Massa	Volume	
	(g/cm³)	(%)	(%)	(cm³)
Sand	2,64	62,80%	65%	41,60
Biochar	0,60	2,20%	10%	6,40
	Subtotal	65,00%	75%	48,00

Tabela 4. Composição de misturas M2.

Mistura M2	*Volume de Sólidos*			
	Binder	Agregados fino	Rácio água/sólido	Água (g)
Proporções = 1:3:0 - w/s = 0,1	1	3	10,0%	16,94
Volume (%)	25%	75%		
Ligante	Densidade	Massa	Volume	
	(g/cm³)	(%)	(%)	(cm³)
r-MgO	3,50	33,01%	25,0%	16,00
	Subtotal	33,01%	25,0%	16,00
Agregados finos	Densidade	Massa	Volume	
	(g/cm³)	(%)	(%)	(cm³)
Sand	2,64	64,72%	65%	41,60
Biochar	0,60	2,27%	10%	6,40
	-	0,00%	0%	-
	Subtotal	66,99%	75%	48,00

2.3. Abordagem Biomimética

A figura 2, mostra como a ciência que estuda os modelos da natureza e os aplica na resolução de problemas humanos, serviu de base para este estudo. Inspiramo-nos na estrutura porosa dos ossos e na capacidade de captura de carbono dos corais para desenvolver materiais de construção com alta

porosidade e eficiência energética. Para replicar a estrutura porosa dos ossos, utilizamos uma combinação de biochar derivado de madeira e óxido de magnésio (r-MgO). A análise microscópica da estrutura óssea revelou uma distribuição de poros que foi imitada na formulação do nosso material. A técnica de cura por carbonatação acelerada (ACC) foi aplicada para simular os processos naturais de captura de carbono dos corais. Durante este processo, os provetes foram expostos a uma atmosfera rica em CO2, permitindo que o carbono fosse fixado na matriz do material. Utilizamos microscopia eletrónica para estudar a estrutura dos materiais naturais e adaptar esses padrões na formulação dos eco-materiais desenvolvidos. A análise de intrusão de mercúrio (MIP) foi utilizada para avaliar a porosidade, enquanto a análise termogravimétrica (TG) avaliou a quantidade de CO2 absorvido.

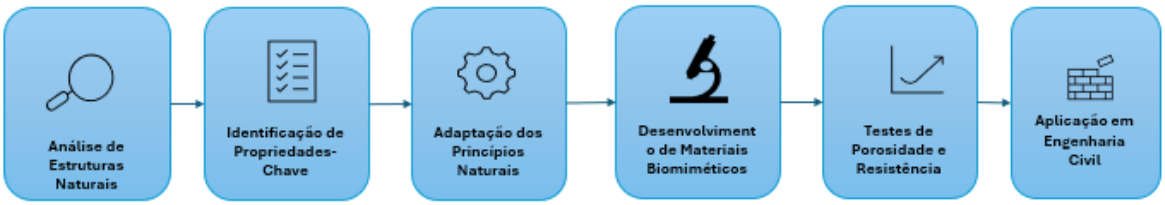


Figura 2: Fluxograma da Abordagem Biomimética que mostra a análise de uma estrutura natural, identificação de propriedades-chave, e replicação nos materiais desenvolvidos.

2.4 Avaliação das argamassas

O pó das matérias-primas r-MgO, EAFS e WBC foram submetidos à distribuição granulométrica por sistema de análise de tamanho de partículas a laser Bettersize, versão 8.20 – modelo Bettersizer 2600. A Figura 2 mostra as curvas de distribuição granulométrica, com tamanhos específicos de diâmetro maiores de EAFS D90.

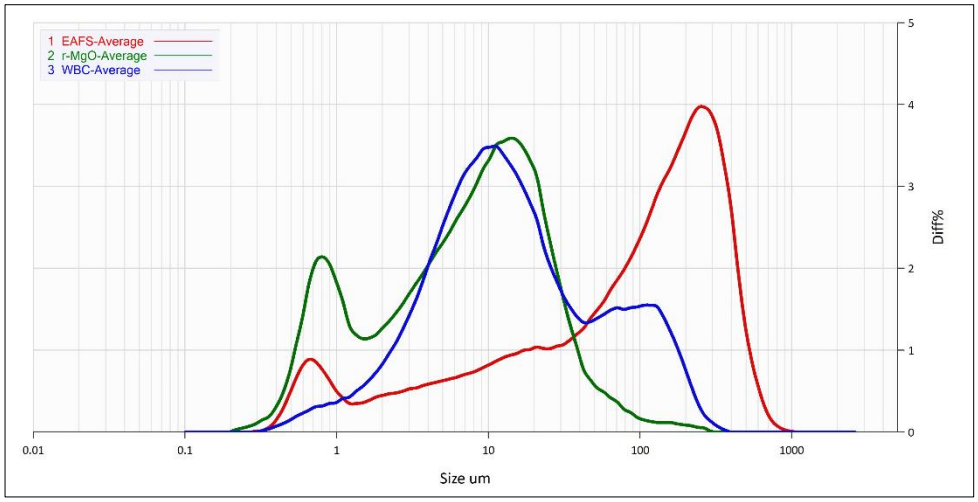


Figura 2. Distribuição granulométrica.

Para os ensaios de resistência à compressão, recorreu-se a uma máquina de compressão com leitura digital e placas autocentrantes, operada a uma taxa de carga constante de 1,35 kN/s (ADR Touch 3000 BS EN, ELE International, Leighton Buzzard, Reino Unido).

O material analisado foi recolhido para subsequentes investigações das microestruturas (análises TG-DTG e FTIR). As análises por intrusão por mercúrio (MIP) foram efetuadas com recurso a um porosímetro de mercúrio (AutoPore IV 9500, Micromeritics, Norcross, GA, EUA), aplicando-se pressões

máximas e mínimas de cerca de 4.45000 e aproximadamente 0,53 psia respectivamente. Estas condições permitiram determinar tamanhos de poros mínimos de 2 nm e máximos de 341 µm. Foi aplicada uma tensão superficial de mercúrio de 485 mM/m e o ângulo de contacto mercúrio-sólido para intrusão e extrusão foi de 130°. Fragmentos de amostra, com uma gama de massas de 1,2951g e 1,6838g, foram obtidos por serragem das amostras através de multi-ferramenta rotativa sem fio black+decker de 7,2v, as mesmas não foram submetidas ao teste de resistência à compressão, a fim de obter dados mais precisos para a análise MIP (Grünhäuser Soares et al., 2023). Estes fragmentos foram armazenados no exsicador contendo sílica gel por 24h.

As análises de TG-DTG foram realizadas entre 20 à 1000 °C, a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, em atmosfera de nitrogênio (SDT Q-50, TA Instruments, New Castle, DE, EUA). O material ensaiado consistiu em cerca de 5 mg de partículas que passaram por uma peneira de 63 µm, submetidas inicialmente a uma fase de secagem de 24 horas a 60 °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resistência à compressão

Os resultados médios da resistência à compressão apresentaram valores para a mistura r-MgO e WBC, onde os provetes cúbicos atingiram uma resistência média à compressão de 71,18MPa. A Figura 4 mostra a variação desses valores. Por outro lado, a mistura EAFS e WBC obteve a media dos resultados 3,58MPa.

Observou-se um ligeiro aumento na massa dos provetes de r-MgO e WBC após o período de cura por carbonatação acelerada (ACC) de 24 horas, o que pode ser atribuído à absorção de dióxido de carbono (CO_2) e subsequente formação de carbonatos na matriz do material. Em contraste, os provetes de EAFS e WBC apresentaram uma diminuição na massa, possivelmente devido à desidratação ou à libertação de gases durante o processo de carbonatação. Quando submetidos à estufa por 24 horas, ambos os tipos de provetes registaram uma perda de massa, indicando a evaporação de água ou outros voláteis presentes nas misturas. A Figura 5, mostra esta variação dos resultados.

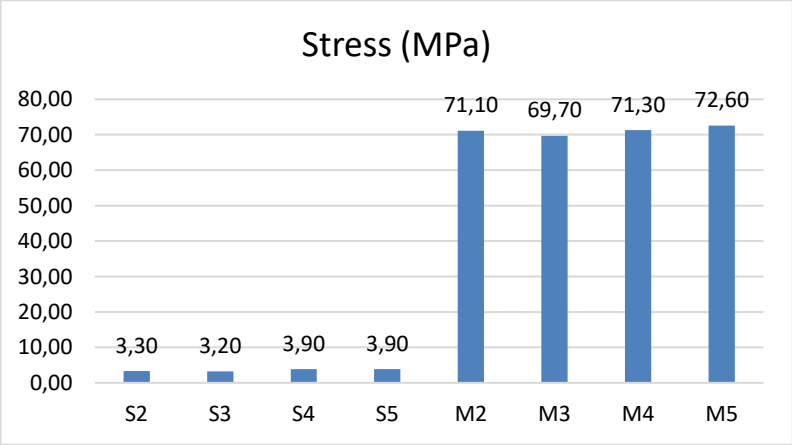


Figura 4. Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

3.2. Análise termogravimétrica - TG-DTG

A análise termogravimétrica e calorimétrica diferencial de varrimento (TGA-DSC) na Figura 6, observa que óxido de magnésio reativo (r-MgO) teve uma redução significativa na massa entre 300°C e 700°C, indicativa de perda de água e possivelmente de dióxido de carbono.

O perfil DSC identificou dois eventos endotérmicos principais aos 360°C e 600°C, correspondentes a processos de desidratação e decomposição, respectivamente. Posteriormente, a estabilidade térmica foi assegurada até 1000°C, evidenciando a adequação do r-MgO para aplicações de alta temperatura devido à sua resistência à decomposição.

Os dados de EAF-Escória revelaram uma perda de massa de cerca de 2% entre 700°C e 900°C, provavelmente devido à desidratação ou volatilização de componentes. Um pico endotérmico significativo próximo aos 950°C, identificado na análise DSC, sugere uma reação de transformação de fase ou decomposição.

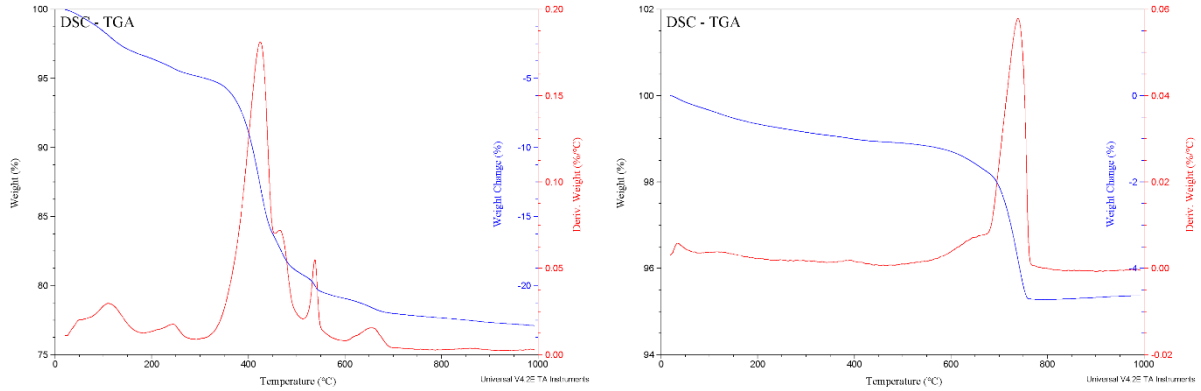


Figura 6. Curvas TG e DTG de r-MgO (esquerda) e EAFS (direita).

3.3. Porosimetria de Intrusão de Mercúrio – MIP

A porosidade e outros parâmetros obtidos ao longo da análise MIP de r-MgO e EAFS estão resumidos na Tabela 4 e mostrados na Figura 7.

Tabela 4. Porosidade e outros parâmetros de EAFS e r-MgO

Parâmetro	S1	M2
Porosidade:	26,5612 %	16,3968 %
Densidade aparente	14,50 psia (g/mL): 2,3147 g/mL	14,50 psia = 1,9099 g/mL
Densidade aparente (esquelética) (g/mL):	2,7716 g/mL	2,2491 g/mL
Área Total dos Poros:	4,276 m²/g	6,380 m²/g
Volume Total de Intrusão	0,1305 mL/g	0,0872 mL/g
Área Superficial BET	230,0000 m²/g	230,0000 m²/g

O gráfico da direita, referente ao r-MgO, evidencia que a curva de intrusão também começa a subir significativamente a partir de aproximadamente 10 µm, de forma similar ao EAFS. No entanto, a quantidade de mercúrio intrusado é menor em comparação com o EAFS, indicando que o r-MgO possui uma menor porosidade ou poros de menor dimensão e volume. A curva de extrusão segue um padrão semelhante ao da intrusão, com uma histerese inferior, possivelmente devido a uma estrutura de poros mais uniforme. Os dois gráficos revelam diferenças significativas na estrutura porosa dos materiais. O EAFS demonstra uma maior quantidade de poros grandes, o que pode ser vantajoso para aplicações que requerem alta permeabilidade. Por outro lado, o r-MgO apresenta uma menor porosidade, o que pode ser benéfico para aplicações que necessitam de materiais mais densos e com menor permeabilidade.

A histerese observada nas curvas de extrusão indica que ambos os materiais possuem uma estrutura de poros complexa, porém o EAFS apresenta uma maior variação na distribuição dos tamanhos de poros.

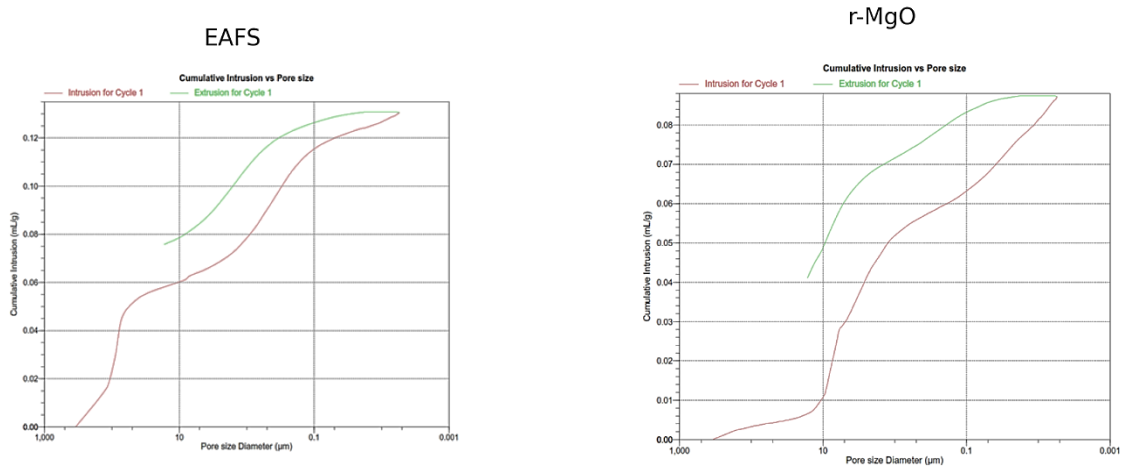


Figura 7. O EAFS mostra maior porosidade e variação de tamanho de poros, enquanto o r-MgO apresenta menor porosidade e histerese.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia da biomimética na criação de eco-materiais porosos na engenharia civil, utilizando uma combinação de óxido de magnésio (MgO) e biochar, submetidos ao processo de carbonatação acelerada (ACC). A mistura de EAFS e r-MgO atingira uma resistência média à compressão de 3,58MPa e 71,18MPa.

A porosidade obtida, foi 26,52 % para EAFS e 16,39 % para r-MgO, foi suficiente para facilitar a entrada de CO2, promovendo uma carbonatação eficiente e contribuindo para a estabilidade do material. No entanto, a combinação de escória de forno elétrico a arco (EAFS) e biochar apresentou poros significativa.

Aplicação da biomimética no desenvolvimento de eco-materiais por carbonatação acelerada na engenharia civil, apresentam potencial para aplicações em engenharia civil, como isolamento térmico, materiais de enchimento leve e substratos para betão poroso. Além disso, a utilização de biochar e a captura de CO2 através da carbonatação acelerada mostram uma abordagem sustentável, contribuindo para práticas de construção mais ecológicas.

REFERÊNCIAS

Ahamed, M. K., Wang, H., & Hazell, P. J. (2022). From biology to biomimicry: Using nature to build better structures – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 320). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126195

Grünhäuser Soares, E., & Castro-Gomes, J. (2022). The role of biomass bottom ash in Carbonated Reactive Magnesia Cement (CRMC) for CO2 mineralisation. *Journal of Cleaner Production*, *380*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135092

Grünhäuser Soares, E., Castro-Gomes, J., & Magrinho, M. (2023). *The Influence of Casting Static Compaction Pressure on Carbonated Reactive Magnesia Cement (CRMC)-Based Mortars*. 5. https://doi.org/10.3390/materproc2023013005

Ha, N. S., & Lu, G. (2020). A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 181). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496

Humbert, P. S., Castro-Gomes, J. P., & Savastano, H. (2019). Clinker-free CO 2 cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*, *210*, 413–421. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169

Jamei, E., & Vrcelj, Z. (2021). Biomimicry and the built environment, learning from nature's solutions. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 16). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/app11167514

Jaramillo, H. Y., Vasco-Echeverri, O., & Camperos, J. A. G. (2023). Characterization of the Coffee Husk: A Potential Alternative for Sustainable Construction. *Civil Engineering and Architecture*, *11*(4), 1902–1908. https://doi.org/10.13189/cea.2023.110418

Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2014). Characterisation of different commercial reactive magnesia. *Advances in Cement Research*, *26*(2), 101–113. https://doi.org/10.1680/adcr.13.00004

Lauer, C., Schmier, S., Speck, T., & Nickel, K. G. (2018). Strength-size relationships in two porous biological materials. *Acta Biomaterialia*, *77*, 322–332. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.07.010

Masuero, A. B. (2021). Challenge of Civil Construction: growth with environmental sustainability. In *Revista Materia* (Vol. 26, Issue 4). Universidade Federal do Rio de Janeiro. https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.13123

Mi, R., Yu, T., & Poon, C. S. (2023). Feasibility of utilising porous aggregates for carbon sequestration in concrete. *Environmental Research*, *228*. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115924

Roychand, R., Li, J., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Zhu, J., Youssf, O., & Ngo, T. (2023). Carbon sequestration from waste and carbon dioxide mineralisation in concrete – A stronger, sustainable and eco-friendly solution to support circular economy. *Construction and Building Materials*, *379*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131221

Sedira, N., & Castro-Gomes, J. (2020). Alkali-Activated Binders Based on Tungsten Mining Waste and Electric-Arc-Furnace Slag: Compressive Strength and Microstructure Properties. *CivilEng*, *1*(2), 154–180. https://doi.org/10.3390/civileng1020010

Shand, M. A. (2006). *The chemistry and technology of magnesia*. Wiley-Interscience.

Siddique, S. H., Hazell, P. J., Wang, H., Escobedo, J. P., & Ameri, A. A. H. (2022). Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption – A review. In *Additive Manufacturing* (Vol. 58). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103051

Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 169). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850

Tamayo, P., Angel, G. G. del, Setién, J., Soto, A., & Thomas, C. (2023). Feasibility of silicomanganese slag as cementitious material and as aggregate for concrete. *Construction and Building Materials*, *364*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129938

Zhou, W., Feng, P., & Yang, J. Q. (2021). Advances in coral aggregate concrete and its combination with FRP: A state-of-the-art review. *Advances in Structural Engineering*, *24*(6), 1161–1181. https://doi.org/10.1177/1369433220968429

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REOLOGIA DE PASTAS CIMENTÍCIAS CONTENDO ADITIVOS ORGÂNICOS SUSTENTÁVEIS

Wesley Fêu dos Santos[a], Ilana Maria da Silva Barros[b], Tayná Chaves Santana Lopes Ferreira[c], Ítalo Breno Sousa Nunes[d], Aline Figueirêdo da Nóbrega[e]

[a]Universidade Federal da Paraíba, Campus 1. Lot. Cidade Universitária, 58051-900, João Pessoa, Brasil), wesleyfeu@gmail.com

[b]ilanamsbarros@gmail.com

[c]taynachavesf@gmail.com

[d]italonunes8@gmail.com

[e]Universidade Federal da Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário, 58429-900, Campina Grande, Brasil), alinefnobrega@hotmail.com

RESUMO

É de suma importância avaliar questões sobre sustentabilidade, sobretudo quando se utiliza materiais à base de cimento Portland. Nesse sentido, é imprescindível utilizar materiais para mitigar efeitos nocivos ao meio ambiente, atendendo os objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pela ONU. Este trabalho tem como objetivo avaliar pastas cimentícias com diferentes tipos e proporções de aditivos orgânicos sustentáveis à base de amido de mandioca (MM). Foram avaliadas pastas contendo relação água/aglomerante fixa de 0,4 e porcentagens de aditivos referentes a 0,25%, 0,50% e 1,00%, relativos à massa do cimento. Para a obtenção de um parâmetro de comparação, foi utilizado um aditivo comercial (MEL) com proporção de 0,50%. As pastas foram avaliadas no estado fresco quanto as suas características reológicas através do método do mini cone e reômetro. Para o teste de minicone, os maiores espalhamentos foram obtidos com a proporção de 0,50% para o MM e MEL. No reômetro os resultados atestam que as pastas com 0,50% de MM e MEL apresentam ponto de escoamento na mesma região e uma tensão de escoamento de aproximadamente 25 Pa. Os resultados comprovam que é possível obter um aditivo orgânico que forneça as misturas cimentícias propriedades reológicas equivalentes àquelas que utilizam aditivos industrializados.

PALAVRAS-CHAVE: fluidez, minicone, reômetro, plastificante

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos principais problemas ambientais gerados na construção civil está relacionada ao elevado consumo de materiais para construir edifícios, pontes ou estradas. Para mitigar esses problemas há algumas opções, como reduzir o consumo de matérias-primas que produzem esses materiais, utilizar materiais com impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida menor, ou ainda desenvolver materiais com maior desempenho mecânico e durabilidade (Jonh e Gleize, 2017).

Esse resultado é uma combinação de tecnologias, tendo como a principal o desenvolvimento de dispersantes, conhecidos como aditivos, que permitem uma significativa redução ou até mesmo eliminação do excesso de água necessário para permitir a trabalhabilidade da mistura cimentícia em seu estado fresco (Jonh e Gleize, 2017).

Aditivos são, geralmente, usados em matrizes cimentícias para melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência e intensificar a resistência a algumas ações como aquelas advindas da fissuração térmica, expansão álcali-agregado entre outros (Mehta e Monteiro, 2008).

A utilização desse material na indústria da construção civil vem crescendo nos últimos 50 anos, com centenas de produtos que variam muito a composição, sendo desde surfactantes e sais solúveis até minerais insolúveis e polímeros. Essa tendência crescente de utilização é devida, principalmente, ao aumento da relação custo-benefício, com amplo uso no preparo de concreto, argamassa e caldas de cimento. Além disso, os aditivos são considerados como o quarto componente do concreto, e de acordo com a ABNT (2011) não devem ser adicionados à mistura do concreto em quantidade maior que 5% da massa de material cimentício (Mehta e Monteiro, 2008; Figueiredo e Rêgo, 2017).

Vários tipos de aditivos têm sua composição à base de polímeros, como os aceleradores de pega à base de naftaleno sulfonado e melanina sulfonada e os plastificantes, também à base de naftalento sulfonado, lignosulfatos, policarboxilato entre outros. Na construção civil, os polímeros conhecidos como superabsorventes são bastante utilizados, seja como agentes incorporadores de ar, como produto para evitar a autodessecação em concretos de alta resistência ou também para extrair a água da mistura do concreto fresco, causando o endurecimento e redução da porosidade capilar. Há ainda mais recente os aditivos à base de biopolímero, podendo ser denominado como aditivo sustentável (Figueiredo e Rêgo, 2017).

Segundo a ABNT (2008), biopolímeros são polímeros ou copolímeros que são produzidos a partir de matérias-primas de fontes renováveis, como aqueles advindos do milho, cana-de-açúcar, celulose, quitina, amido entre outros. Por ser gerado de fontes renováveis, possuem um ciclo de vida mais curto quando comparado a fontes fósseis, como o petróleo. Dessa forma, aditivos à base de biopolímeros geram menor impacto ambiental na sua produção e ainda são biodegradáveis, diferentes dos aditivos produzidos pela indústria petroquímica (Brito et al., 2011).

Pesquisas com materiais cimentícios e aditivos, principalmente aqueles à base de petróleo, vem sendo desenvolvidas há algum tempo, sobretudo quando o aditivo não é o foco da pesquisa, mas apenas um material utilizado para melhorar propriedades da mistura principal. Os estudos reológicos destas misturas também vêm ganhando maior notoriedade com resultados importantes para avaliar o material em seu estado fresco. Diferentes tipos de misturas cimentícias, desde as mais simples até com ativadores alcalinos, são desenvolvidas e avaliadas por meio de aspectos de fluidez, escoamento e cisalhamento, seja por ensaios com reômetro, mini-cone, mesa de consistência, squeeze-flow, entre outros.

Os pesquisadores Cardoso et al. (2015), por exemplo, se detiveram apenas ao estudo do comportamento reológico de cisalhamento de pastas de cimento, alterando a velocidade de compressão durante o ensaio com reômetro de placas paralelas, não adentrando em aspectos relacionados a aditivos e ou a diferentes tipos de ligantes. Em seu estudo, eles concluíram que a diferença de comportamento entre as velocidades é causada pela segregação da fase líquida-sólida em velocidades lentas, mostrando que quanto maior a velocidade, menor a separação da fase induzida pela etapa de compressão.

Liberto et al. (2022), por sua vez, trabalharam com ligantes ativados alcalinamente e cimento Portland fazendo a comparação entre as duas misturas, e incluindo aditivo superplastificante à base de policarboxilatos- éster (PCE) para avaliar a influência na solução intersticial. Para os testes reológicos, os autores utilizaram reômetro rotacional controlado por torque e mini-cone. Eles identificaram que a escória ativada enriquecida de íons Ca^{2+} mostra uma boa resposta à adição de superplastificante, resultando em mudanças tanto nas propriedades elásticas quanto na fluidez, até então não observadas em ligantes ativados por álcalis. Além disso, nessas misturas foi observado resultados no comportamento elástico idênticos às com cimento Portland.

Os autores Mzwandile et al. (2023) desenvolveram misturas com areia, três diferentes cimentos e dois tipos de superplastificantes, avaliando testes de fluxo e resistência de cisalhamento nessas argamassas, e tendo como instrumento utilizado o reômetro de placas paralelas para obter medições de resistência ao cisalhamento e viscosidade de compósito cimentício. Eles concluíram que misturar dois tipos de aditivos melhoram a eficácia das misturas, reduzindo a tensão de escoamento do sistema cimentício. Eles também sugerem que a estabilidade de uma argamassa cimentícia não pode ser definida considerando apenas o parâmetro reológico da viscosidade, conforme proposto atualmente na literatura, mas também a tensão de escoamento, que deve ser ajustada para obtenção da mistura desejada.

Em relação a aditivos à base de biopolímeros, apesar de todas as vantagens relacionadas, principalmente, aos aspectos de sustentabilidade, eles ainda possuem algumas limitações técnicas, como qualquer material à base de biopolímero, o que torna difícil sua processabilidade e seu uso como produto final. Desse modo, pesquisas vêm sendo realizadas com dedicação ao estudo da modificação de biopolímeros para viabilizar o seu processamento e uso em diversas aplicações, inclusive como aditivos (Brito et al., 2011)

A maltodextrina é um polissacarídeo que vem ganhando destaque na utilização como aditivo do cimento, pois pode alterar suas propriedades no estado fresco e endurecido e servir para melhorar suas características como a trabalhabilidade, tempo de pega e resistência. Quando utilizado em tempos de cura prolongados, como 1, 3 ou 28 dias, a adição de maltodextrina aumenta a resistência a compressão em 12%, confirmando o seu efeito no desenvolvimento da resistência e importância de se considerar na formulação de concretos e argamassas (Lei et al., 2020).

Ademais, o aumento da fluidez da pasta de cimento pela maltodextrina é bastante significativo, podendo atuar tanto como retardador de fixação quanto de endurecimento, porém o efeito depende da dosagem. Com isso, a maltodextrina parece ter um potencial significativo como aditivo de retenção para concreto fresco, especialmente em condições de temperatura mais elevada (Lei et al., 2020).

Dessa forma, considerando a necessidade de realizar estudos voltados aos aditivos orgânicos sustentáveis, esta pesquisa tem como objetivo avaliar aspectos reológicos de pastas cimentícias aditivadas com biopolímeros, sendo a maltodextrina e a mistura binária de amido de mandioca com

maltodextrina (MM) os biopolímeros analisados e utulizando como referência o aditivo polifuncional comercial Meltex F 10 (MEL).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA

Com o intuito de examinar como se insere no atual contexto a relação entre autores, palavras-chave e países que pesquisam os efeitos dos biopolímeros em materiais de construção civil, foi realizada uma análise cienciométrica. Segundo Parra, Coutinho e Pessano (2019), a análise cienciométrica é um campo de estudo que emprega técnicas estatísticas e matemáticas para analisar a produção científica. Essa abordagem avalia aspectos relacionados à geração de conhecimento científico e seus impactos, examinando uma grande quantidade de dados bibliográficos em bases de dados acadêmicas reconhecidas.

Os aspectos avaliados podem incluir a identificação de padrões e tendências de pesquisa, o mapeamento da colaboração entre pesquisadores e instituições e o impacto de trabalhos em áreas específicas. A base de dados utilizada foi o Scopus, sem restrição de filtro, pesquisando no título, no resumo e nas palavras-chaves dos trabalhos os seguintes termos: "organic additive*" OR "polysaccharides" OR “starch” OR “maltodextrin” AND “rheolog*” OR “rheometer” OR "mini slump cone" AND "cement paste" OR "cement system*" OR "cement based system*" OR "cimentitious system". Foram identificados 44 documentos entre 1994 e 2024, sendo 27 artigos publicados em revista, 15 artigos publicados em congressos e 2 capítulos de livros. A análise de vínculo entre os autores foi feita através do software VOSviewer e segue no Quadro 1 os autores que mais produziram trabalhos relacionados a esta busca e na Figura 1 a análise de vínculo entre estes autores.

Quadro 1 – Lista dos autores que mais produziram trabalhos sobre o tema

Autores	Publicações	Citações
Schmidt, Wolfram	5	52
Kühne, Hans-carsten	3	43
Azima, Mahzad	2	11
Benmounah, Abdelbaki	2	21
Duda, Pedro	2	67
Filho, Romildo Dias Toledo	2	67
Hossain, K.m.a.	2	211
Lachemi, m.	2	211
Lambros, v.	2	211

No Quadro 1 é possível observar que o autor que mais publicou no período considerado foi o autor schmidt, wolfram, entretanto, os autores hossain, k.m.a., lachemi, m. e lambros, v. são os mais citados.

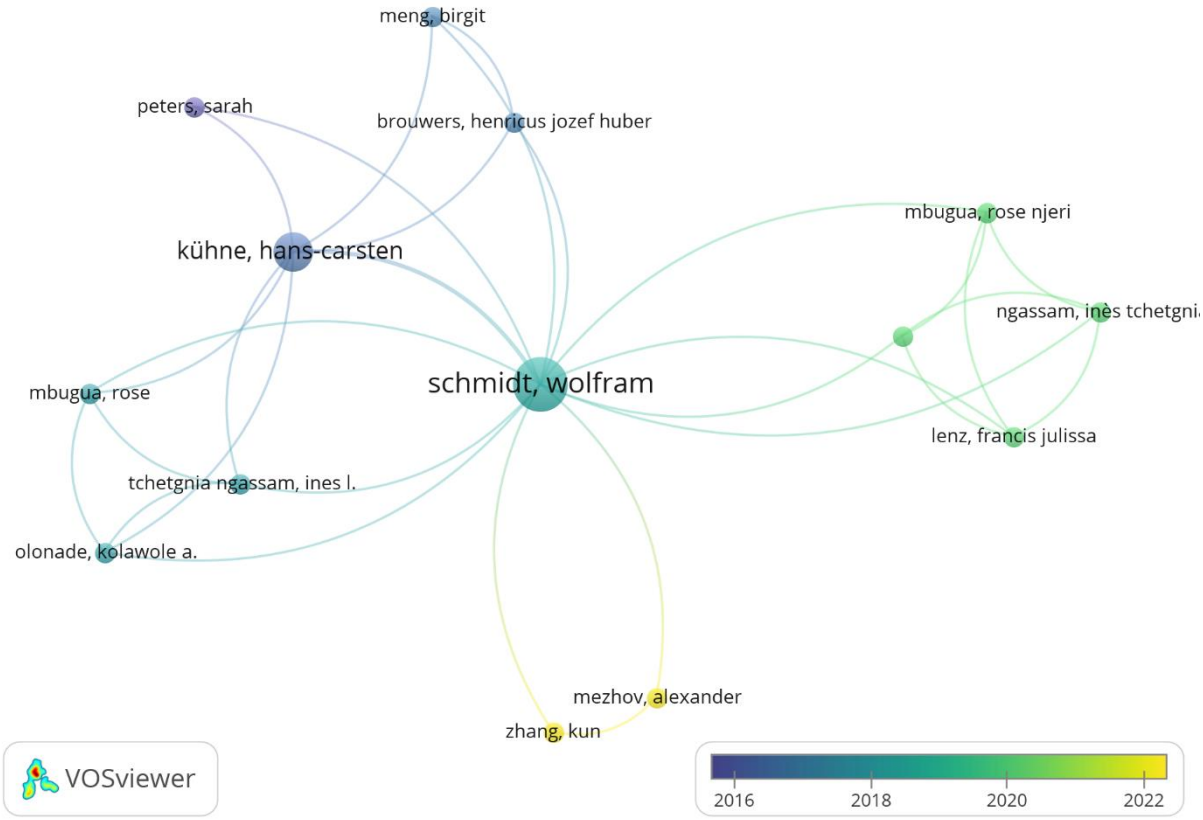


Figura 1 - Correlação entre os autores (Fonte: VOSViewer (2024)).

A Figura 1 apresenta a interação dos autores entre os anos de 2016 e 2022. É perceptível que a maior intensidade de publicações realizadas por esses autores ocorreu no período entre 2017 e 2020. Além dos principais autores, foi possível constatar quais palavras-chave são mais frequentes em pesquisas sobre esse tema (Figura 2).

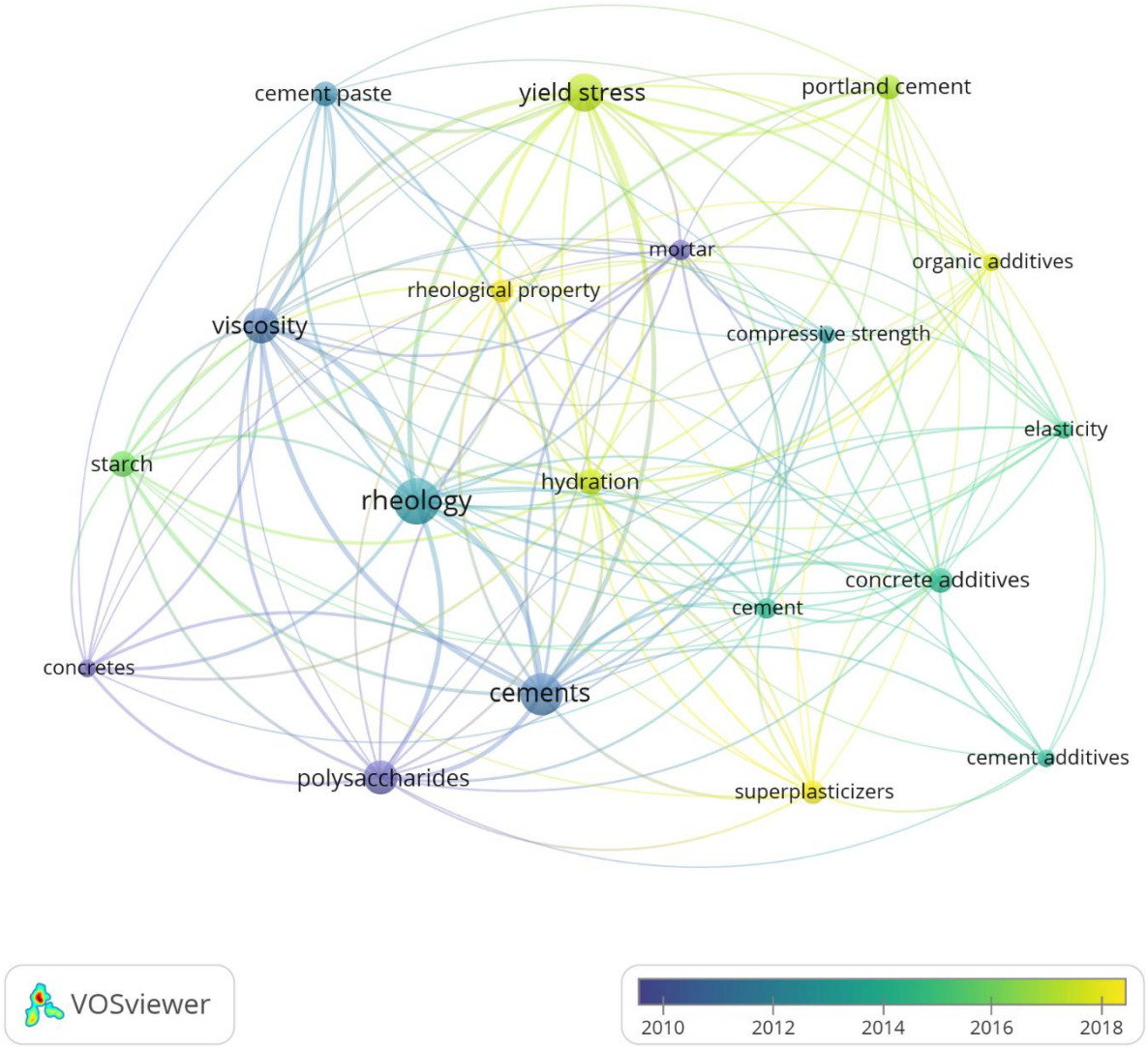


Figura 2 - Correlação entre as palavras-chave (Fonte: VOSViewer (2024)).

A Figura 2 apresenta a correlação entre as palavras-chave, na qual foi estabelecido o número mínimo de ocorrências igual a cinco, resultando em um número de clusters igual a 19 palavras, com maiores ocorrências entre os anos de 2012 e 2016. A análise dessas palavras revela que reologia, viscosidade e cimentos foram as mais frequentes, especialmente no período de 2012 a 2014, em meados de 2018 inicia-se a utilização dos termos superplastificante, aditivos orgânicos e propriedades reológicas. Além das principais palavras-chave, foi possível constatar quais países são mais atuantes nas pesquisas que envolvem aditivos orgânicos (Figura 3).

Figura 3 - Correlação entre os países (Fonte: VOSViewer (2024)).

A Figura 3 apresenta o vínculo entre os países que investigam o uso de aditivos orgânicos e polissacarídeos em pastas cimentícias. Observa-se que os primeiros estudos foram realizados na Alemanha e Países Baixos, mas que atualmente tem avançado nos países africanos, o que pode ser em grande parte atribuído ao elevado cultivo de mandioca neste continente.

Em suma, ficou evidente o crescimento de pesquisas relacionadas ao tema, com um aumento significativo de publicações entre 2016 e 2020. A análise cienciométrica realizada sobre o assunto proposto revela um panorama interessante das tendências e atores envolvidos nessa área, sendo possível enxergar um crescente interesse de pesquisas relacionadas a aditivos orgânicos e polissacarídeos em matrizes cimentícias.

2.2 PLANO EXPERIMENTAL

A obtenção dos resultados desta pesquisa foi possível através de uma metodologia composta por três etapas conforme apresentado na Figura 4.

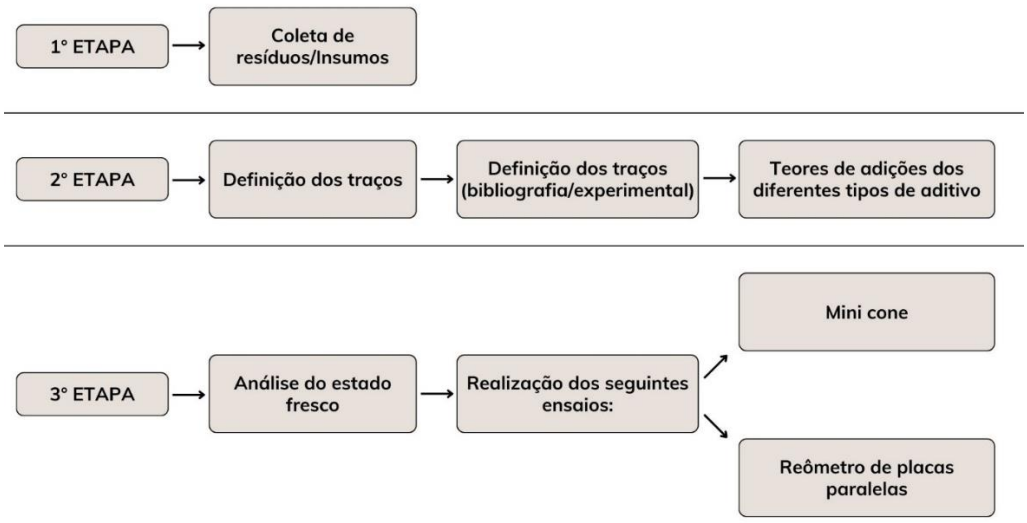


Figura 4 - Etapas desenvolvidas na presente pesquisa.

2.2.1 COLETA DOS INSUMOS E RESÍDUOS

A base das pastas é composta por cimento Portland V e água destilada. Os distintos tipos de misturas envolvem a adição de diferentes aditivos orgânicos, sendo eles a maltodextrina (MA), mistura de amido de mandioca com maltodextrina (MM) e um aditivo comercial (Meltex f10 – MEL) para parâmetro de comparação de desempenho.

2.2.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

O Quadro 2 apresenta os traços utilizados na produção das pastas de cimento Portland. Foi adotada a relação água/aglomerante de 0,4 com objetivo de conferir a pasta fluidez suficiente para que os aditivos pudessem atuar, aumentando ou diminuindo a fluidez. O aditivo foi medido em massa e dosado como um teor em relação a quantidade de cimento.

Quadro 2 – Traço utilizado na produção das pastas

Traço	água/aglomerante	Aditivo (%)
Referência	0,40	0,00
MM 0,25%	0,40	0,50
MM 0,50%	0,40	0,50
MM 1,00%	0,40	1,00
MA 0,50%	0,40	0,50
MEL 0,50%	0,40	0,50

2.2.3 MINI CONE E REOMETRIA

Para a análise das pastas no estado fresco, foi realizado o ensaio de mini cone (Figura 5a) e a reometria das misturas foi avaliada através do reômetro de placas paralelas (Figura 5b). No ensaio de mini cone a mistura das pastas foi feita no agitador mecânico a 500 r.p.m, respeitando-se o intervalo de 60 segundos (s) de mistura sem o aditivo, seguido de 60 s de mistura após sua utilização. No ensaio de reometria, as amostras foram dispostas sobre uma fita adesiva de superfície áspera colocada na placa inferior do equipamento, evitando o escoamento da pasta, e submetidas a uma tensão de cisalhamento de 0 a 100 Pa, em um intervalo de 3 minutos, a 25 °C de temperatura de ensaio, a uma taxa de cisalhamento de 50,0 1/s e um incremento de 0,41 1/s.

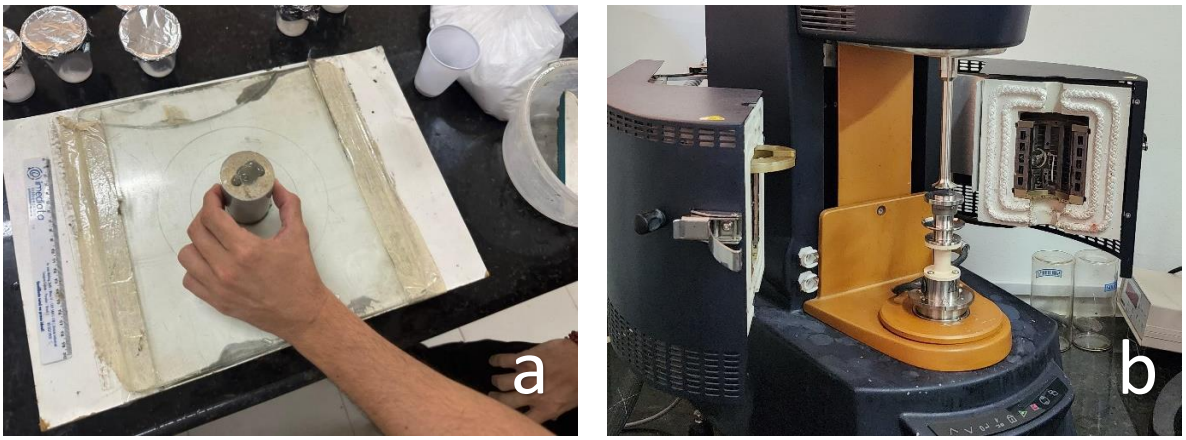


Figura 5 - Ensaio do mini cone (a) e reômetro de cisalhamento dinâmico (b)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segue na Figura 6 os resultados do ensaio de mini cone. A amostra de referência não apresentou fluidez suficiente para escoar durante o ensaio, sendo assim, seu resultado foi considerado como sendo 0 mm.

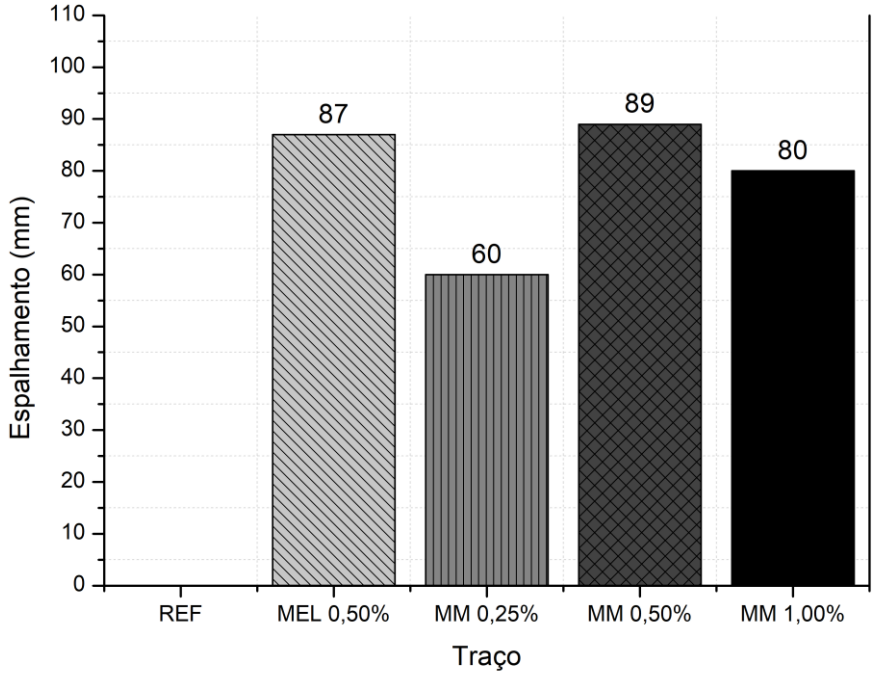


Figura 6 - Resultado do ensaio de mini cone das misturas

Através dos resultados do ensaio mini cone é possível observar uma efetiva atuação do aditivo comercial (Meltex F 10 - MEL) a 0,5%. A amostra de referência passou de uma condição de não escoamento para 87 mm de espalhamento após a utilização do produto. Nas misturas seguintes foi testada a atuação do aditivo orgânico MM nos teores de 0,25%, 0,50% e 1,00% de adição. O aditivo orgânico promoveu maior espalhamento a teores crescentes de utilização até o teor de 0,5%. Neste teor o aditivo conferiu a pasta a maior fluidez (89 mm), sendo este resultado 2,3% superior ao obtido pelo aditivo comercial. Pelo ensaio não ter sido repetido uma quantidade suficiente de vezes para se calcular o desvio padrão, dada a diferença medida ser de apenas 2,3%, as pastas contento os aditivos MM e MEL a 0,5% podem ser consideradas com fluidez equivalente. A pasta contendo MM a 1,0% apresenta 80 mm de espalhamento, caracterizando uma redução de 10,1% relação a mistura contendo o aditivo MM a 0,5%. Este resultado pode indicar que o aditivo orgânico teria alcançado seu ponto de saturação a 0,5% de adição, ou seja, a partir deste teor não haverá mais aumento de espalhamento e sim redução. É importante destacar que este resultado foi obtido em uma condição particular aplicação, com mistura a 500 r.p.m, pasta em fluxo livre etc. Assim, pode se inferir este ensaio do ponto de vista reológico como sendo um único ponto em uma curva tensão x taxa de cisalhamento, daí a necessidade este comportamento no reômetro de placas paralelas. Na Figura 7 se observa os distintos espalhamentos das pastas contendo MEL a 0,5% (87 mm) e MM a 1,0 (80 mm).

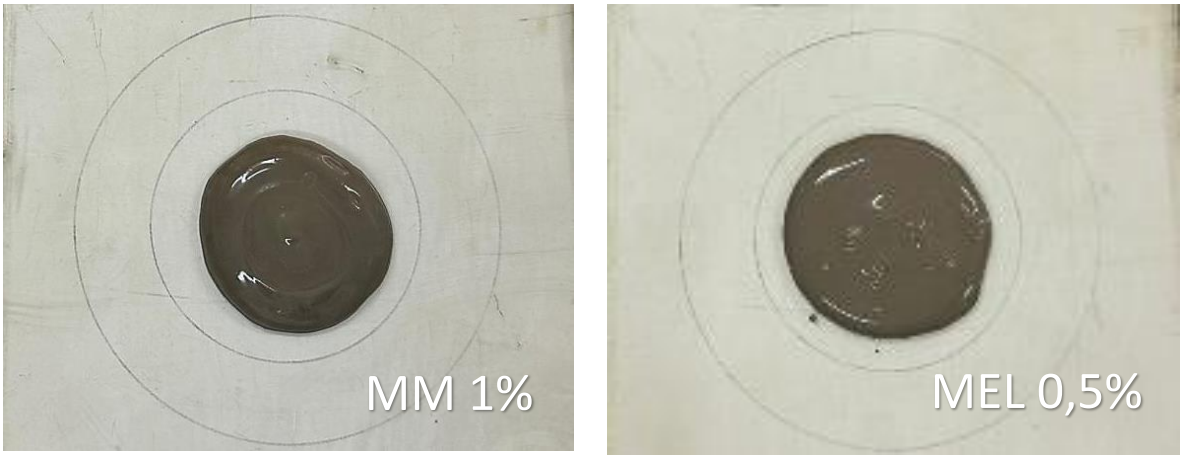


Figura 7 - Ensaio do mini cone das misturas: MM 1% (80 mm) e MEL 0,5% (87 mm)

No ensaio de reometria uma nova mistura foi testada (MA 0,50%) com objetivo de avaliar o comportamento da maltodextrina adicionada isoladamente pasta de cimento, ou seja, sem estar com posição binária com o amido de mandioca. Dada a pouca contribuição do aditivo MM adicionado a 0,25% na fluidez da mistura, verificada no ensaio do mini cone, optou-se por não o analisar no reômetro de placas paralelas. A mesma opção foi feita com relação ao traço de referência (REF), neste caso a mistura não obteve a consistência suficientemente necessária para ser ensaiado. Segue na Figura 8 os resultados obtidos na análise reométrica.

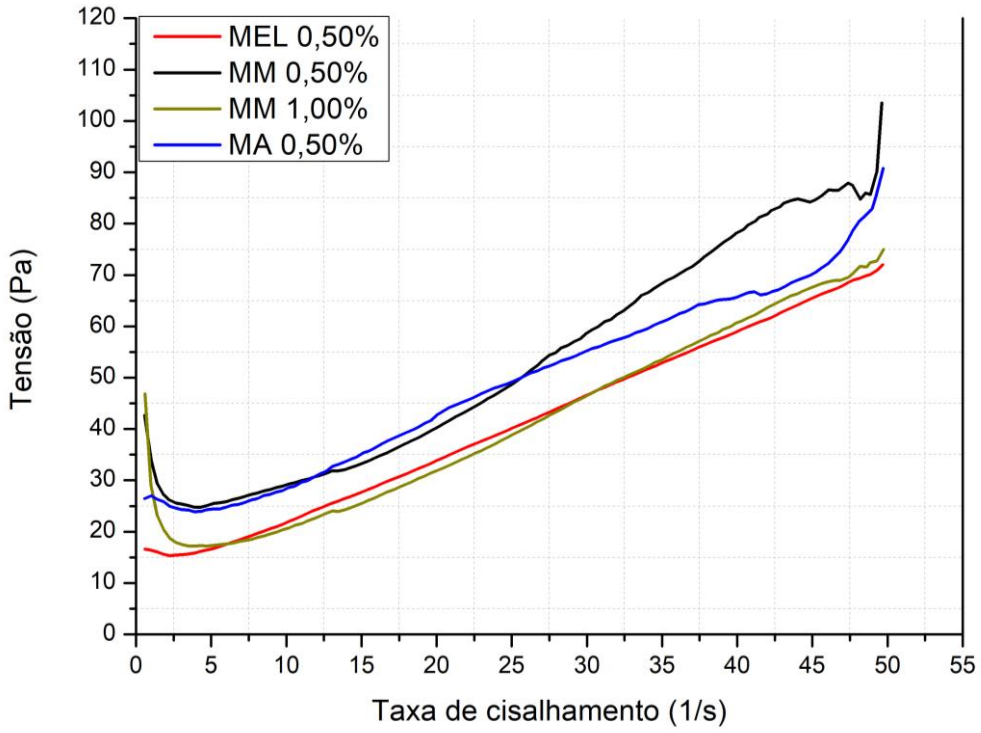


Figura 8 - Análise reométrica das misturas

Observa-se na Figura 8 que todas as misturas apresentaram um comportamento reológico próximo ao modelo plástico de Bingham, se caracterizando como fluidos viscoplásticos. Estes fluidos possuem uma viscosidade aparente apenas quando a tensão aplicada excede um valor mínimo, conhecido como tensão de escoamento ou limite de escoamento. Acima da tensão de escoamento, esses fluídos apresentam um comportamento viscoso linear, ou seja, a taxa de deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada. Ao analisar a Figura 8 é possível identificar majoritariamente dois comportamentos distintos. Um apresentado pelas misturas contendo MA 0,50% e MM 0,50% e o um segundo observado nas pastas contendo MEL 0,50% e MM 1,00%.

As curvas contendo os MA a 0,50% e MM a 0,50% são muito semelhantes, apresentando inclusive ponto de escoamento na mesma região, conferindo-lhes uma tensão de escoamento de aproximadamente 25 Pa. Na região linear ambas as amostras apresentam o mesmo coeficiente angular até a taxa de cisalhamento de aproximadamente a 25 (1/s), onde as curvas mudam de angulação. Assim, essas observações podem indicar que até uma taxa de cisalhamento específica a utilização de maltodextrina ou a mistura binária de amido de mandioca com maltodextrina implicará em um comportamento reológico muito semelhante, entretanto, a partir deste ponto as misturas contendo apenas maltodextrina poderão apresentar uma menor viscosidade. As misturas contendo MEL a 0,50% e MM a 1,00% também são muito semelhantes, ambas têm o mesmo coeficiente angular, que se mantem constante em toda região linear. As curvas diferem discretamente quando a tensão de escoamento, sendo aproximadamente 15 Pa e 18 Pa para as misturas contendo MEL a 0,50% e MM 1,00%, respectivamente. Dada esta semelhança entre a curva das duas misturas é possível considerar que do ponto de vista reológico o aditivo MM a 1% seria equivalente ao aditivo MEL a 0,5%.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos são possíveis as seguintes conclusões:

- O ensaio de mini cone não é capaz de avaliar o comportamento reológico das pastas submetidas a distintas aplicações;
- A maltodextrina possui potencial fluidificante em matrizes cimentícias sobretudo a elevadas taxas de cisalhamento;
- A mistura binária de amido de mandioca com maltodextrina forneceu a pasta de cimento Portland tensão de escoamento e viscosidade semelhantes as fornecidas pelo aditivo comercial;
- É possível obter um aditivo orgânico natural que forneça as pastas de cimento Portland propriedades reológicas equivalentes as obtidas em pastas contendo aditivos industrializados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15448-1. Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis - Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2008.

Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., Melo, T. J. A. (2011). Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.6.2 (2011) 127-139 ISSN 1809-8797

Cardoso, F. A., Fujii, A. L., Pileggi, R. G., Chaouche, M. (2015). Parallel-plate rotational rheometry of cement paste: Influence of the squeeze velocity during gap positioning. Cement and Concrete Research, 75:66-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.010

Figueiredo, E. P., Rêgo, J. H. Materiais de construção civil e princípios de Ciência e Engenharia dos materiais. Editor: Geraldo C. Isaia. 3ª edição - revista e atualizada. IBRACON, Volume 2, Capítulo 41, 2017.

John, V. M., Gleize, P. J. P. Materiais de construção civil e princípios de Ciência e Engenharia dos materiais. Editor: Geraldo C. Isaia. 3ª edição - revista e atualizada. IBRACON, Volume 2, Capítulo 52, 2017.

Lei Lei, Ran Li, Andriana Fuddin. (2020). Influence of maltodextrin retarder on the hydration kinetics and mechanical properties of Portland cement. Cement and Concrete Composites, Volume 114, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103774.

Liberto, T., Bellotto, M., Robisson, A. (2022). Small oscillatory rheology and cementitious particle interactions. Cement and Concrete Research, 157:106790. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106790

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. Concreto – microestrutura, propriedades e materiais. 3ª edição. IBRACON, 2008.

Mzwandile, J., Willy, M. e Rainer, H. (2023). Cement paste yield stress and self-compacting mortar stability. Construction and Building Materials, 393: 131917. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131917

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ESTADO ESTACIONÁRIO (*HOTBOX*) PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE DIFERENTES PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO

Adilson C. Paula Junior[a]; Claudia Jacinto[a]; Livia Cosentino[a]; Jorge Fernandes[a]; Elisabete Teixeira[a]; Ricardo Mateus[a]

[a]ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Alameda da Universidade, 4800-058, Guimarães, Portugal, ricardomateus@civil.uminho.pt

RESUMO

A atual crise ambiental e energética impulsiona a busca por construções mais eficientes e de menor impacte ambiental. Este estudo investiga a aplicação da *hotbox*, conforme normas ISO 8990 e ISO 9869, para avaliar o desempenho térmico de materiais de isolamento. Desafios experimentais, como controlo de temperatura e movimentação do ar e perdas de calor são abordados para garantir a obtenção de parâmetros térmicos confiáveis. O estudo analisa produtos diversos, nomeadamente placa de poliestireno extrudido (XPS), painel de canas *Arundo Donax* e blocos de terra comprimida (BTCs), destacando a adaptabilidade da *hotbox*. A metodologia abrange a revisão de literatura, focada na análise dos princípios de medição em *hotbox* e a caracterização das propriedades térmicas de materiais inovadores. Resultados indicam a capacidade deste equipamento em caracterizar propriedades térmicas de materiais distintos e origens diversas. Conclui-se que a aplicação da *hotbox* é vantajosa desde as fases mais preliminares do desenvolvimento de novos produtos, para que estes atendam às exigências e regulamentações térmicas atuais. Além disso, são apresentadas as propriedades térmicas de materiais alternativos de base biológica e mineral, promovendo a sustentabilidade no ambiente construído. O estudo ressalta ainda a importância da medição precisa para a construção sustentável e energicamente eficiente.

Palavras-chave: Eficiência energética, Condutibilidade térmica, Construção sustentável, Materiais eco-eficientes, Estado Estacionário (*hotbox*).

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores de maior impacte ambiental no mundo, sendo responsável por 37% das emissões globais de gases de efeito estufa e 34% do consumo global de energia em 2022 (UNEP, 2024). No sentido de combater a crise climática e energética, a política atual tem sido desenvolvida para exercer uma pressão substancial no mercado da construção, especialmente na procura por edifícios mais eficientes termicamente, uma vez que grande parte de seu consumo de energia é destinada ao aquecimento e arrefecimento de espaços (Schiavoni *et al.*, 2016, Ürge-Vorsatz *et al.*, 2015).

A melhoria no desempenho térmico e energético dos edifícios, sem prejudicar as condições de conforto interior, está relacionada com a escolha dos elementos da sua envolvente térmica (Brito & Gomes, 2020). Estes elementos são os responsáveis pelas perdas de calor do edifício e, consequentemente, pelo aumento da eficiência de suas instalações técnicas (de Rubeis *et al.*, 2019). Portanto, é essencial estudar as propriedades térmicas dos materiais, sobretudo os sustentáveis, possibilitando a construção de edifícios mais eficientes em termos energéticos e ambientais (Alhawari e Mukhopadhyaya,2022).

Entre os métodos mais empregados na avaliação laboratorial do desempenho térmico de materiais e produtos de construção, destacam-se os métodos transientes, onde é aplicado um pulso de calor unidimensional sobre a amostra e a resposta da temperatura é medida ao longo do tempo de medição. Apesar dos resultados serem obtidos quase que instantaneamente, a aplicação deste tipo de método fica condicionada a amostras de menor dimensão e a materiais homogéneos (Asdrubali e Baldinelli, 2011). Quando os elementos não são homogéneos ou o fluxo de calor é multidimensional, são necessários equipamentos e métodos mais especializados devido à maior complexidade dos fenómenos de transmissão de calor (Barbaresi *et al.*, 2020).

Neste sentido, surgem os métodos de estado estacionário, onde a amostra é mantida em condições de temperatura constantes durante o ensaio e o fluxo de calor através dela é medido. Isso é feito até que um estado de equilíbrio térmico seja alcançado, onde a temperatura em toda a amostra permanece constante (Buratti *te al.*, 2016). De modo geral, o método do estado estacionário é mais adequado para materiais com propriedades térmicas constantes e é especialmente útil para materiais não homogéneos (Barbaresi *et al*., 2020, Lu e Memari, 2018).

O desenvolvimento de metodologias alternativas para a avaliação de propriedades térmicas, mesmo que de forma preliminar, tem demonstrado potencial para reduzir os custos e viabilizar a realização de campanhas experimentais. Dentro deste contexto, as *hotboxes*, que são câmaras projetadas para a realização de testes de isolamento térmico ou caracterização de propriedades térmicas de materiais, fornecem condições de temperatura controlada para medir o desempenho térmico dos materiais de construção e de elementos construtivos da envolvente de edifícios (Buratti *et al*., 2016). Este tipo de equipamento trata-se de uma estrutura isolada termicamente que pode ser aquecida internamente para simular condições de temperatura específicas (Peters *et al.*, 2017).

Diversos investigadores desenvolveram sistemas baseados em *hotboxes* para avaliação laboratorial das características termofísicas de produtos de construção, entre outros. (Alhawari e Mukhopadhyaya, 2022; Asdrubali e Baldinelli, 2011; Barbaresi *et al.*, 2020; Buratti *et al.*, 2016; Smith II, 2016; Peters *et al.*, 2017; Lu e Memari, 2018; Yehya e Maatouk, 2023). No entanto, apesar dos benefícios associados ao método do estado estacionário, as *hotboxes* desenvolvidas em escala laboratorial apresentam, na sua maioria, escala reduzida e dessa forma possuem limitações quando às dimensões dos provetes/painéis avaliados.

O presente estudo tem como objetivo apresentar o método do fluxo de calor enquanto alternativa viável para a determinação de resistência térmica (R-value) e condutibilidade térmica (λ) de diferentes materiais e produtos, com recurso à utilização de uma *hotbox* laboratorial. É apresentada uma descrição do equipamento e dos seus componentes, incluindo os sensores utilizados na aquisição dos dados. Como casos de estudo, foram escolhidos três produtos para serem caracterizados termicamente, tendo em consideração as características de isolamento e potencial contributo para a melhoria da sustentabilidade do sector da construção.

2 METODOLOGIA

2.1 PRODUTOS ESTUDADOS

O Poliestireno Extrudido (XPS) foi selecionado por apresentar baixa condutibilidade térmica, ser um produto homogéneo e as suas características termofísicas já estarem bem caracterizadas. Foi ensaiada uma placa de 50 x 100 cm de área e 10 cm de espessura. Por conta desta homogeneidade do material, optou-se por dispor os sensores na zona mais central do provete, o mais próximo possível uns dos outros (Figura 1). Os resultados deste teste são utilizados para comprovar a confiabilidade do sistema na caracterização de um produto cujas propriedades térmicas já estão bem definidas.

Figura 1 – Placa de XPS ensaiada na *hotbox*

Já quanto aos materiais de origem natural, foi estudado um painel de canas (*Arundo Donax*) com a mesma área do provete de XPS (100 x 50 cm), com uma espessura total de 12 cm, produzido com o intuito de ser aplicado como produto de isolamento térmico (Figura 2a). O painel conta com uma estrutura de madeira e é revestido por uma placa de aglomerado de madeira com 1 cm de espessura em ambas as faces (Figura 2b). Ou seja, o R-value da solução representa a soma do R-value de cada componente, incluindo a camada de ar aprisionado entre as canas. Ao contrário da disposição adotada para o XPS, os sensores de temperatura superficial e os fluxímetros foram distribuídos por toda a placa (Figura 2c). Isso também se deve à estrutura do material, mas desta vez para abranger uma maior zona de atuação do provete e tornar o resultado mais fidedigno. Diante da sua heterogeneidade e esperada variabilidade dos resultados, foram testados 6 pontos distintos e sua média calculada. Para o cálculo

da condutibilidade térmica do painel de canas, foi descontado o contributo para a resistência térmica das duas placas de aglomerado, as quais foram caracterizadas isoladamente na mesma *hotbox* (R = 0.177 m²K/W).

a) b) c)

Figura 2 – Painel de cana ensaiado na *hotbox*

Por fim, foram ensaiados blocos de terra comprimida (BTCs) desenvolvidos por uma empresa especializada em produtos de construção em terra, localizada no Alentejo. Os BTCs surgem como técnica de construção em terra de baixo custo, com maior perspetiva de aceitação pela sociedade moderna. Estes são considerados a evolução do adobe, sobretudo no que respeita à otimização das suas características mecânicas. Para além de ter origem natural, este material foi escolhido para demonstrar a capacidade de ensaiar diferentes tipos de materiais na *hotbox*. Assim como para a painel de canas, foram ensaiados 6 blocos de aproximadamente 30 x 15 x 7.5 cm de dimensão, de modo análogo à forma como são aplicados *in loco*. Os fluxímetros foram posicionados no centro da face de cada bloco (Figura 3), a fim de isolar variáveis associadas a falhas na estrutura interna do material.

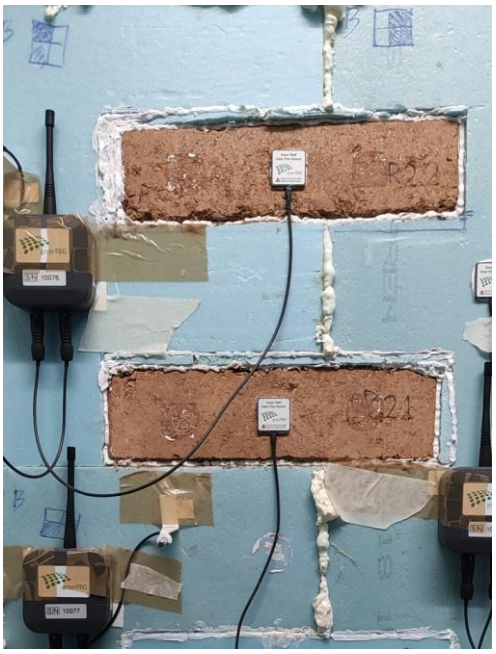


Figura 3 – BTCs ensaiados termicamente na *hotbox*

2.2 *HOTBOX*

Os materiais selecionados foram avaliados termicamente numa *guarded hotbox* (Figura 4) localizada no Laboratório de Física e Tecnologia das Construções (eco.lab), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (UMinho). Esta *hotbox* foi construída de acordo com a norma ASTM C1363-11:2011 (A.S.T.M., 2011) e é constituída por duas câmaras com 1 m³ de volume interno cada, sendo uma quente e a outra fria. A câmara quente dispõe de uma fonte de calor controlada por um regulador de temperatura (35 ± 3 °C). Já quanto à câmara fria, foram colocados dois dispositivos de ventilação em sua parede posterior, que permitem a entrada de ar à temperatura ambiente na câmara e a saída de ar quente. Essa troca de ar é necessária para manter condições uniformes de fluxo de calor através do provete. A temperatura ambiente é mantida constante, uma vez que a *hotbox* encontra-se inserida no interior de uma sala climatizada em 18 °C. A envolvente é bem isolada e materializada por placas de poliestireno extrudido (XPS) (20 cm de espessura; R=5.71 m²K/W), para reduzir o fluxo de calor através dela, nomeadamente as perdas de calor por condução. A utilização deste equipamento foi validada por Teixeira *et al.* (2020).

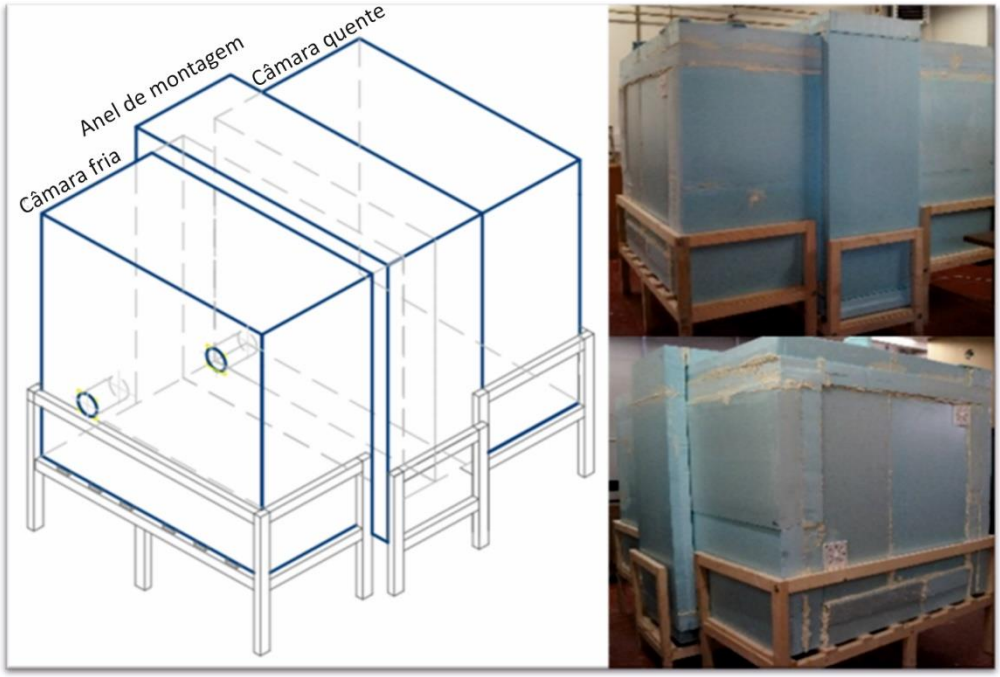


Figura 4 – *Hotbox* usado no estudo (Adaptado de Teixeira *et al.*, 2020)

2.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA (R-VALUE) ATRAVÉS DA CONDIÇÃO DO ESTADO ESTACIONÁRIO

Os provetes alvos do estudo foram colocados no anel de montagem entre as duas câmaras da *hotbox*, respeitando os requisitos normativos da norma ISO 8990:1996 (BSI, 1996). Posteriormente foram submetidos a ensaios para determinação da sua resistência térmica de acordo com a norma ISO 9869-1:2014 (BSI, 2014). Esta norma apresenta o método do fluxo de calor para medição das propriedades de transmissão térmica de componentes planos de edifícios, isto é, aqueles que consistem principalmente em camadas opacas perpendiculares ao fluxo de calor e sem fluxo de calor lateral significativo. Através deste método, a resistência térmica da amostra é obtida medindo-se a taxa de fluxo de calor necessária para manter a câmara quente a uma temperatura constante. Foram realizadas 6 medições para cada material avaliado, de modo a obter os respetivos valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação.

A norma ainda descreve o equipamento a utilizar, o procedimento de calibração, os procedimentos de instalação e medição, a análise dos dados, incluindo o formato do relatório a apresentar e a correção de erros sistemáticos. Dentro do método de estado estacionário, alcançar um diferencial de temperatura adequado entre as câmaras quente e fria (segundo a norma superior a 10 °C) é o principal modo de reduzir incertezas. Isso porque os efeitos negativos das flutuações de temperatura reduzem-se, aumentando a precisão das medições (Barbaresi *et al.*, 2020).

Esta experiência utilizou o equipamento greenTEG gOMS II® para avaliar as temperaturas (superficial e ambiente) em ambas as câmaras e o fluxo de calor que atravessa o material entre os lados do elemento de separação. A Figura 5 apresenta o esquema de funcionamento do sistema de medição utilizado.

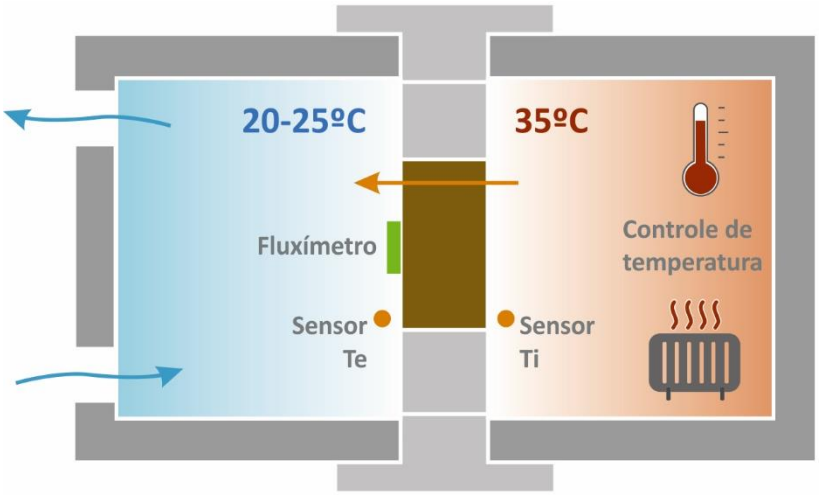


Figura 5 – Esquema de funcionamento da *hotbox* (Adaptado de Teixeira *et al.*, 2020)

O R-value é calculado automaticamente pelo programa informático da greenTEG a partir dos valores médios do fluxo de calor e das diferenças de temperatura obtidos durante todo o período de análise. Para o efeito é utilizada a Equação (1). O fabricante indica uma incerteza da medição do fluxo de calor de ± 3%. O programa contempla inclusive os critérios de conclusão do ensaio definidos pela norma (incluindo um período de ensaio superior a 72 horas), de modo que o relatório informa automaticamente se os resultados atendem aos requisitos normativos.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n}(T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^{n} q_j} \quad (1)$$

Onde q_j = Fluxo de calor no instante j;
T_{sij} = Temperatura da superfície interior no instante j;
T_{sej} = Temperatura da superfície exterior no instante j.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O

Quadro 1 apresenta os resultados dos ensaios obtidos para os materiais caracterizados neste estudo. São apresentadas a resistência térmica (R-value) média para cada solução e a condutibilidade térmica (λ) média do XPS, dos BTCs e das canas. Os respetivos desvio-padrão e coeficiente de variação obtidos para cada tipo de material também são apresentados. A Figura 6a permite a comparação entre a resistência térmica das diferentes soluções abordadas neste estudo para uma mesma espessura (e = 12 cm). Já a Figura 6b compara as condutibilidades térmicas dos diferentes materiais estudados. O intuito desta comparação é demonstrar que tanto o método como os equipamentos utilizados mostraram-se aplicáveis para diferentes faixas de condutibilidade térmica, o que permite a este sistema atender a uma ampla gama de materiais de construção.

Quadro 1 – Caracterização térmica dos materiais estudados com recurso à *hotbox*

Material	R-Value médio [m²K/W]	Desvio Padrão [m²K/W]	Coeficiente de variação [%]	Espessura [m]	λ média [W/mK]	Desvio Padrão [W/mK]	Coeficiente de variação [%]
XPS	2.755	0.104	3.76	0.10	0.036	0.001	3.74
BTC	0.236	0.017	7.33	0.15	0.642	0.044	6.87
Painel de Cana	1.350	0.235	17.43	0.10	0.106	0.030	28.17

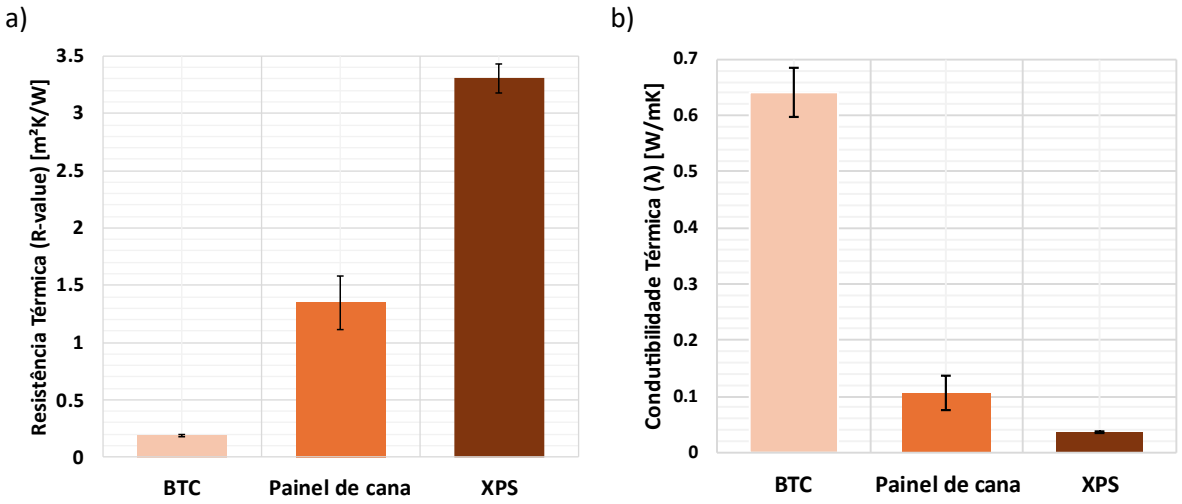


Figura 6 – a) Resistência térmica das diferentes soluções para uma mesma espessura (e = 12 cm); b) Condutibilidade térmica dos diferentes materiais avaliados

A respeito do XPS, material isolante e com especificações conhecidas, os valores obtidos foram muito próximos aos valores especificados pelo fabricante: R-value de 2.75 m²K/W e λ de 0.037 W/mK. Por mais que se trate de um material homogéneo, o coeficiente de variação de 3.76% é condizente com a precisão indicada pelo fabricante do fluxímetro. Já acerca das demais soluções apresentadas neste estudo, seria injusta a comparação apenas com o XPS em termos de desempenho térmico, uma vez que representam materiais de naturezas e funcionalidade distintas. Por sua vez, foi encontrada para os BTCs uma condutibilidade térmica inferior o valor de referência (1.1 W/mK) indicado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Pina dos Santos e Matias, 2006), mas dentro da faixa encontrada na literatura para este material (Malbila *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2020; Turco *et al.*, 2024). Ainda com base nos valores definidos pelo LNEC, é possível identificar o potencial térmico do BTC em comparação a elementos convencionais de alvenaria. Para uma mesma espessura (15 cm), o BTC supera em 21% a resistência térmica do tijolo cerâmico maciço (0.236 x 0.195 m²K/W) e em 18% o bloco de betão normal (0.20 m²K/W). Os blocos de betão leve e o tijolo cerâmico furado apresentam valores de R-value superiores (0.31 e 0.39 m²K/W), como era esperado devido ao maior volume de ar aprisionado.

Os valores obtidos para o painel de cana comprovaram o potencial deste material enquanto solução de isolamento térmico. Segundo o LNEC (Pina dos Santos e Matias, 2006), o painel de cana pode ser

comparado a painéis a base de madeira e derivados, como por exemplo os painéis de contraplacado, com valores entre 0.09 e 0.24 W/mK dependentes da densidade, e os painéis de aglomerado de partículas de madeira, entre 0.1 e 0.18 W/mK. Contudo, sua condutibilidade térmica ainda carece de melhorias para alcançar níveis análogos aos de materiais tradicionais de isolamento, como a lã de rocha (λ = 0.045 W/mK) ou o aglomerado de cortiça (λ = 0.065 W/mK). Além disso, os resultados mostram que o seu coeficiente de variação é elevado, mas este comportamento é expectável consoante à heterogeneidade do material. Este fenómeno está em linha com as indicações da ISO 9869-1:2014 (BSI, 2014), que define que a incerteza total de uma medição pode estar compreendida no intervalo de 14% a 28%. Neste contexto, Barbaresi *et al* (2020) afirmam que esta faixa de incertezas é razoável para testes de baixo custo, que têm como principal objetivo identificar materiais com potencial de alto desempenho térmico.

A Figura 7 apresenta os gráficos de uma amostra de cada solução avaliada e demonstra como eles se comportam durante o ensaio na *hotbox*. Destaca-se que o tempo de estabilidade dos valores para cada tipo de material, uma vez que o XPS atinge um valor estável mesmo antes das 72 horas necessárias para a validação do ensaio de acordo com a norma. Entretanto, materiais mais heterogéneos, como o BTC e o painel com canas, demoram ao menos 24h a mais para atingir a estabilidade do fluxo de calor.

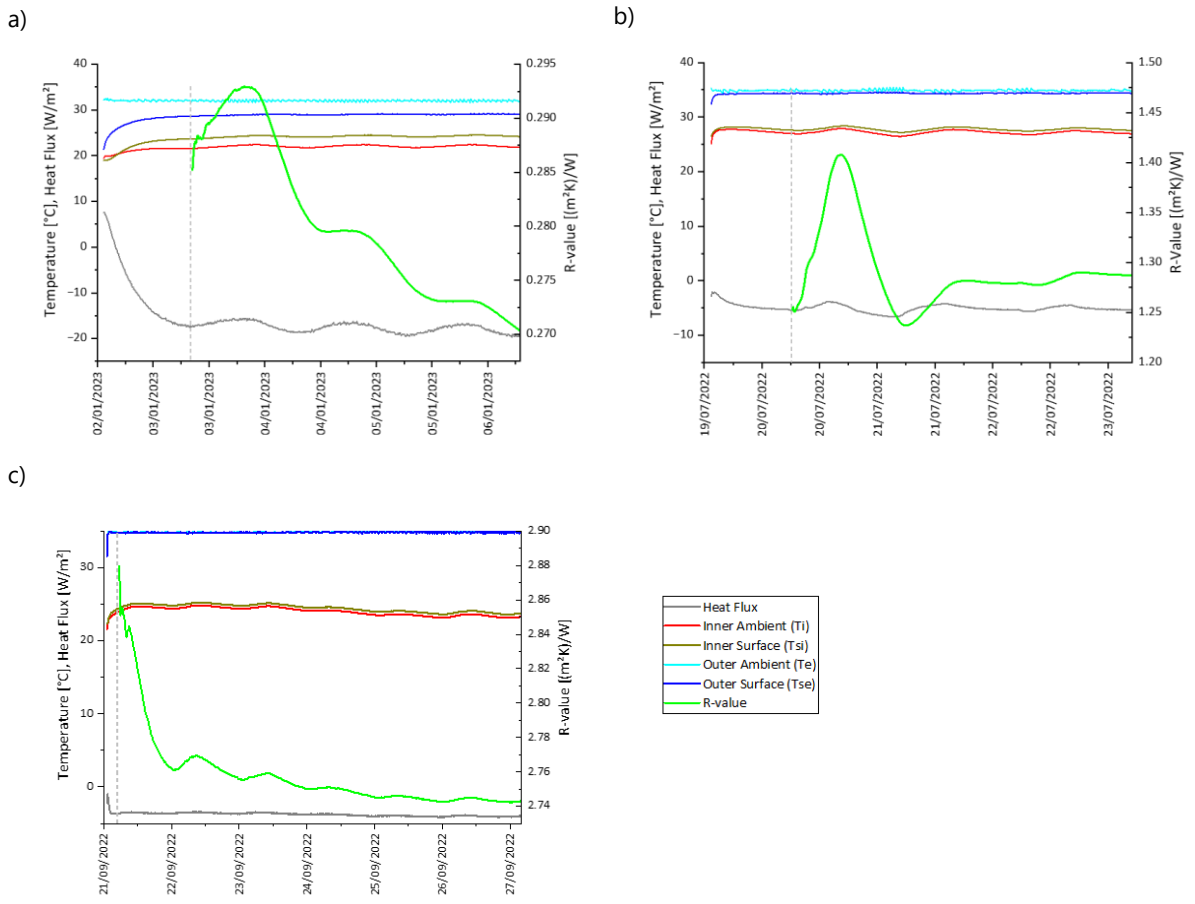


Figura 7 – Resultado de ensaio típico obtido para cada material estudado: a) BTC; b) Painel de Cana; c) XPS

Para um resultado válido, o valor da resistência térmica obtida não pode desviar-se em mais de 5% do valor obtido nas últimas 24 horas e os primeiros 2/3 de tempo de medição não podem se desviar mais de 5% do último terço do tempo de ensaio. Esta diferença entre materiais no tempo para um resultado

válido, demostra a existência de outras características não menos importantes dos materiais heterogéneos e de base orgânica, como por exemplo a inércia térmica presente nos blocos de terra.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um procedimento para determinar a resistência térmica de diferentes soluções construtivas através do método do estado estacionário com recurso a *hotbox*. Foram respeitados os critérios normativos, nomeadamente a diferença de temperatura e o tempo mínimo de ensaio, o que permitiu encontrar resultados confiáveis para os diferentes produtos de construção avaliados. Isso evidencia a capacidade da *hotbox* e de todo os equipamentos utilizados para aplicação na caracterização das propriedades térmicas de produtos de origens diversas, em especial nas fases preliminares de desenvolvimento de produtos com potencial de isolamento térmico.

A principal limitação do estudo envolve a capacidade desta *hotbox* laboratorial em analisar provetes e painéis de maior dimensão, que integrem materiais de alta densidade. Adicionalmente, um dos grandes desafios identificados durante o procedimento consistiu em garantir a fixação dos sensores nas faces de provetes heterogéneos durante todo o ensaio. Para isto, a face do provete foi limpa cuidadosamente (a fim de evitar danos superficiais), para em seguida proceder à colagem de uma fita térmica com resistência térmica irrisória, tal como recomendado pelo fabricante do equipamento e norma de ensaio utilizada. Como trabalho futuro, sugere-se a construção de uma *hotbox* com maior capacidade volumétrica, que permitirá a análise de soluções construtivas em escala real; estabelecer uma comparação entre os resultados dos ensaios obtidos através desta *hotbox* com resultados oriundos de ensaios pelo método transiente; e ainda uma análise mais detalhada do comportamento de cada material até o alcance da estabilidade definida pela norma ISO 8969 de modo a interpretar mais variáveis térmicas que são influenciadas pela composição e manufatura de cada provete.

Os materiais testados neste estudo exibem um potencial significativo em várias aplicações, demonstrando propriedades térmicas distintas que se alinham com as suas utilizações pretendidas. O XPS, enquanto material de isolamento já consolidado, apresentou resultados muito próximos das especificações do fabricante. Em relação aos BTC, os resultados encontrados situam-se dentro da gama referida na literatura. É de salientar que os BTC superam os elementos de alvenaria tradicionais, como os tijolos cerâmicos maciços e os blocos de betão normais, em termos de resistência térmica. O painel de cana também se mostrou promissor como isolante térmico, comparável aos painéis à base de madeira, embora a sua condutividade térmica precise de ser melhorada para atingir os níveis dos isolantes tradicionais. O elevado coeficiente de variação dos seus resultados é esperado devido à heterogeneidade do material e está alinhado com as normas de referência. Os tempos de estabilidade observados durante os testes em estado estacionário ilustram ainda mais os comportamentos distintos de cada material, com o XPS a estabilizar rapidamente dentro do período padrão de 72 horas, enquanto materiais mais heterogéneos como o BTC e os painéis de cana requerem pelo menos mais 24 horas. Em conclusão, este estudo sublinha os potenciais térmicos destes materiais, destacando a sua adequação a diferentes aplicações de isolamento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi também financiado por fundos do Fundo Social Europeu (FSE) e do

Programa POR NORTE através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia e do Programa MIT Portugal, ao abrigo do contrato de subvenção atribuído ao 1º autor (SFRH/BD/151345/2021) e ao 3º autor (PRT/BD/152839/2021).

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (A.S.T.M.) (2011). C1363-11: Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus. Committee D16 on Thermal Insulation.

Alhawari, A., Mukhopadhyaya, P. (2022). Construction and Calibration of a Unique Hot Box Apparatus. Energies, 15. https://doi.org/10.3390/en15134677

Asdrubali, F., Baldinelli, G. (2011) Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. Energy Build. 43, 1618–1626. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005

Barbaresi, A., Bovo, M., Santolini, E., Barbaresi, L., Torreggiani, D., Tassinari, P. (2020). Development of a low-cost movable hot box for a preliminary definition of the thermal conductance of building envelopes. Build. Environ. 180, 107034. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107034

Brito, J. D., & Gomes, M. G. (2020). Special Issue “Building Thermal Envelope”. Energies, 13(5), 1061. https://doi.org/10.3390/en13051061

BSI (2014). BS ISO 9869-1: 2014 - Thermal Insulation–Building Elements–in situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Part 1: Heat Flow Meter Method.

BSI (1996). ISO 8990:1996. Thermal Insulation. Determination of Steady-State Thermal Transmission Properties. Calibrated and Guarded Hot Box.

Buratti, C., Belloni, E., Lunghi, L., Barbanera, M. (2016). Thermal Conductivity Measurements By Means of a New ‘Small Hot-Box’ Apparatus: Manufacturing, Calibration and Preliminary Experimental Tests on Different Materials. Int. J. Thermophys. 37, 1–23. https://doi.org/10.1007/s10765-016-2052-2

de Rubeis, T., Muttillo, M., Nardi, I., Pantoli, L., Stornelli, V., & Ambrosini, D. (2019). Integrated measuring and control system for thermal analysis of buildings components in hot box experiments. Energies, 12(11), 2053. https://doi.org/10.3390/en12112053

Lu, X., Memari, A. M. (2018). Comparative study of Hot Box Test Method using laboratory evaluation of thermal properties of a given building envelope system type. Energy and Buildings, 178, 130-139. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.044

Malbila, E., Toguyeni, D. Y. K., Bamogo, S., Lawane, A., & Koulidiati, J. (2018). Thermophysical and Mechanical Characterization of Local Stabilized Materials Suitable for Buildings in Dry and Hot Climate. Journal of Materials Science & Surface Engineering, 6(2), 767–772.

Peters, B., Sharag-Eldin, A., & Callaghan, B. (2017). Development of a simple Hot Box to determine the thermal characteristics of a three-dimensional printed bricks. In Proceedings of the ARCC 2017 Conference—Architecture of Complexity, Salt Lake City, UT, USA.

Pina dos Santos, C., Matias, L. (2006). ITE50: Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios.

Schiavoni, S., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review

and comparative analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 988-1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045

Smith II, S. K. (2016). Development of the modified hot box: A convective heat transfer device for measuring the steady state and transient thermal properties of non-homogenous building materials. Doctoral dissertation, Clemson University. Disponível em: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2548/

Teixeira, E.R., Machado, G., De Adilson, P., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S.M., Mateus, R. (2020). Mechanical and thermal performance characterisation of compressed earth blocks. Energies 13. https://doi.org/10.3390/en13112978

Turco, C., Junior, A.P., Fernandes, J., Teixeira, E., Mateus, R. (2024). Influence of Particle Size on Compressed Earth Blocks Properties and Strategies for Enhanced Performance. Appl. Sci. 14(5), 1779. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14051779

United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector", *Global Status Report for Buildings and Construction*. Available from: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095

Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039

Yehya, N., Maatouk, C. (2023). Design and Construction of a Simple Hot Box for Thermal Characterization of Building Envelopes. 2023 6th Int. Conf. Renew. Energy Dev. Countries, REDEC 2023 112–117. https://doi.org/10.1109/REDEC58286.2023.10208169

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MISTURAS COM BAIXO TEOR DE CIMENTO PARA MANUFATURA ADITIVA

José Vinícius Rodrigues Maia[a]; Alanielly de Sousa Costa[b]; Gustavo de Lima Seixas Cunha[c], Pedro Mendes de Sousa[d], Leonardo de Souza Dias[e], Fernanda Karolline de Medeiros[f], Marcos Alyssandro Soares dos Anjos[g]

[a] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, Brasil), vinicius.maia@academico.ifpb.edu.br

[b] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, Brasil), costa.alanielly@academico.ifpb.edu.br

[c] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, Brasil), gustavo.cunha@academico.ifpb.edu.br

[d] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, Brasil), mendes.pedro@academico.ifpb.edu.br

[e] (Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), leonardodiaspb@gmail.com

[f] (Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), fernanda_karolline@hotmail.com

[g] (Instituto Federal da Paraíba - IFPB / Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Brasil), marcos.anjos@ifpb.edu.br

RESUMO

O *3D Concrete Printing* (3DCP) se apresenta como uma nova alternativa construtiva que possibilita a modernização dos processos construtivos atuais. Porém, para o desenvolvimento da tecnologia é necessário atender características e propriedades de mistura específicas, juntamente com os requisitos reológicos que garantam a impressão, requerendo em muitos casos, como aponta a literatura, elevados teores de cimento nas composições. Diante disso, crescem a preocupação sobre questões ambientais e a exploração por materiais mais eficientes e sustentáveis que possibilitem soluções mais ecológicas para o devido uso na indústria da construção. Assim, o presente trabalho consiste em um método de pesquisa experimental que busca avaliar a influência da inserção do fíler calcário, metacaulim e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) na reologia de misturas para impressão 3D em concreto. As misturas 3DCP produzidas foram avaliadas em estado fresco quanto a viscosidade, espalhamento e perda de consistência medidos no ensaio de *flow table*, além da construtibilidade que permitiu analisar a capacidade de construção e deformação das camadas impressas. Frente aos resultados obtidos, o fíler calcário promoveu o aumento da fluidez em estado fresco e uma menor capacidade de estruturação das peças impressas. Já ao adicionar o metacaulim e a CBC, percebeu-se um elevado ganho de consistência e viscosidade das misturas, respectivamente. A partir dessa substituição por materiais abundantes na região nordeste do Brasil, foi possível reduzir significativamente o consumo de cimento das misturas, além de manter e aprimorar a qualidade dos compósitos produzidos. Desta maneira, quando comparado às misturas 3DCP sem substituição ou adição, as proporções produzidas se apresentam como alternativa promissora na redução do consumo de cimento e consequentemente na diminuição da emissão de CO_2.

Palavras-chave: 3D printing, Reologia, Adição mineral, Fíler calcário, Bagaço da cana-de-açúcar.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção possui um peso significativo quanto ao desenvolvimento econômico e social, além de atender o crescimento populacional global, investimento em infraestrutura, entre outros, vivenciado desde o último século. No entanto, essa crescente trouxe desafios no enfrentamento dos impactos ambientais desencadeados pelo setor, podendo destacar a preocupação com a descarbonização dos materiais de construção.

A indústria da construção contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo a produção do cimento um dos principais responsáveis por essa emissão, cerca de 74% a 81% do impacto atrelado a construção civil, o equivalente a cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO2), sendo emitido para cada tonelada produzida uma média de 561-622 kg de CO2 (Rocha et al. 2022).

Dentro da visão do ciclo de vida da produção de cimento, os insumos são matéria-prima, combustível e energia, e na saída, um grande número de poluentes e resíduos são produzidos como subproduto (Shen et al. 2016). E para alcançar o crescimento econômico e o desenvolvimento sustentável ao mesmo tempo, é necessário um sistema de gestão eficaz e adoção de medidas mitigadoras na produção de cimentos, como: eficiência energética durante a produção; troca de combustível ou uso de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) e Captura e Uso de Carbono (CCU); substituição de clínquer por adições minerais ou Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) e utilização eficiente do cimento (Rocha et al. 2022).

A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é uma das principais medidas e fortemente discutidas na atualidade, sendo uma estratégia capaz de reduzir em até 50% as emissões de CO2. No entanto, requer um grande investimento financeiro e uma elevada qualidade energética e estrutural, o que afeta diretamente o custo final do cimento a curto e médio prazo, sendo necessário desenvolvimento tecnológico que possa baratear o processo (ECRA 2013). De maneira semelhante, a substituição de clínquer por SCM, como pozolanas naturais, escória granulada de alto forno, cinza volante, argila calcinada, entre outros, apresenta grande potencial de redução do clínquer e consequentemente das emissões de CO2. No entanto, a disponibilidade local desses materiais pode inviabilizar ou agregar custos na produção. Além disso, materiais de origem residuais, como a Escória de alto forno, a longo prazo deverão ter sua disponibilidade reduzida à medida que novas mudanças nos processos industriais forem aprimoradas e mais fontes renováveis de energia forem adotadas (Rocha et al. 2022).

A eficiência na utilização do cimento também é uma das estratégias por meio de técnicas de incorporação de materiais alternativos na produção do material cimentício, aditivos químicos, e práticas que reduzam o seu consumo e os desperdício atrelados ao projeto e execução de uma obra, além de adotar técnicas e tecnologias no processo de construção, como é o caso manufatura aditiva. O que será trabalhado no estudo (Cheung et al. 2011).

Frente a um setor ainda pouco modernizado, a impressão 3D (3DCP) ou manufatura aditiva (MA) em concreto emerge como uma alternativa para automatizar e renovar, em certa medida, a indústria da construção civil (Liu et al. 2023; Li et al. 2020). De acordo com Yossef e Chen (2015), a impressão 3D torna a produção em larga escala mais acessível, reduz a necessidade de trabalho manual, acelera o processo construtivo, proporciona a liberdade arquitetônica e minimiza a geração de resíduos em comparação com os métodos tradicionais de construção.

As produções em 3DCP são feitas de forma contínua a partir da movimentação do bico de impressão que se move tridimensionalmente (eixo x, y e z) depositando camada sobre camada para que as modelagens computacionais se tornem em objetos e habitações físicas (Souza et al. 2024). Este

método de impressão, amplamente utilizado em todo o mundo, é fundamentado na tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), a Modelagem por Fusão e Deposição (Sanjayan et al. 2018).

A utilização de concreto na impressão 3D para construções tem experimentado um crescimento acelerado, avançando da fase experimental para a produção de protótipos e produtos com aplicações comerciais (Bos et al. 2022). Esse desenvolvimento tem impulsionado a formação de grupos de pesquisa e startups ao redor do mundo, focados na impressão 3D, viabilizando a construção de residências, edifícios, pontes, elementos arquitetônicos decorativos e mobiliário urbano.

Na busca por criar cidades sustentáveis, é crucial procurar por matérias-primas que promovam o desenvolvimento sustentável das produções em impressão 3D em concreto, especialmente daquelas disponíveis e abundantes na região onde se deseja construir (Weng et al. 2020; Zhang et al. 2021). Porém, o que se percebe é exatamente o contrário, as diversas impressões ao redor do mundo estão sendo produzidas a partir de misturas com elevados teores de Cimento Portland, apresentando consumos superiores a 700 kg/m³ (Ding et al. 2020; Ting et al. 2021). Essa realidade contribui para uma indústria cada vez mais preponderante no consumo de cimento e na emissão de gases de efeito estufa.

Como o estudo da metodologia 3DCP revela a necessidade de misturas com altas proporções de aglomerante para atender aos requisitos de impressão, este trabalho tem o objetivo de avaliar a influência na reologia a partir da inserção do fíler calcário, metacaulim e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como substitutos parciais do cimento. Assim, a expectativa é fornecer uma contribuição para a formulação de misturas que atendam aos padrões de impressão, reduzindo a necessidade usual de alto consumo de cimento na fabricação de peças em 3DCP e contribuindo para o desenvolvimento de processos construtivos ecoeficientes e sustentáveis.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção das misturas foram obtidos regionalmente, sendo estes submetidos a uma avaliação conduzida por ensaios que buscaram investigar as suas principais características físicas. Os ensaios são apresentados no Quadro 1, acompanhados das normativas utilizadas para cada categoria de material.

Quadro 1 - Parâmetros dos materiais a serem estudados e suas normas correlatas

Material	Propriedade	Norma técnica
Agregado Miúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT 2003)
	Massa Específica	NBR NM 52 (ABNT 2009)
	Porcentagem de Finos	NBR NM 46 (ABNT 2003)
Cimento (CPV)	Massa Específica	NBR NM 23 (ABNT 2000)
Filler Calcário (FC)		
Metacaulim (MK)		
Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)		

2.1.1 Agregado

A fim de realizar os ensaios de caracterização dos agregados, uma amostra foi coletada inicialmente e submetida ao processo de quarteamento. Em seguida, essa amostra foi direcionada para o tratamento específico de cada ensaio, seguindo as normas correspondentes a cada um deles.

Para a granulometria, duas amostras de 500g foram submetidas a um processo de secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Após esse período, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente e transferidas para o conjunto de peneiras da série normal, de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT 2003). O material retido em cada peneira foi pesado e, a partir desses dados, determinou-se o módulo de finura, a dimensão máxima característica e a curva granulométrica, conforme ilustrado na Figura 1. Adicionalmente, são apresentados os resultados massa de específica para a areia e demais propriedades físicas determinadas por meio dos ensaios mencionados, abrangendo o módulo de finura, o diâmetro máximo do material e o teor de material pulverulento.

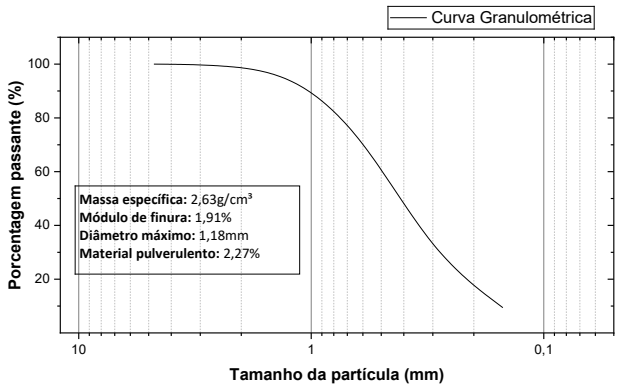


Figura 1 - Caracterização granulométrica e física do agregado

2.1.2 Aglomerante e adições

Foi utilizado o cimento Portland CPV ARI, tendo pega rápida, sem adições minerais, com uma massa específica de 3,04 g/cm³ e com diâmetro médio das partículas de 8,04 µm. Além disso, foram empregados aditivos à mistura, incluindo um aditivo superplastificante SC160 (SP) à base de policarboxilatos e modificadores de viscosidade UW410 a base de Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), ambos da *Master Builders Solutions*®. Quanto aos materiais suplementares tem-se: Filler Calcário (FC), massa específica de 2,72 g/cm³; Metacaulim (MK), massa específica de 2,49 g/cm³; e Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), com massa específica de 1,98 g/cm³.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Sistema de impressão, preparação e definição das misturas

A impressora desenvolvida pelos autores é um sistema de impressão do tipo pórtico, projetado e construído para imprimir peças de até 1,0 m³. O equipamento possui uma configuração de base cartesiana com movimentação mecanizada em seus eixos. Ele é equipado com um bico extrusor responsável pela deposição do material cimentício. Durante o processo de impressão, a velocidade de movimentação nos eixos foi mantida constante em 2000 mm/min e rotação de extrusão de 17 RPM. O bico de impressão possui um formato circular com um diâmetro de 20 mm, resultando em uma espessura média de camada depositada de 18 mm e uma largura média de 35 mm.

A preparação da mistura para impressão foi realizada em um argamassadeira com dupla velocidade, na seguinte sequência de mistura: inicialmente, o cimento e areia foram homogeneizados durante aproximadamente 2 minutos, com o movimento de rotação. Em seguida, adicionou-se 90% da massa de água, mantendo a mistura em movimento por mais 2 minutos. Logo após, o superplastificante foi adicionado juntamente com o restante da água, continuando a mistura mecanizada por mais 2 minutos. Posteriormente, os materiais suplementares eram adicionados individualmente e levados à

mistura um período de 2 minutos cada. Por fim, o aditivo viscosificador era incorporado à argamassa e misturado por mais 2 minutos.

O método de dosagem utilizado neste estudo baseou-se na determinação das relações constitutivas das composições, buscando permitir a impressão 3D de argamassa considerando as características do equipamento. A definição das quantidades dos materiais para a mistura foi feita com base nos valores encontrados na literatura por Barbosa et al. (2022), sendo realizado substituições de 10,20 e 30% do cimento em massa pelo CBC. A relação água/materiais secos (W/Md) ideal foi determinada como 0,15 (15% em massa), 0,15% de aditivo modificador de viscosidade (VMA) e com uma variação de 1,5% a 0% de aditivo superplastificante (SP), de modo que o espalhamento na mesa de consistência atingisse um valor entre 200 mm e 230 mm (± 10mm), que de acordo com Dias (2022), se apresenta como imprimível para o sistema utilizado. O Quadro 2 apresenta as composições com relações e quantidades de materiais adotados.

Quadro 2 - Composições adotadas

Mistura	Cimento (kg/m³)	Fc (kg/m³)	CBC (kg/m³)	MK (KG/M³)	SP (%)	VMA (%)	W/Md (%)	a/c (kg/kg)
REF	649,76	0,00	0,00	0,00	0,20	0,15	15	0,45
CBC10	578,20	0,00	64,24	0,00	0,50	0,15	15	0,50
CBC20	508,23	0,00	127,06	0,00	1,00	0,15	15	0,56
CBC30	439,80	0,00	188,49	0,00	1,50	0,15	15	0,64
FC40	386,00	257,33	0,00	0,00	0,00	0,15	15	0,75
FC40CBC10	318,08	254,46	63,62	0,00	0,50	0,15	15	0,90
FC40CBC20	251,66	251,66	125,83	0,00	0,85	0,15	15	1,13
MK10	582,04	0,00	0,00	64,67	0,50	0,15	15	0,50
MK10CBC10	511,57	0,00	63,95	63,95	1,00	0,15	15	0,56
Mk10CBC20	442,66	0,00	126,47	63,24	1,25	0,15	15	0,64

2.2.2 Espalhamento, massa específica e retenção de água

A fluidez das misturas foi avaliada por meio do ensaio de espalhamento na mesa de consistência, conforme descrito na NBR 13276 (ABNT 2019), sendo medido o diâmetro médio da argamassa espalhada em três direções perpendiculares. Para massa específica, essa seguiu a NBR 13278 (ABNT 2005) com a determinação da massa em recipiente padrão e volume conhecido, possibilitando o cálculo da densidade de massa da argamassa. Já para retenção de água seguiu os processos estabelecidos pela norma NBR 13277 (ABNT 2005), com a utilização de um funil Buchner modificado.

2.2.3 Viscosidade

Considerando a importância das propriedades reológicas das misturas no processo de impressão 3D de argamassa, devido à sua tixotropia necessária, a viscosidade de cada mistura no estudo foi avaliada utilizando um viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I (IKA®). Para a medição, foi utilizada uma paleta de quatro pás tipo vane, com comprimento total de 95 mm e cada pá com comprimento de 11,8 mm e diâmetro de 5,9 mm.

Com o objetivo de permitir que a mistura alcance um estado de fluxo adequado e minimizar o efeito da tixotropia, foram realizados ciclos de histerese utilizando diferentes velocidades angulares. O ciclo de histerese consistiu em aplicar o cisalhamento de forma crescente, com velocidades angulares de 10 rpm a 150 rpm, seguido por uma etapa de decréscimo das velocidades na mesma sequência, além da velocidade de 17 rpm que corresponde ao valor da rotação de extrusão.

2.2.4 Retenção de forma

A retenção de forma foi avaliada pela deformação das camadas (Figura 2), em um arranjo de 5 camadas, para calcular a relação Hc conforme Equação 1. Quanto mais próxima de 1 essa relação estivesse, mais ideal seria, indicando ausência de deformação à medida que a impressão avançava.

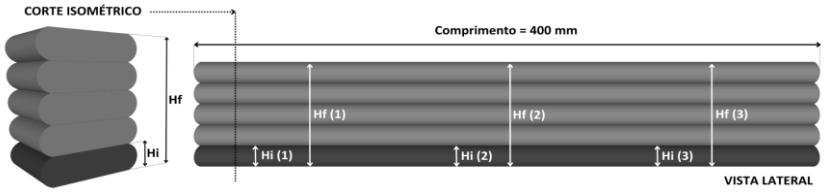


Figura 2 – Representação esquemática do ensaio de retenção de forma

$$H_c = \frac{H_f}{H_T} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Em que: H_f = altura final, medida após empilhamento de 5 camadas; H_T = altura teórica prevista para as 5 camadas, ou seja, $H_T = 5H_i$; e, H_i é a altura da primeira camada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RETENÇÃO DE ÁGUA

Os resultados dos testes de retenção de água das argamassas estão mostrados na Figura 3. Observa-se que as argamassas CB10, CB20 E CB30 tiveram uma retenção de 95,33%, 95,42% e 95,45%, respectivamente, um pouco maiores quando comparadas com a argamassa REF. Nas misturas contendo FC a variação da retenção tende a aumentar linearmente com R^2 de 0,97, e entre elas a variação crescente com uso do CBC, sendo 93,74% para FC40, 94,38% para FC40CBC10 e 97,52% para FC40CBC20. Quando se trata das argamassas que contêm MK essas apresentam a maior porcentagem de retenção, comparando entre os outros grupos (CPV e CPV-FC), variando entre 97,46%, 97,87% e 98,12% para MK10, MK10CB10 e MK10CBC20, respectivamente, com crescimento linear e R^2 de 0,98.

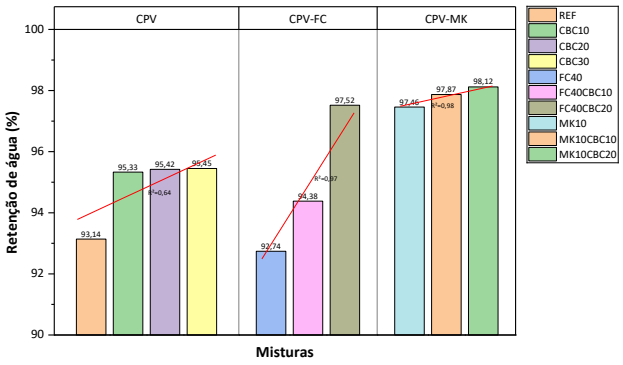


Figura 3 – Retenção de água das misturas

O uso de CBC aumenta a capacidade de retenção das misturas analisadas, esse efeito pode estar relacionado com as partículas, já que se trata de um material fino. Pode-se observar um comportamento semelhante quando há a adição de MK, na verdade, a retenção se torna ainda maior. Esse fenômeno de aumento pode estar relacionado ao fato das partículas mais finas terem maior capacidade de reter água devido sua maior área superficial (Monteiro et al. 2024). Logo, quanto maior for a substituição de parte do cimento pelo uso de CBC, FC e MK mais as argamassas reterão água.

3.2 ESPALHAMENTO E MASSA ESPECÍFICA

Estudos prévios, como os realizados Ma et al. (2018), Kaszyńska et al. (2020) e Dias (2022), indicaram que para garantir uma capacidade adequada de extrusão, tornando as misturas imprimíveis, os valores de distribuição ideais devem situar-se entre 160 mm e 240 mm. O que corrobora com os resultados deste estudo que revelam uma variação dos valores obtidos, oscilando entre 196,22 mm e 240,32 mm, como pode ser observado na Figura 4. É fundamental ressaltar que tais recomendações não são necessariamente aplicáveis a todos os sistemas de impressão, visto que sua eficácia está condicionada tanto às propriedades reológicas das misturas quanto às características específicas da impressora empregada.

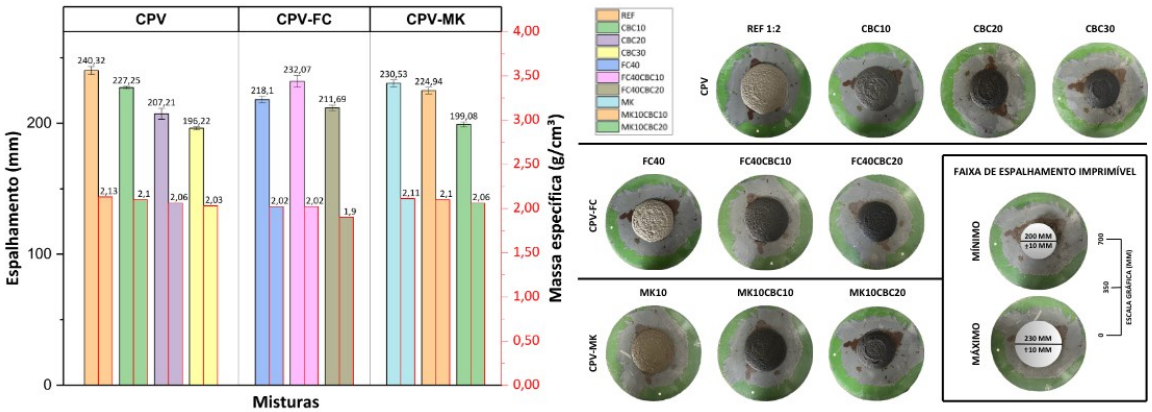


Figura 4 – Resultados de espalhamento e massa específica das misturas e sua visualização no ensaio

Na Figura 4, nota-se que a inclusão das adições, especialmente do CBC, resultou na redução do espalhamento e da massa específica, inclusive nas misturas binárias de Filler, quanto de Metacaulim . Os valores de massa específica para os concretos com adição de CBC oscilaram entre 1,90 kg/m3 para o concreto FC40CBC20 (CPV com 20% CBC e 40% FC) e 2,10 kg/m3 para os concretos CBC 20 (CPV com 20% de CBC) e MK10CBC10 (CPV com 10% MK e 10% CBC).

A diminuição do espalhamento pode ter ocorrido devido à alta superfície específica da cinza e ao menor tamanho das partículas, o que resulta em uma maior demanda por água (Ganesan et al. 2007). Já para as massas específicas ocorreu em virtude da substituição do cimento por materiais de menor massa específica, que é o caso da CBC, FC e do MK. Segundo Santos (2011), dado que muitas adições têm uma massa específica inferior à do cimento, é provável que haja um aumento no volume de pasta (cimento + adição + água).

A influência combinada das adições também impactou a consistência das misturas com metacaulim, sendo que o menor espalhamento foi observado para o MK10CBC20, devido aos teores mais elevados das adições. O metacaulim é caracterizado por uma superfície rugosa, o que lhe confere a capacidade

de absorver uma quantidade significativa de água da pasta, resultando em uma consistência mais densa e, consequentemente, menos fluida (Duan et al. 2022).

3.3 RETENÇÃO DE FORMA

A Figura 5 a) apresenta os resultados de retenção de forma (Hc) para as composições em análise. Verifica-se quanto a retenção de forma nos 3 segmentos, CPV,CPV-FC e CPV-MK, que não existe relação direta entre o Hc, entretanto internamente a cada grupo observa-se que quando há o aumento do consumo de CBC existe um acréscimo de Hc.

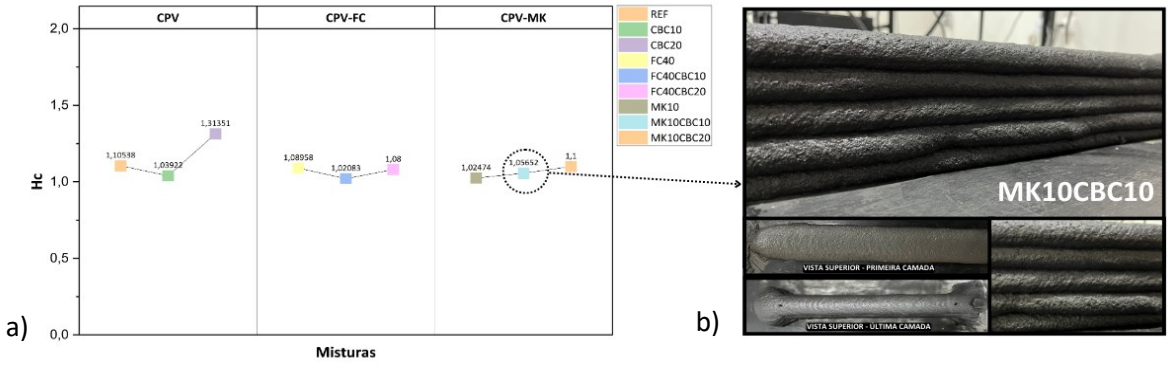


Figura 5 – a) Resultados de retenção de forma das misturas; b) Visualização da impressão

Barbosa et al. (2022) apresentou em seus resultados um comportamento semelhante ao substituir cimento por FC e MK, observando um aumento de Hc com o aumento do consumo dos materiais suplementares. Além disso, esse padrão reflete as características de retenção de água e a capacidade de mobilidade das misturas quando sujeita a estresse (espalhamento). Percebe-se que um maior consumo de CBC pode levar a aumentar a retenção de água e diminuir a mobilidade das misturas, resultando em camadas com maior estabilidade estrutural e, consequentemente, menores deformações, o que contribui para um maior Hc.

Ainda na Figura 5 b) observa-se a diferença do espalhamento na impressão durante a primeira camada e a última, sendo perceptível a redução da fluidez entre as camadas, em que a primeira camada é mais fluída tendo uma altura menor, posteriormente as camadas seguintes possuem menor fluidez ocasionando altura final (Hf) maior que altura esperada (Ht).

3.4 VISCOSIDADE

Na Figura 6 a), é apresentada a viscosidade medida nas misturas com rotação de 17 RPM, rotação na qual a mistura é extrudada no sistema de impressão. Observa-se um comportamento de aumento da viscosidade à medida que aumenta a substituição de cimento por CBC, independentemente da composição (CPV, CPV-MK ou CPV-FC), comportamento esse esperado quando se observa a mobilidade da mistura no ensaio de espalhamento, sendo as características físicas no material suplementar um possível contribuinte para tal resposta.

A Figura 6 b) apresenta os resultados de viscosidade para as diferentes rotais analisas em uma rampa de aceleração e desaceleração, sendo possível observar que curvas de todas as misturas possuem um comportamento típico dos fluidos pseudoplásticos, os quais são caracterizados por apresentarem uma diminuição na viscosidade aparente conforme a taxa de cisalhamento aumenta.

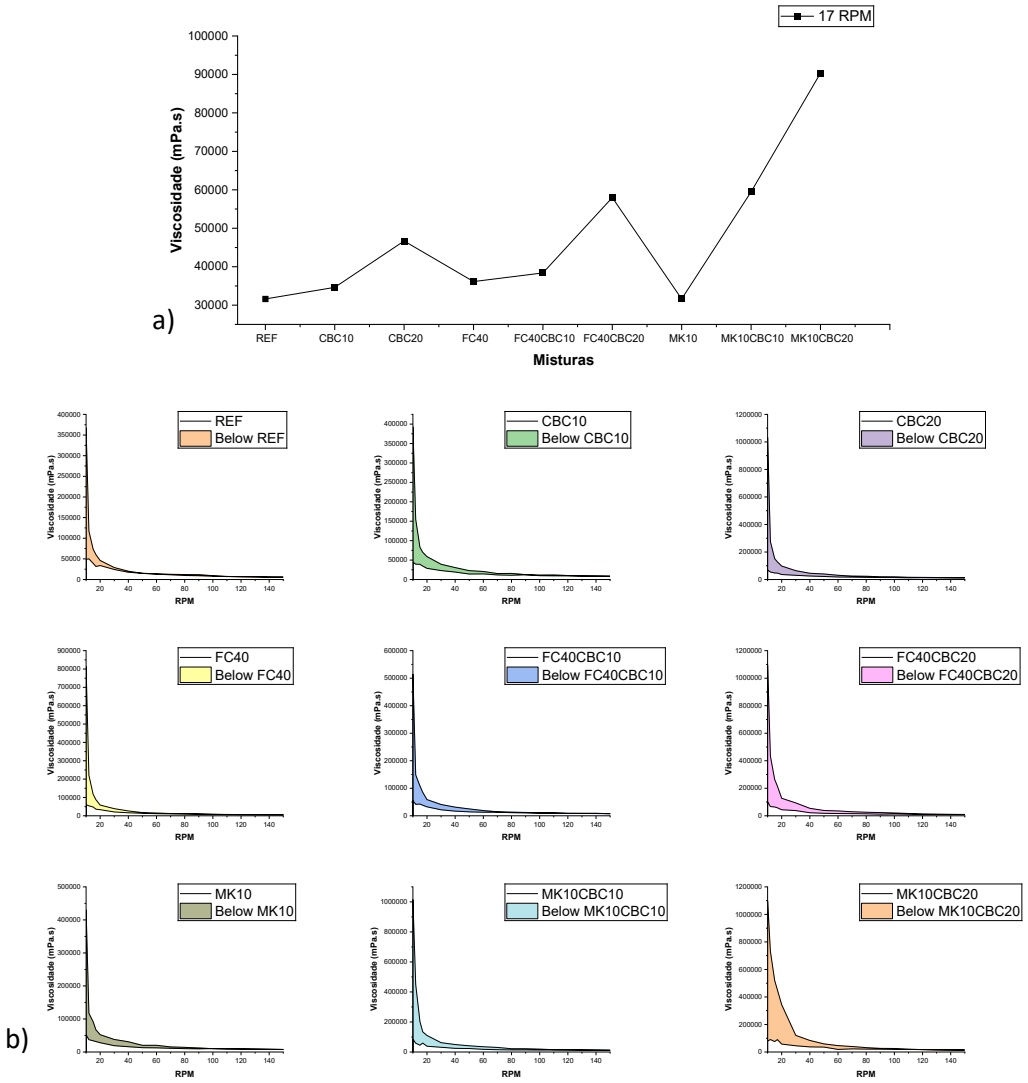


Figura 6 – a) Resultados da viscosidade das misturas na rotação de 17 RPM; b) Resultados de viscosidade das misturas analisadas

Boukhatem et al. (2021) aborda que esse comportamento está relacionado às interações presentes nas misturas, em que nas condições de baixa taxa de cisalhamento, as forças de atração entre as partículas predominam sobre as forças hidrodinâmicas, o que leva à formação de aglomerados. Com o aumento da taxa de cisalhamento, as forças hidrodinâmicas se tornam mais intensas e promovem a quebra dos aglomerados em unidades menores, resultando na liberação da água que estava retida nos aglomerados, ocasionando uma redução na viscosidade do sistema.

Outro comportamento relevante está relacionado à área entre as curvas de aceleração e desaceleração, mostradas na Figura 7. Zhang et al. (2021) descreve que como resultado da taxa de quebra estrutural ser maior do que a taxa de acumulação estrutural ocorre essa redução de viscosidade durante a fase de aceleração. De maneira contrária, na fase de desaceleração a viscosidade aparente aumenta de forma contínua devido à menor taxa de degradação estrutural.

Essa característica da não restauração da mistura em um curto intervalo de tempo resulta na área destacadas, também denominadas de área de histerese. Essa área de histerese é usada para avaliação

do acúmulo estrutural na pasta de cimento, permitindo atestar que as misturas em análise, independente da matriz empregada, possuem um significante comportamento tixotrópico.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados expostos e na metodologia empregada, o presente estudo alcançou o objetivo inicialmente proposto ao avaliar a influência na reologia por meio da incorporação de fíler calcário, metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como substitutos parciais do cimento. Em termos gerais, é possível inferir que:

- As composições produzidas satisfizeram os critérios de impressão, resultando na redução do consumo de cimento para valores próximos a 250 kg/m³. Esse fato contribui significativamente para o desenvolvimento de processos construtivos eficientes e sustentáveis;
- O fíler calcário resultou em maior fluidez no estado fresco e menor capacidade de estruturação das peças impressas. Por outro lado, as adições de metacaulim e CBC proporcionaram um significativo aumento na consistência e viscosidade das misturas, respectivamente;
- Em todas as substituições, especialmente aquelas com maiores teores de CBC, observa-se uma diminuição nos resultados de espalhamento e densidade das misturas produzidas;
- À medida que mais parte do cimento é substituída por CBC, FC e MK, as argamassas aumentam sua capacidade de reter água, o que pode ser atribuído principalmente à maior capacidade das partículas finas de reter água devido à sua área superficial expandida;
- Dentro de cada grupo (CPV, CPV-FC e CPV-MK), nota-se que a elevação do consumo de CBC resulta em um aumento de HC. Esse padrão é observado também ao substituir o cimento por FC e MK. Assim, maiores teores de CBC podem aumentar a retenção de água e reduzir a mobilidade das misturas, resultando em camadas mais estáveis e menos deformáveis.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, CAPES, FAPESQ, IFPB – Campus João Pessoa (PRPIPG e DIPPED), pelo apoio financeiro, bem como pela disponibilização da estrutura laboratorial.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação de massa específica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

Barbosa, M. S., Dos Anjos, M. A. S., Cabral, K. C., Dias, L. S. (2022). Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. Construction and Building Materials, 341:127775. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127775

Bos, F.P., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., Da Silva, W.R.L., Rehman, A.U., Weger, D., Wolfs, R.J.M., Zhang, Y., Ferrara, L., Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. Cement and Concrete Research, 156:106746. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746

Boukhatem, A., Bouarab, K., Yahia, A. (2021). Kappa (κ)-carrageenan as a novel viscositymodifying admixture for cement-based materials – Effect on rheology, stability, and strength development. Cement and concrete composites, 124:104221. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104221

Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L., Silva, D.(2011). Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. Cement and Concrete Research, 41(12):1289-1309. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005

Dias, L. D. S. (2022). Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP). Dissertação de Mestrado (PPEC) - UFRN, Natal.

Ding, T., Xiao, J., Zou, S., Wang, Y. (2020). Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. Cement and Concrete Composites, 113:103724. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103724

Duan, Z., Li, L., Yao, Q., Zou, S., Singh, A., Yang, H. (2022). Effect of metakaolin on the fresh and hardened properties of 3D printed cementitious composite. Construction and Building Materials, 350:128808. https://016/j.conbuildmat.2022.128808

ECRA, I. (2013). Deployment of CCS in the Cement Industry. Technical report.

Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, 29(6):515–524. https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001

Kaszyńska, M., Skibicki, S., Hoffmann, M. (2020). 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. Energies, 13(23):6351. https://doi.org/10.3390/en13236351

Li, Z., Hojati, M., Wu, Z., Piasente, J., Ashrafi, N., Duarte, J. P., Nazarian, S., Bilén, S. G., Memari, A. M., Radlinska, A. (2020). Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. Sustainability, 12(14):5628. https://doi.org/10.3390/su12145628

Liu, D., Zhang, Z., Zhang, X., Chen, Z. (2023). 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities. Construction And Building Materials, 405:133364. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133364

Ma, G., Li, Z., Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. Construction and Building Materials, 162:613-627. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051

Monteiro, G. P., Marvila, M. T., Pedroti, L. G., De Brito, J., De Azevedo, A. R. G. (2024). Evaluation of coating mortars with addition of açaí seed (Euterpe oleracea Mart.) in different processing conditions. Journal of Building Engineering, 83:108459. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108459

Rocha, J.H.A., Toledo, Filho R.D., Cayo-Chileno, N.G. (2022). Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review. Materials Today: Proceedings, 57(2):436-439. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565

Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. Construction And Building Materials, 172:468-475. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

Santos, S. B. (2011). Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades: influência de aditivos plastificantes e adições minerais. (Tese de doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre. https://hdl.handle.net/10183/35633

Shen, L., Zhao, J., Wang, L., Liu, L., Wang, Y., Yao, Y., Geng, Y., Gao, T., Cao, Z. (2016). Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China. Chinese Science Bulletin, 61(26):2926-2938. https://doi.org/10.1360/N972016-00037

Souza, E. A., Borges, P. H. R., Stengel, T., Nematollahi, B., Bos, F. (2024). 3D printed sustainable low-cost materials for construction of affordable social housing in Brazil: Potential, challenges, and research needs. Journal of Building Engineering, 87:108985. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108985

Ting, G. H. A., Tay, Y. W. D., Tan, M. J. (2021). Experimental measurement on the effects of recycled glass cullets as aggregates for construction 3D printing. Journal of Cleaner Production, 300:126919. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126919

Weng, Y., LI, M., Ruan, S., Wong, T. N., Tan, M. J., Ow Yeong, K. L., Qian, S. (2020). Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. Journal of Cleaner Production, 261:121245. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245

Yossef, M., Chen, A. (2015). Applicability and Limitations of 3D Printing for Civil Structures. Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure, Iowa State University.

Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. Cement and Concrete Composites, 122:104155. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONTRIBUTOS PARA O ESTUDO DA CONSTRUÇÃO DE FALSA CÚPULA EM PORTUGAL: A *MALHADA* DE PORCOS NO CONTEXTO AGRO-PASTORIL DA BEIRA BAIXA

João P. F. Salvado[a,b]

[a] Universidade da Beira Interior (UBI), Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), Calçada Fonte do Lameiro, 6201-001, Covilhã, Portugal, joao.pedro.salvado@ubi.pt

[b] GeoBioTec-UBI, Geobiociências, Geoengenharia e Geotecnologias, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

RESUMO

Esta comunicação é motivada pelo desconhecimento em torno duma estrutura não habitacional destinada ao abrigo de porcos na sub-região da Beira Baixa, cuja existência é escassamente documentada pelas mais importantes publicações dedicadas ao assunto. Tendo como objetivo o seu reconhecimento no âmbito das Histórias da Arquitetura e da Construção portuguesas, a investigação traça o perfil da *malhada* de porcos beirã considerando o meio concreto em que progride, função, morfologia e materiais recorrentes, e tipos de cobertura. Como tal, definiram-se três estruturas num universo de meia centena de *malhadas* conhecidas na região, desde Castelo Branco até Penha Garcia, que foram posteriormente analisadas 'in loco' mediante levantamentos geométricos, fotográficos e descritivos.

Como ponto de chegada, as construções erguem-se em alvenaria de granito, xisto ou mista, orientadas para o meridiano sobre jazigos minerais. São conformadas por séries de *furdas* organizadas numa planta em «U», *rebolim*, *dobradeira* e casa do *porqueiro*, apresentando na amostra observada dimensões entre 15 e 39 m de comprimento. Assinala-se nas *malhadas* uma morfologia preeminente em toda a região, e os telhados são de duas águas ou em falsa cúpula. Conservam-se maioritariamente isoladas na paisagem, em meio ao *montado* de sobro, exibindo muitas ruína iminente ou consumidas por vegetação cerrada.

Palavras-chave: Construção, tecnologias construtivas tradicionais, falsa cúpula, malhada, Beira Baixa

1 INTRODUÇÃO

Tendo em conta o incremento da investigação publicada nas últimas décadas sobre arquitetura vernacular, em grande parte motivado pela valorização dos seus ensinamentos na conjuntura atual, a *malhada* de porcos enquadra-se no grupo das manifestações arquitetónicas que, não sendo genuinamente habitacionais, menos contributos inspiram a seu respeito, sabendo-se pouco acerca dela. Na História da Arquitetura e da Construção portuguesas são demais conhecidas as incursões em território nacional (peninsular e insular) que desde a década de 1940 com o «Inquérito à Habitação Rural» (Barros, 1942, 1947), (Basto e Barros, 1943), (Basto *et al*. 2012), «Arquitectura Popular em Portugal» (Távora *et al*. 1961) e as Arquitecturas Populares dos Açores (Tostões *et al*. 2000) e da Madeira (Mestre, 2001) ou, mais recentemente, com "From popular to contemporary: A review on Portuguese vernacular architecture" (Salvado *et al*. 2019) e «Arquitectura Popular em Portugal: Tecnologias construtivas tradicionais na contemporaneidade» (Salvado, 2021) permitiram revisitar as condições de habitabilidade da casa rural (Salvado, 2021, p. 23), confirmar a sua expressiva variedade tipológica, construtiva e material no país, e avaliar as transformações imediatas por que passou em setenta anos. A generalidade dos estudos, todavia, não se debruça sobre este tipo de edificado. Nas produções já referidas apenas se regista a captura fotográfica de uma *malhada* de porcos (intitulada «curral para porcos»), entre Monsanto e Medelim, durante os trabalhos de campo para o «Inquérito à Arquitectura Regional Portuguesa» [IARP (1955-1960)] da equipa da «Zona 3 Beiras». A soma do conhecimento mais detalhado relativamente a estruturas produtivas como a *malhada* aparece reunida nas múltiplas e diversificadas pesquisas com que Benjamim Pereira, E. Veiga de Oliveira, Fernando Galhano, Jorge e Margot Dias renovaram os estudos etnográficos em Portugal a partir de 1947 (Oliveira e Galhano, 1992). São exemplo disso o trabalho produzido em «Os Espigueiros Portugueses» (Dias *et al*. 1963), «Pisões Portugueses» (Oliveira e Galhano, 1977), «Sistemas de Moagem» (Oliveira *et al*. 1983), entre outros. A *malhada* encontra a sua fundamentação prática no termo das «construções de planta quadrangular», na obra «Construções Primitivas em Portugal» (Oliveira *et al*. 1969, p. 264), embora algumas publicações dedicadas à Zootecnia (Andrade, 1969) se ocupem dela como elemento fundamental de um dos três regimes tradicionais de criação suína identificáveis em Portugal pelo menos até finais da década de 1950 (Fernandes *et al*. 2008, p. 1). Ainda assim, para além da manifesta escassez de referências a este assunto, a literatura mencionada não reflete o estado atual destas construções, especialmente quando consideradas na sub-região da Beira Baixa.

O objetivo desta comunicação é, pois, o reconhecimento da *malhada* de porcos tradicional beirã (em alvenaria de xisto, granito ou mista) enquanto produto construtivo sustentável da cultura/economia rural campesina que subsiste mais ou menos incólume até à entrada nos anos 70 do século XX português. Simultaneamente, este é um contributo que releva os estudos da falsa cúpula em Portugal, já que só há pouco tempo a perspetiva beirã neste domínio foi retomada ao abrigo da Tese de Doutoramento «Construções em falsa cúpula: Elementos arquitetónicos de uma identidade vernácula na Beira Baixa», em curso na Universidade da Beira Interior, Covilhã. Por seu intermédio procede-se à localização e inventariação deste património abandonado na área correspondente à sub-região da Beira Baixa (ao longo de cerca de 3748 km^2), nesta fase em avançado estado de execução. No presente artigo, o conhecimento aprofundado da *malhada* desenvolve-se através de análises convencionais (gráficas e descritivas) dos diferentes casos identificados/observados no terreno (entre eles um em falsa cúpula), desde o sopé da Serra de Penha Garcia até aos arrabaldes a nordeste da cidade de Castelo Branco, num raio conjunto de aproximadamente 40 km.

2 A DIMENSÃO AGRO-PASTORIL DO PORCO EM PORTUGAL

2.1 ENQUADRAMENTO

De acordo com alguns autores, deve-se aos Romanos a difusão em grande escala da criação de porcos, que se consolida em Portugal durante o seu domínio (Pratas, 1929, p. 6). Já no séc. I a. C., o geógrafo de Amásia Estrabão localiza a produção enérgica de bolota na Ibéria, circunstância que deverá ter facilitado e impulsionado a atividade suína na península desde muito cedo (Deserto e Pereira, 2016, p. 49). Embora o porco se crie de norte a sul do país, as assimetrias regionais determinaram sistemas de exploração próprios. Até meados do séc. XX vigoraram em Portugal três regimes de criação do porco: pastoril (Figura 1), estabular (Figura 2) e misto. No pastoril, definido pela estrita área florestal que cobre as regiões da Beira Baixa, Alentejo e Estremadura espanhola (*montado* de sobro e azinho), o porco atravessava os campos em busca dos frutos (bolota/*lande*) que lhe serviam de alimentação quase única ao longo da *ceva* no *montado* (sistema de *montanheira*), onde pernoitava (Andrade, 1969, p. 82). No estabular, nas zonas cuja situação não permitia a criação do porco em total liberdade (Norte e Algarve), a engorda fazia-se em cortelho/estábulo. No misto inscrevem-se os casos descritos no regime pastoril em que a *piara* (vara), por seu turno, recolhia à *malhada* no final do dia. Cada uma destas formas de exploração compreende também diferentes tipos de porcos, porquanto «uma raça é sempre o produto da adaptabilidade de um grupo de animais da mesma espécie a um meio» (Pratas, 1929, p. 13). Assim, o porco Bísaro circunscreve-se às regiões do Norte e Centro, nas suas variantes Galega (branca) e Beirã (preta), e o porco Ibérico, nas suas variantes Alentejana e Algarvia, à região do Alentejo. Não obstante a semelhança no meio e no regime em que a variante Beirã e a Alentejana progrediram (apesar de nelas habitarem raças diferentes), a charneira dos principais solares porcinos portugueses encontra a sua raiz no Vale do Tejo, na variante Ribatejana, e não na Beirã, como se poderia intuir.

Figura 1 – Pastor com *malhada* de porcos, s.l., s.d. Arquivo Fotográfico da Câmara Municipal de Évora, PTAFCME AF/VPC/4011/175

Figura 2 – Casa de porco. "*Furda* e curral", Monsanto, Idanha-a-Nova (1955). *Inquérito à Arquitectura Regional Portuguesa (1955-1960)* ©Ordem dos Arquitetos, OAPIX, PT-OA-IARP-CTB-IDN07-016

3 A(S) *MALHADA(S)*

3.1 CARACTERIZAÇÃO MORFO-TIPOLÓGICA

Cumpre estabelecer que a *malhada* é consequência do tipo de exploração mista de porcos. Desde a década de 1920, o regime exclusivamente pastoril declinava, segundo Pratas (1929, p. 61), às mãos do crescimento urbano que afetava a produção de bolota no *montado* e a capacidade dos suinicultores para determinar o volume produtivo das suas árvores («*encabeçamento do montado*»). A título de exemplo, para *cevar* cada porco em regime pastoril eram precisos 500 kg de bolota de azinho ou 650 kg de bolota de sobro (Pratas, 1929, p. 63). Desta feita, as varas de porcos das criações extensivas passaram a depender de rações suplementares que lhes eram sobretudo administradas nas épocas mais fracas de pastagem (Pratas, 1929, p. 61). A *malhada* tem aqui a função de abrigo temporário (noturno), no qual se congregava a vara retornada dos campos ao entardecer.

A compleição da *malhada* abrange duas formas distintas, de acordo com o tipo de suínos nela contidos: porcos que não criam (*varrascos*/*varrões*) e porcos de criação. A primeira, entretanto desaparecida, descrevia um amplo recinto curvo limitado por uma cerca construída aproximadamente 1,60 m a prumo do chão apenas com materiais vegetais (piorno e esteva) em local seco e recolhido. No seu interior guardavam-se «*bácoros*, *alfeires* e porcos de vara ou *farroupos*» (Andrade, 1969, p. 50). Lembrando capelas radiantes na cabeceira de um templo, à volta da cerca erguiam-se múltiplas cabanas de cobertura cónica, conhecidas por *curveiros*. O recinto era completo por pequenas dependências próximas da *malhada* onde o pastor habitava, cozinhava, fazia queijo ou guardava o burro e as galinhas (Figura 3). Oliveira *et al*. (1969, p. 264) também referem este tipo de *malhada* como possível abrigo de cabras, que levava cerca de 15 dias a levantar e era renovado a cada cinco anos (Oliveira *et al*. 1969, pp. 271-272).

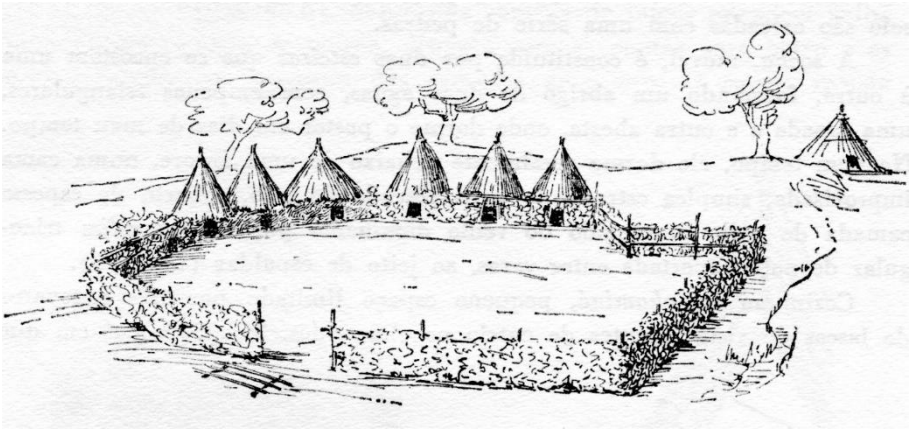


Figura 3 – *Malhada* de cabras. Aspeto geral, Beirã, Marvão. (Oliveira *et al*. 1969)

A segunda apresenta outra conformação, reflexo do zelo merecido pelos seus ocupantes. A ela se destinavam a porca de reprodução, criadeira ou *marrã* e a respetiva ninhada de leitões. Orientada geralmente para o quadrante com mais exposição solar, esta *malhada* organiza-se ao longo dum pátio delgado e comprido (*rebolim*), flanqueado por séries de pequenas unidades (*furdas*) quadradas/circulares em alvenaria de pedra natural (Figuras 4, 5 e 6) cobertas por tijolo, colmo ou falsa cúpula (Figura 7). Na extremidade sul rasga-se uma estreita abertura por onde os leitões acediam à *malhada*, ao passo que na diametralmente oposta (norte) se acomodava, em compartimento próprio adossado à estrutura (*dobradeira*), a *marrã* (Andrade, 1969, p. 69). Contígua à *malhada* fica sempre a

casa do guardador da vara (*porqueiro*). O conjunto integra-se num arvoredo (*acarro*/*acarradouro*) que proporcionava sombra aos leitões durante as primeiras saídas para o campo (Andrade, 1969, p. 51).

A razão da originalidade da *malhada* não está apenas no formato curioso e amplo da estrutura, que pode chegar a medir oitenta metros de comprimento, em casos superlativos, e quinze, nos mais simples. No quadro das construções europeias em falsa cúpula não há notícia duma estrutura idêntica na forma, função e circunstâncias do meio em que se implanta à *malhada*. Na obra "Corbelled Domes" (2012), Renate Löbbecke faz referência a um «invulgar» complexo de planta em «U» localizado a sudoeste da cidade grega de Vólos, no sopé do Monte Velanidia (Löbbecke, 2012, p. 321), mas não são claras as suas origens e respetivos usos, dividindo-se as opiniões entre a possibilidade de ser um túmulo otomano, um armazém de proventos agrícolas ou uma série de residências para trabalhadores rurais.

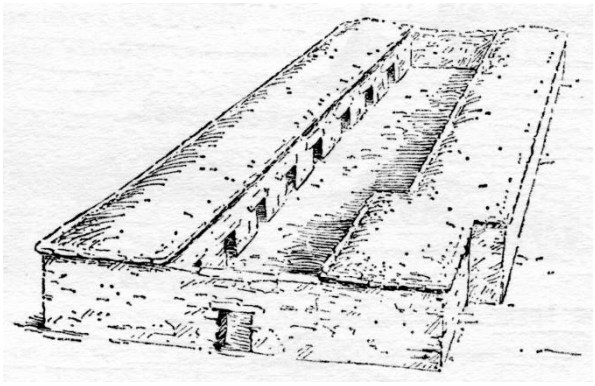


Figura 4 – *Malhada* de porcos, Salvaterra do Extremo, Idanha-a-Nova. (Oliveira *et al*. 1969)

Figura 5 – Uma *malhada*, cerca de 1920 (Montijo e Tanto Mar, 2013)

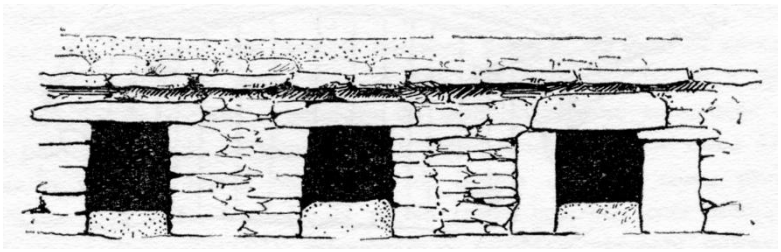


Figura 6 – Entrada para as *furdas*, Salvaterra do Extremo, Idanha-a-Nova. (Oliveira *et al*. 1969)

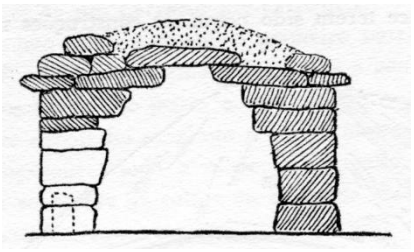


Figura 7 – Corte de uma *furda*, Salvaterra do Extremo, Idanha-a-Nova. (Oliveira *et al*. 1969)

4 A *MALHADA* BEIRÃ

4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO REGIONAL

Muitas vezes, a *malhada* de porcos é tida como expressão tão bem reconhecida do e no panorama sulista português, que se desconhece/ignora a sua presença e importância noutras regiões com caracteres de paisagem idênticos aos alentejanos.

Os exemplares observados situam-se na Beira Baixa, província histórica da região Centro (NUTS II) de Portugal peninsular balizada a norte pela subdivisão de Beiras e Serra da Estrela, a este por Espanha,

pelo Alto Alentejo a sul, Médio Tejo a sudoeste e Regiões de Leiria e Coimbra a oeste/noroeste. A Beira Baixa marca a transição das terras altas do Norte do país para os plainos do Sul, produzindo e assimilando circunstâncias que lhe conferem um cunho notadamente heterogéneo. Xisto e granito compõe os solos da região, revezando-se na orografia pouco acidentada que até há bem pouco tempo se via coberta pelas culturas autóctones que caracterizam o *montado* do tipo alentejano. Atualmente, a revolução nos processos agropecuários, altamente mecanizados, a introdução e exploração intensiva de culturas não-nativas nos locais ou, pelo contrário, o simples abandono dos campos, têm acelerado a transformação da paisagem rural, onde as *malhadas* são uma reminiscência de um modo de aproveitar os recursos em ruínas.

4.2 ESTUDOS DE CASO

A localização absoluta das *malhadas* é incerta, tanto que a identificação e seleção dos objetos analisados supôs um esquadrinhamento inicial da zona em apreço, facilitado pelo conhecimento abrangente da situação beirã neste domínio. Os exemplos a seguir pertencem na totalidade à segunda morfologia descrita em cima, exibindo apenas como factor distintivo entre eles diferentes soluções de cobertura, escala e materiais.

Chegou-se à primeira *malhada* pela EN239, a caminho de Penha Garcia. A construção localiza-se no contorno exterior do recinto de Senhora da Azenha, nas coordenadas 40°01'15''N 7°03'20''W, integrada num complexo de criação bovina. Orientada para sudoeste, a estrutura atinge 39 m de comprimento por 6,60 m de largura, erguendo-se em alvenaria mista de xisto e granito, com prevalência do primeiro material. O granito incorpora sobretudo os cunhais e ombreiras da abertura na extremidade sudoeste (Figura 8), pela qual se deveria aceder. A entrada na construção vê-se, contudo, vedada por cerca de arame e vegetação densa (silvas e um sobreiro germinado em pleno *rebolim*), que não permitiram contabilizar as *furdas* no interior. As células apresentam planta quadrangular (Figura 9), com paredes de 80 cm de altura. O arranque da cobertura ocorre a partir das *cápeas*, sendo esta formada por lajeado de xisto sobreposto em duas águas (Figura 10). O estado da estrutura é precário, considerando a ausência de cobertura nalgumas *furdas* e a vegetação que lentamente a consome. A este da *malhada* identifica-se, na mesma disposição de xisto e granito, a casa do *porqueiro* e a sudoeste outra construção longilínea, mais recente, onde a criação atual do porco deverá manter-se.

Figura 8 – O granito presente no acesso à *malhada*, Penha Garcia, Idanha-a-Nova. (Salvado, 2024)

Figura 9 – Aspeto interior de uma das *furdas*, Penha Garcia, Idanha-a-Nova. (Salvado, 2024)

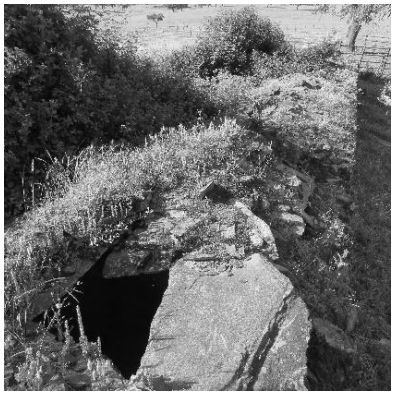


Figura 10 – Aspeto da cobertura de um dos braços da *malhada*, Penha Garcia, Idanha-a-Nova. (Salvado, 2024)

Seguiu-se por Monfortinho, pela EN240, em direção a Salvaterra do Extremo. Em Salvaterra, é primeiro de notar o imenso legado construtivo que a criação do porco deixou na aldeia, rodeada por seis núcleos de *furdas* em falsa cúpula na ordem das 130 estruturas (Salvado, 2023, p. 133). Ao contrário do que anteriormente se pensava, «os números mais significativos de *furdas* em falsa cúpula» na Beira Baixa não se ficam pelos aglomerados de Monsanto e Salvaterra do Extremo (Salvado, 2023, p. 132). O primeiro é ultrapassado em muito aliás pela numerosa quantidade de *furdas* existentes nas aldeias à volta do monte-ilha. E em Penha Garcia confirmou-se, de facto, a presença singular da *furda* em falsa cúpula na margem direita do Rio Pônsul, ainda que em menor proporção. Mas também em Malpica do Tejo e Zebreira. Para além de *furdas*, Salvaterra do Extremo conserva bons exemplos de *malhadas*, maioritariamente em falsa cúpula, no cruzamento para a povoação e nos terrenos circunvizinhos do setor este, sul e oeste.

O segundo estudo de caso fica na saída para os campos a que leva uma *canada* (caminho murado) com origem na igreja e cemitério antigos de Salvaterra. Ao cabo de meio quilómetro, a estrutura aparece implantada sobre afloramentos graníticos, nas coordenadas 39°52'51''N 6°54'20''W, virada para sul. Com cerca de 15,2 m de comprimento por 6,85 m de largura, a *malhada* alberga 12 *furdas* de planta circular e cobertura em falsa cúpula, com paredes inteiramente de granito que medem 1,10 m de altura. A opção pelo sistema de falsa cúpula está em linha com o matiz circunstancial em que esta tecnologia construtiva se desenvolve, por via de regra nas regiões mais isoladas e de incrementação arcaica. Nas *malhadas* em falsa cúpula, o elemento formado pela sobreposição em seco e a prumo do aparelho da abóbada em anéis mais ou menos concêntricos e gradualmente menores até ao pino (a *calota*) encontra-se coberto de terra. O conjunto das estruturas deste tipo são designadas, conforme alguns autores, por «edifícios em falsa cúpula com montículo», morfologicamente comparáveis aos túmulos de corredor das culturas micénica e etrusca (Barros *et al*. 2016, p. 495). Embora também se refira que a grande maioria das arquiteturas vernaculares de falsa cúpula no contexto português entrose nos «edifícios sem montículo», a variação «com montículo» prolifera por essa que é a morfologia geral em toda a Beira Baixa[1], e que ademais se observa nos abundantes *chafurdões* do Alto Alentejo (Oliveira *et al*. 2018, pp. 72-80) e nas *malhadas* localizadas/descritas simultaneamente por Oliveira *et al*. (1969, pp. 273-276) nas sub-regiões do Alto Alentejo e do Alentejo Central. Na morfologia predominante, a estrutura da base encontra-se demarcada da observada na cobertura por um renque de *cápeas* (pedras salientes) que remata a parede e a partir do qual, por vezes, arranca a abóbada (Figura 11). O revestimento com terra proporciona uma barreira eficiente contra a água das chuvas, enquanto a flora rasteira que germina à superfície concorre para a estabilização da cobertura com as suas raízes (Oliveira *et al*. 2018, p. 55). Esta é uma adaptação com especial relevância nos porcos de engorda, resguardados preferencialmente em «regime celular e de meia obscuridade» (Andrade, 1969, p. 50), pois sentem intimamente as oscilações súbitas de temperatura (Salvado, 2023, p. 134). O resultado são estruturas perfeitamente integradas no local de implantação, que chegam inclusive a confundir-se com a paisagem circundante (Figura 12).

Nesta *malhada*, o número de *furdas* é muito próximo ao de leitões nascidos em média por ninhada (oito), pelo que através do maior ou menor comprimento destas construções se pode estipular a sua capacidade/intensidade produtivas. Acede-se à *malhada* pelo lado sul, elevando-se a *dobradeira*, desta feita circular e de falsa cúpula, pelo norte. Também de planta circular e em falsa cúpula é o abrigo do *porqueiro*, uns dez metros a noroeste da *malhada* (Figura 13). A necessidade desta estrutura justificava-se nos momentos em que o trabalho de parto da *marrã* se prolongava além do normal,

[1] Veja-se somente em oposição o núcleo de fornos de olaria localizado no Bairro dos Louceiros (Idanha-a-Nova), em que a grande dimensão e formato cónico das abóbadas impossibilitaram a fixação de terra na cobertura, colocando a descoberto o «esqueleto» das *calotas* (Salvado, 2023, p. 129).

exigindo vigilância. Mas também para evitar que a porca, dolorida, calcasse algum filho ou o comesse (Andrade, 1969, p. 69).

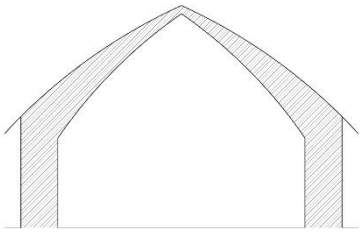


Figura 11 – Diagrama da morfologia predominante. (Salvado, 2023)

Figura 12 – Vista superior da *malhada*, Salvaterra do Extremo, Idanha-a-Nova. (Salvado, 2024)

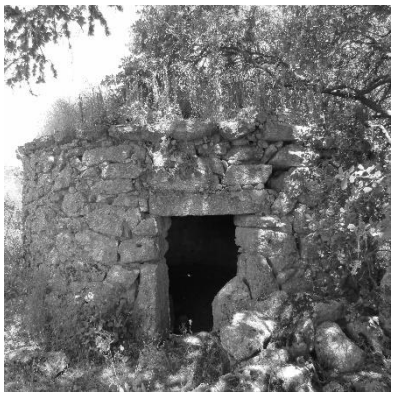


Figura 13 – Abrigo do *porqueiro*, Salvaterra do Extremo, Idanha-a-Nova. (Salvado, 2024)

Segundo depoimento recolhido em entrevista a José Joaquim Rascão (n. 1946) em 18 de abril de 2023, apesar do *porqueiro* fornecer todos os cuidados aos porcos da vara a seu cuidado e poder residir em espaço adjacente à *malhada*, essas ocorrências não o tornavam o dono da vara. O trabalho de construção de uma *malhada* era comummente solicitado a vários homens pelo proprietário dos terrenos (*patronato*) em que esta se implantava e o guardador de porcos fixado posteriormente. Como gratificação pelo bom serviço prestado, o *porqueiro* podia incluir e manter nessa vara uma fêmea, cuja carne e criação que desse lhe pertenciam. Não era de estranhar, porém, e acontecia amiúde tratadores inconsequentes que desertavam abandonarem a vara no campo.

A última *malhada* inscreve-se junto ao Aeródromo Municipal de Castelo Branco, nos arrabaldes dessa cidade. Virada a sudeste, nas coordenadas 39°50'32''N 7°26'43''W, a estrutura aproveita o declive suave de uma colina muito pedregosa donde terá extraído o granito de que é feita e se insere (Figura 14). Esta forma de implantação, observada já noutros exemplares, além de resguardar os animais da fria nortada, facilitava a higienização da estrutura. Com 39,2 m de comprimento por 7,7 m de largura, a *malhada* é constituída por 40 *furdas* de planta retangular (Figura 15), com a grande particularidade de duas delas, uma em cada braço, serem duplas (desconhece-se, todavia, o porquê). As paredes erguem-se 70 cm desde o chão até ao início da cobertura, originalmente de duas águas. Em avançado estado de ruína, o acesso à construção (a sudeste) encontra-se derrubado pelas raízes dum sobreiro e nenhuma *furda* conserva o seu telhado. Na subida para a *dobradeira* a vegetação adensa-se, tendo mesmo algumas árvores a parcela das *furdas* como canteiros. Neste caso, o *rebolim* comunica diretamente com a *dobradeira*, que se posiciona a noroeste e é flanqueada por um pequeno pátio de recreio com ligação ao exterior por uma interrupção na parede orientada a sudoeste (Figura 16). A casa do *porqueiro*, também a sudoeste, remata o conjunto.

Recentemente, em razão da importância empresarial e turística que a zona onde se implanta esta *malhada* tem vindo a adquirir para o município de Castelo Branco, foi anunciado pela autarquia o direcionamento de 150 hectares de terrenos contíguos ao Aeródromo Municipal para área industrial (Reconquista, 2024. Ed. 4062, pp. 4-5). Por conseguinte, o conhecimento alargado destas construções neste contexto mostra-se essencial para uma incrementação turística bem sucedida, pois elas constituem um fator de distinção regional representativo duma memória coletiva não muito distante,

das formas de ocupação/exploração agrária do território na Beira Baixa e dos próprios métodos de construção em uso no passado, responsáveis e em harmonia com as predisposições dos locais.

Figura 14 – *Malhada*. Contexto, Castelo Branco. (Salvado, 2024)

Figura 15 – *Furdas*, Castelo Branco. (Salvado, 2024)

Figura 16 – Pátio de recreio, Castelo Branco. (Salvado, 2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A falta de referências ou de conhecimento atual acerca da *malhada* de porcos, desinteresse, bem como algum preconceito, poderão ser creditados como os principais motivos da obscuridade desta estrutura nas Histórias da Arquitetura e da Construção portuguesas. Por outro lado, é dado o seu aspeto singular e dispersão restrita ao contexto Ibérico que permitem estabelecê-la enquanto expressão arquitetónica sumamente original do meio e do regime específicos de criação suína em que subsiste por exclusivo até meados do século XX. Apesar do relato de Estrabão referente à abundância de bolota na Ibéria e como essa circunstância poderá ter influenciado diretamente o presto desenvolvimento da criação do porco na região, não é possível estremar as origens da *malhada* em tão distante período histórico. Além disso, é devido à situação em que muitas destas estruturas se implantam, sobre afloramentos rochosos, impedindo a Arqueologia datá-las estratigraficamente, que a investigação não lhes determina uma idade.

Estruturalmente, constatou-se que o tipo de *malhada* em apreço se organiza consistentemente numa planta em «U» constituída por séries de *furdas*, *rebolim* e *dobradeira*, rematado pelo abrigo do *porqueiro* adjacente. A conformação da *malhada* deve-se ao género de porcos nela abrigados (de engorda), sendo que a diferenciação para estruturas ocorre sobretudo ao nível das dimensões, materiais construtivos e opções de cobertura observados em cada uma. A variação no comprimento de cada *malhada* é representativa da sua capacidade produtiva, comportando mais ou menos *furdas*. Nos estudos de caso, a razão varia entre 15 e 39 m de grandeza. Erguem-se maioritariamente isolados em sobreirais, virados para os setores com maior exposição solar, aproveitando os declives de encostas pouco acentuadas. Xisto e granito são as pedras dominantes. Em todas as situações identificou-se o acesso às estruturas pela extremidade meridional, localizando-se a *dobradeira* na parte mais elevada. Como verificado também, o *rebolim* nem sempre comunica diretamente com a *dobradeira*. Além da geometria elementar, articulação simples dos volumes e horizontalidade da estrutura, as células da *malhada*, de planta circular ou quadrada, possuem poucas aberturas, facto que convém e adjuva na criação do ambiente adequado à *ceva* dos suínos. No tocante à cobertura, inferiu-se que a proximidade das construções com telhado de duas águas ao perímetro urbano das cidades (Castelo Branco) nada tem que ver com a preferência por essa configuração. Exemplos como o de Senhora da Azenha, com cobertura de duas águas, embora isolado na paisagem, suportam esse resultado. Por fim, o

revestimento das *calotas* das *malhadas* de falsa cúpula com terra reflete uma adaptação ao meio, que além de propiciar a estabilização da cobertura, também a impermeabiliza.

6 CONCLUSÕES

Este contributo é parte integrante da investigação em curso que tem procurado alargar e produzir novo conhecimento acerca do extenso e diversificado legado arquitetónico de criação porcina existente na Beira Baixa, com destaque pelas construções em falsa cúpula. À *furda* junta-se assim a *malhada*, complexão proto-industrial da engorda extensiva de suínos em regime de «meia liberdade» (misto) que se prolonga até ao Alentejo. A amostra apresentada neste estudo, apesar de reduzida, é indicativa da distribuição geral deste tipo de estrutura no terreno, fixada aqui num raio de 40 km. Ao mesmo tempo, fatores como a falta de menção da *malhada* na literatura compulsada pela pesquisa e o estado de abandono, quando não mesmo ruína, em que se encontram muitos exemplares redobram a necessidade premente de sinalização e inventariação requerida por este património. A par disso, o estudo atesta a singularidade da *malhada* de porcos, tendo em conta o seu feitio inaudito e perante a inexistência, ao que tudo indica, de estruturas suas congéneres no âmbito das construções de falsa cúpula documentadas à escala internacional.

Baseada em análises convencionais e observações 'in loco', a metodologia aplicada pela investigação, apesar de comprovada, todavia não possibilita descerrar informação mais técnica sobre a natureza do aprisionamento dos materiais construtivos, quer seja a partir das abóbadas revestidas de terra, quer seja exatamente ao longo da estrutura da própria *malhada*. Concorrerá para o melhor entendimento deste edificado, em trabalhos subsequentes, a incorporação, por exemplo, de tecnologia de varrimento laser, testada com bons resultados no levantamento geométrico de construções em falsa cúpula noutras regiões de Portugal e análises com maior grau de precisão.

Em suma, espera-se que a comunicação retome e dê continuidade aos estudos da falsa cúpula na Beira Baixa, colaborando para o reconhecimento e divulgação duma estrutura em estreita relação com o meio em que se identifica e de apoio a atividades agrossilvipastoris até há pouco tempo em exercício pleno nas zonas de *montado*.

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece à Ordem dos Arquitetos (AO) e ao Arquivo Fotográfico da Câmara Municipal de Évora (AFCME), pelo conjunto de imagens cedidas para ilustrar parte desta comunicação. O Autor agradece também à Unidade de Investigação GeoBioTec, pólo da UBI, UIDP/04035/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/04035/2020).

REFERÊNCIAS

Andrade, A. H. da C. e. (1969). O Porco e seus Produtos. 11.ª ed. Livraria Clássica Editora, Lisboa

Barros, F. C., Barroso, C. E., Riveiro, B., Oliveira, D. V., Ramos, L. F., Lourenço, P. B. (2016). Arquiteturas de falsa cúpula na região transfronteiriça Gerês/Xurés: Enquadramento e caracterização construtiva in Livro de actas - 2.º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira (1). Rui F. Póvoas, João M. Mateus (eds.), Porto, 493-508

Barros, H. de. (1942). As Províncias do Norte de Portugal: Minho, Douro Litoral, Traz-os-Montes e Alto-Douro. Sep. do 1.º vol. do Inquérito à Habitação Rural. Gráf. Lisbonense, Lisboa

Barros, H. de. (1947). Inquérito à Habitação Rural: A habitação rural nas províncias da Beira (Beira Litoral, Beira Alta e Beira Baixa). Gráf. Lisbonense, Lisboa

Basto, E. A. L., Barros, H. (1943). Inquérito à Habitação Rural: A habitação rural nas províncias do Norte de Portugal (Minho, Douro Litoral, Trás-os-Montes e Alto-Douro). Gráf. Lisbonense, Lisboa

Basto, E. A. L., Silva, A. de F. e, Silva, C. (2012). Inquérito à Habitação Rural: A habitação rural nas províncias da Estremadura, Ribatejo, Alto Alentejo e Baixo Alentejo. Imprensa Nacional-Casa da Moeda, Lisboa

Deserto, J., Pereira, S. da H. (2016). Estrabão, Geografia. Livro III: introdução, tradução do grego e notas. Imprensa da Universidade de Coimbra. Annablume, Coimbra

Dias, J., Oliveira, E. V. de, Galhano, F. (1963). Sistemas primitivos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas: Os espigueiros portugueses. Centro de Estudos de Etnologia Peninsular, Porto. https://doi.org/10.4000/books.etnograficapress.6592

Fernandes, L. S., Freitas, A. B., d'Abreu, M. C. (2008). Evolução dos sistemas de produção de porco alentejano e efeitos do aumento de preço dos alimentos compostos na viabilidade económica da actividade in Revista de Suinocultura (78), 54-63

Löbbecke, R. (2012). Corbelled Domes. Verlag der Buchhandlung Walther König, Köln

Mestre, V. (2001). Arquitectura Popular da Madeira. Argumentum, Lisboa

Oliveira, E. V. de, Galhano, F. (1992). Arquitectura Tradicional Portuguesa. Publicações Dom Quixote, Lisboa

Oliveira, E. V. de, Galhano, F., Pereira, B. (1969). Construções Primitivas em Portugal. Instituto de Alta Cultura. Centro de Estudos de Etnologia, Lisboa. https://doi.org/10.4000/books.etnograficapress.6228

Oliveira, E. V. de, Galhano, F., Pereira, B. (1983). Tecnologia Tradicional Portuguesa: Sistemas de moagem. Instituto Nacional de Investigação Científica. Centro de Estudos de Etnologia, Lisboa

Oliveira, E. V. de, Galhano, F. (1977). Tecnologia Tradicional: Pisões portugueses. Instituto Nacional de Investigação Científica. Centro de Estudos de Etnologia, Lisboa

Oliveira, J. de, Soares, C. de M., Goufa, E., Lovegrove, S. (2018). As construções de falsa cúpula ou chafurdões no contexto da Alta-Idade-Média, na serra de S. Mamede in Scientia Antiquitatis (1), 53-80

Pratas, J. (1929). Criação do porco na pequena propriedade in Cartilhas do Lavrador, 3. Imprensa Moderna, Limitada, Porto

Reconquista. (2024). Ed. 4062, Castelo Branco

Salvado, J. (2021). Arquitectura Popular em Portugal: Tecnologias construtivas tradicionais na contemporaneidade. Dissertação de mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã

Salvado, J., Martins, Ana M. T., Nepomuceno, Miguel C. S. (2019). From popular to contemporary: A review on Portuguese vernacular architecture in Proceedings of the 4th International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historic Buildings and Structures. Rogério Amoêda, Sérgio Lira e Cristina Pinheiro (eds.), Guimarães, 389-397

Salvado, J. (2023). O complexo monumental de criação porqueira de Salvaterra do Extremo: Estudo de caso de uma *furda* em falsa cúpula in Atas do 4.º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira. Paulo B. Lourenço, Carlos Maia, Arnaldo S. Melo e Clara P. do Vale (eds.), Guimarães, 127-139

Távora, F., Pimentel, R., Menéres, A., Filgueiras, O. L., Araújo, A., Dias, C. C., Amaral, F. K. do, Lobo, J. H., Malato, J. J., Pereira, N. T., Freitas, A. P. de, Dias, F. da S., George, F., Gomes, A. A., Antunes, A. da M., Martins, A. P., Castro, C. de, Torres, F. (1961). Arquitectura Popular em Portugal. Vols. 1-2. Sindicato Nacional dos Arquitectos, Lisboa

Tostões, A., Silva, F. J., Caldas, J. V., Fernandes, J. M., Janeiro, M. de L., Barcelos, N., Mestre, V. (2000). Arquitectura Popular dos Açores. Ordem dos Arquitetos, Lisboa

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

OPTIMISATION OF THE MIX DESIGN OF HIGH CARBON CAPTURE MASONRY CONCRETE BLOCK

Mustafa Ibrahim [a]; Dany Kassim [a]; Rita Nogueira [a]; Jorge de Brito [a]

[a] CERIS (Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability), Civil Engineering, Architecture and Georesources Department, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal, mustafa.ibrahim@tecnico.ulisboa.pt; danykassim@tecnico.ulisboa.pt; rita.nogueira@tecnico.ulisboa.pt; jb@civil.ist.utl.pt;

ABSTRACT

The construction industry plays a pivotal role in global carbon emissions, prompting an urgent need for sustainable alternatives. This study focuses on the optimisation of the mix design for masonry concrete blocks with a high carbon capture potential. The objective is to develop a formulation that not only meets the performance requirements but also contributes significantly to carbon sequestration. This study evaluates the mechanical properties, durability, and carbon capture efficiency of concrete block through optimised mix design and under three different curing regimes: carbonation pre-hydration, carbonation post-hydration and conventional moist curing, without carbonation. A series of laboratory tests including compressive strength, flexural strength, ultrasonic pulse velocity, porosity and capillarity have been carried out to evaluate the influence of carbonation on the performance of concrete blocks. The carbonation curing concentration applied in this study was 20%, 40%, and 80%. Using a phenolphthalein solution, the carbonation depth of the blocks was evaluated. The key benefit of this work is that it constitutes a foundation for boosting the block's CO_2 absorption capacity, which plays an important role in carbon sequestration.

Keywords: Masonry blocks, carbon capture, sustainable concrete, cement carbonation, concrete mix-design

1 INTRODUCTION

Cement, a crucial component of concrete along with water and sand, has a global annual production of about 4 billion tonnes, with future increases predicted (US Geological Survey 2023; Marmier 2023). Despite making up only about 10% of concrete's total weight, cement accounts for roughly 70% of the greenhouse gas emissions from concrete production (Habert et al. 2020). According to the International Energy Agency (IEA 2023), producing one tonne of cement typically emits around 600 kg of carbon dioxide (CO_2) considering only the decarbonisation of the raw material limestone. Adding the CO_2 released by the manufacturing operations, leads to 7% of worldwide and 4% of the EU CO_2 emissions (Marmier 2023). The primary sources of these emissions are the combustion of fuel for heat (~33%) and the calcination process (~67%), where calcium carbonate ($CaCO_3$) decomposes into calcium oxide (CaO) and CO_2. These calcination emissions are challenging to eliminate due to the chemical processes involved in cement production. Efforts to reduce cement's carbon footprint include altering its composition, enhancing energy efficiency, and using biofuels (Benhelal et al. 2021; Habert et al. 2020). Nonetheless, complete mitigation necessitates CO_2 capture technologies and the permanent storage or utilisation of the captured CO_2 (Habert et al. 2020; Horowitz 2016; Sikora 2021).

Extensive research is being conducted on accelerated carbonation curing as a viable method to reduce the concrete industry's carbon footprint. This process transforms gaseous CO_2 into carbonate minerals,

effectively sequestering CO_2 in a mineral form. This study investigates carbon capture in precast masonry hollow blocks as a reversible process of producing the raw material (i.e. clinker). An accelerated carbonation curing process will inject CO_2 back into the concrete elements to reform the carbonate products. This process intends to develop concrete blocks with enhanced properties for capturing CO_2. The experimental investigation evaluated and optimised the carbonation over time. The properties of the blocks were then evaluated according to their fresh-state and hardened-state performance. The hollow blocks in this paper were tested for fresh-state density, compressive strength, flexural strength, ultrasound, porosity, and water absorption by capillarity effects.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 BINDERS

The binding material used in this study consisted of a mixture of OPC and limestone filler. OPC was of type I (CEM I 42.5R), complying with the European standards EN 197-1 (2011) . On the other hand, the filler was from ground limestone, used as a supplementary cementitious material to partially replace OPC, confirmed in EN 206:2013 (2016).

2.2 AGGREGATES

This study used three types of aggregates to produce masonry concrete hollow blocks. The first one was river sand, ranging between 0/4 mm. The other two were limestone aggregates (i.e. sand gravel and fine gravel) ranging in sizes from 0/6 mm and 4/12 mm, respectively. The fine gravel fraction size was limited to less than 8 mm to comply with the concrete mix design sourced from a masonry block manufacturing plant. All aggregates were fully dried in a treatment oven at a temperature of 110 ± 5 °C.

2.3 ADMIXTURES

This study consumed commercial water-reducing admixture (WRA) of a naphthalene-based superplasticiser (Sika ViscoCrete 5501) described as a light brownish liquid, clear to slightly cloudy, with a density of 1.06 ± 0.02 kg/l (at +20 °C) and a pH of 4.0 ± 1.0, to optimise the fresh-state properties and compaction of the concrete blocks.

2.4 MIX DESIGN

Table 1 presents the mix design used in this experimental investigation for the production of the masonry hollow blocks. The mix design was adapted from a prefabrication plant in Portugal and was optimised by some trial mixes before the production of the actual blocks presented in this study. The mass ratio of water-to-cement (w/c) was fixed at 0.30, the aggregate-to-binder (Ma/Mb) ratio was 6.57, and the WRA/cement was 0.60%.

2.5 PRODUCTION METHOD OF MASONRY HOLLOW BLOCKS

The masonry hollow block production occurred by adding the aggregate gradually with half the amount of water to the vertical shaft concrete mixer drum and left to mix for 1 minute. This process ensured homogenised and saturated aggregate particles, preventing agglomeration with the cement, a common phenomenon in dry mixes. Next, the binder (i.e. cement and limestone filler) was added with the other half of the water and mixed for 1 more minute to envelop the surface of the aggregates. Finally, the superplasticiser was added to the mix for an additional 3 minutes.

Table 1 - Hollow block mix design

Volume = 1L	
Material	**Amount (g)**
Cement (CEM I 42.5R)	159
Limestone filler	82
Water	72
Sand	477
Sand gravel	636
Fine gravel	477
WRA	2

The fresh-state concrete mix was then poured into a 320 x 140 x185 mm^3 hollow block steel mould (Figure 1a). The mould was positioned on a flat surface with a compacting vibrator connected to it. The demoulding process occurred immediately after this operation and left to harden (Figure 1b).

(a)

(b)

Figure 1 - Production of hollow blocks: (a) block machine/mould; (b) demoulded hollow block

2.6 CURING METHODS

After the demoulding process of the blocks, the specimens were left to set at laboratory conditions (i.e. relative humidity (RH) of 65 ± 5 % and temperature of 23 ± 2 °C) for the first 24 hours. The reference samples consisting of 3 blocks (i.e. considered uncarbonated) were transported to a chamber with a rotating sprinkler system and with fixed conditions of 95 ± 5% RH and 23 ± 2 °C for 27 days. For the samples intended to capture CO_2, 12 blocks were produced and subjected to two different curing regimes. The first one is the carbonation pre-hydration regime, which involved 6 blocks (2 blocks per each CO_2 concentration) exposed to carbonation at 24 h of age. They were then placed inside the wet chamber until achieving 28 days. On the other hand, the second regime is the carbonation post-hydration regime. This regime involved the remaining 6 blocks being exposed to carbonation after 27 days in the wet chamber. Hence, all the specimens were tested with 28 days of age, regardless of the curing regime. The accelerated carbonation chamber maintained a relative humidity of 65 ± 5% and a temperature of 23 ± 2°C. For both regimes, each pair of blocks were tested and exposed to 20%, 40%, and 80% CO_2 concentrations for an optimum capture period as specified in section 3.1.

2.7 TESTING METHODS

Following the curing stage, the samples were in general tested as outlined in the standard that regulates masonry units (EN 772 2011). Some of the tests were adapted to better suit the objectives of the work. The tests were performed for each curing condition (i.e. 0%, 20%, 40%, and 80% of CO_2 concentration) for all regimes. The tests carried out in this campaign included: an optimisation for the CO_2 captured using a pH indicator on a sliced sheet of the block (Figure 2a); fresh state density; compressive strength on a sawed block with the dimensions stated in section 3.3.1 (Figure 2b); flexural strength of sheets detailed in section 3.3.2 (Figure 2c); ultrasonic pulse velocity; porosity; and water absorption by capillarity using the same type of sheets previously mentioned.

(a)

(b)

(c)

Figure 2 - Testing methods: (a) pH indicator test for CO_2 depth; (b) compressive strength test; (c) flexural strength test

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 OPTIMISATION OF CO_2 CAPTURE TIME

The optimum CO_2 curing time for the hollow blocks was assumed to be the minimum time required to achieve almost all the carbonation of calcium hydroxide (CH). This criterion was considered complied with if the percentage of the uncoloured area was lower than 10%. This was done by applying a

phenolphthalein pH indicator solution according to EN 12390-10 (2018) on a freshly cut slice. The pinkish hue stands for the uncarbonated CH area. It was confirmed that the optimum exposure time required for 20%, 40%, and 80% CO_2 concentration to achieve above 90% uncoloured area (i.e. carbonated area) was 12, 9, and 2 hours, respectively. The result from this test is presented in Figure 3.

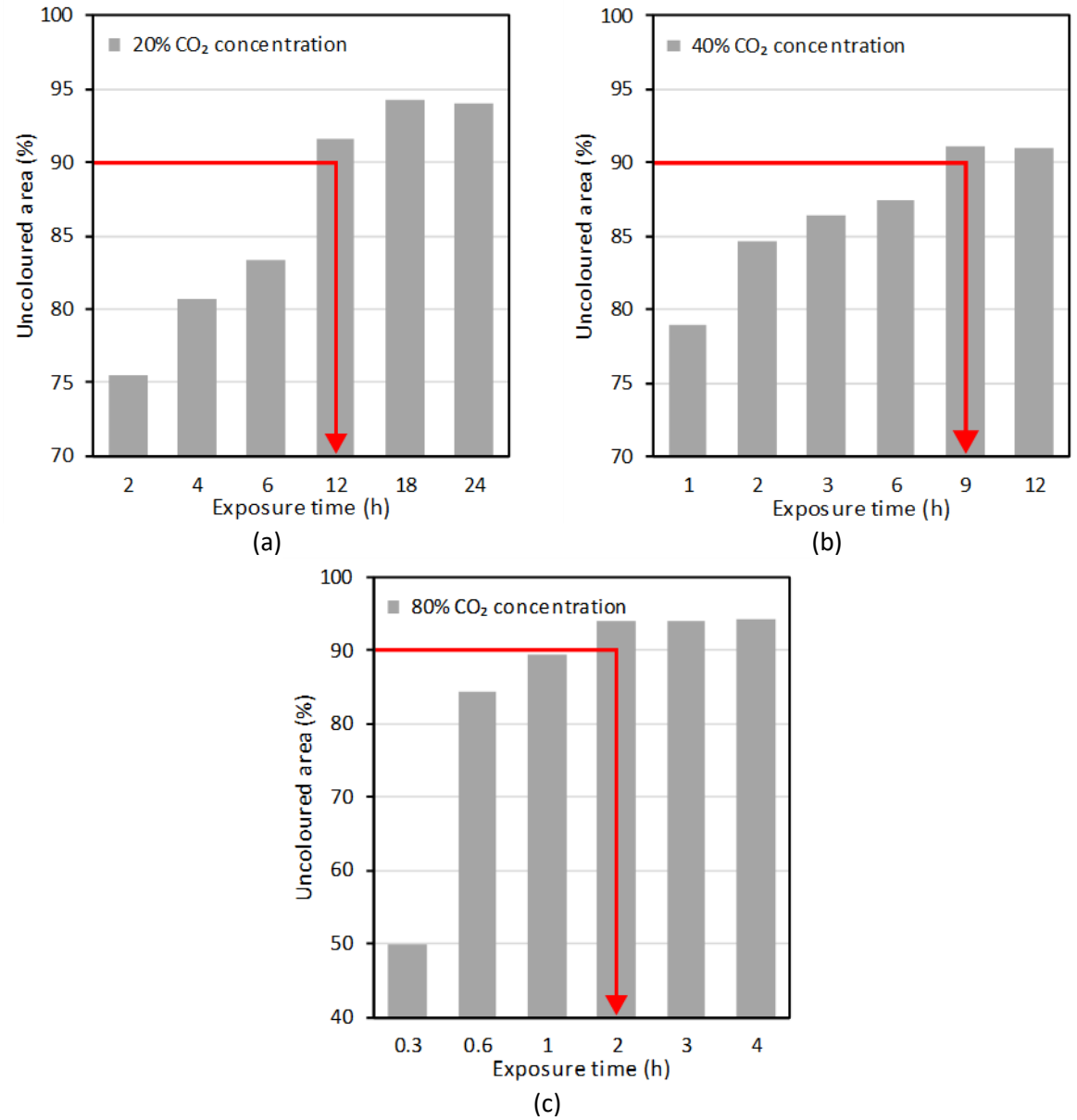


Figure 3 - Average uncoloured area post spraying of phenolphthalein pH indicator for (a) 20% CO_2 concentration specimens; 40% CO_2 concentration specimens; 80% CO_2 concentration specimens

3.2 FRESH STATE PERFORMANCE

The fresh-state performance of the concrete hollow block was evaluated by its fresh density. This was recorded by carefully placing the fresh-compacted block after demoulding (i.e. at a fresh-state) and its flat tray on a scale, before hydration or curing. Knowing the volume of the mould, the density was calculated using the following equation:

$$\rho = \frac{m_{rec} - m_t}{V}$$

Where,

ρ is the fresh state density;

m_{rec} is the recorded mass;

m_t is the mass of the tray;

V is the volume of the hollow block mould.

Despite the mix design used for the three curing regimes is the same (presented in Table 1), slight differences were found in the fresh state density, as follows. For the carbonation pre-hydration regime, the hollow blocks' average fresh-state density was calculated to be 1915 kg/m^3, with a standard deviation of ± 27 kg/m^3. In contrast, for the carbonation post-hydration regime, the hollow blocks' average fresh-state density was calculated to be 1904 kg/m^3 with a standard deviation of ± 25 kg/m^3. Furthermore, the reference samples' average fresh-state density (i.e. uncarbonated) was calculated to be 1890 kg/m^3, with a standard deviation of ± 24 kg/m^3.

3.3 HARDENED STATE PERFORMANCE

This article evaluated the performance of uncarbonated and carbonated masonry concrete hollow blocks in their hardened state to determine the influence of carbonation on their properties. These blocks' compressive and flexural strength reveal their mechanical properties, while ultrasound and water absorption by capillarity indicate their durability properties.

3.3.1 Compressive strength

The hollow blocks' compressive strength was evaluated according to EN 772-1 (2011), using the portion of a sawed block as illustrated in Figure 5. The procedure starts by wiping the bearing surface of the testing machine and removing any loose grit from the specimens. Following that, the specimen was aligned to the loading plate. Finally, the loading was applied until failure. Figure 5 presents the average compressive strength values obtained for the blocks. Results do not show a linear trend. For the post-hydration regime, the carbonation caused an overall reduction in the strength, although increasing with the CO2 concentration increment. This result suggests that the carbonation is being deleterious for the binding phases of the cementitious matrix, namely the C-S-H phases. Published works report a reduction in mechanical performance due to carbonation in case of an extensive decalcification of C-S-H that leads to very porous silica gel compounds (Xin Liu et al. 2022).

However, for pre-hydration curing, the mechanical decay due to carbonation is smaller and only happens for 20% and 40% of CO_2 concentration. The 80% carbonation exposure to the pre hydration regime sample shows a 10.72 MPa compressive strength, which is about 26% higher when compared to the post hydration regime sample with the same carbonation concentration and 16% higher that the reference sample. This result suggests that it is advantageous to introduce carbonation in an early stage of the cement hydration, where also anhydrous cement compounds are able to react with CO_2. Published works state that CO_2 exposure can be beneficial for the carbonation applied after a short age of hydration since the carbonation occurs to both anhydrous (C_3S and C_2S) and hydrated ($Ca(OH)_2$, C-A-S-H) phases (Zhang and Shao 2016). The dual carbonation of both hydrated and anhydrous phases

creates a denser and more compact microstructure which reduces the overall porosity of the concrete, hence improving the mechanical performance overall.

These results also show that the CO_2 concentration has a different impact on the carbonation reactions. Notice that specimens were subjected to different carbonation curing periods in order to attain similar (and optimal) CO_2 capture. Hence, despite this common denominator, different performance was obtained, probably due to the specificities of the reaction kinetics associated with the different CO_2 concentrations. Finally, it is important to stress that the result obtained for the pre-hydration specimen under 40% CO_2 concentration appears to be anomalous, since its strength is too low considering the previous assumptions.

Figure 4 - Compressive strength sample size and dimensions

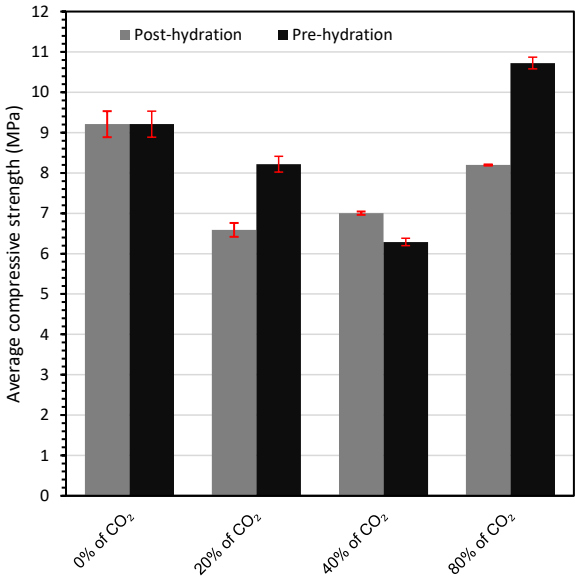


Figure 5 - Compressive strength for the different curing regimes

3.3.2 Flexural strength

The flexural strength of the hollow blocks was recorded according to the European standards for testing mortars (i.e. EN 1015-11 (1999)) with few changes in the dimensions, as shown in Figure 6. The test starts with applying the load gradually and without shock until failure. The maximum load was recorded and the width and depth of the cross section was measured at the location of fracture to the nearest 0.1 mm. Figure *7* demonstrates the average flexural strength values obtained for the block samples in this study. Like the compressive strength results, specimens of the carbonation pre-hydration curing presented higher performance compared to post-hydration specimens, except for the 40% CO_2 concentration (previously assumed to be an anomalous result). Maximum strength was obtained for 80% of CO_2 concentration at pre-hydration carbonation curing, that was 41% higher than

the performance obtained for post hydration curing and 79% higher than the reference sample. However, in opposition to compressive strength, carbonation led to a general increment of the flexural strength. Since this inconsistency between compressive and flexural strength is not often (although not impossible), further work is required to confirm these results. Notice that the adoption of non-standardised specimens obtained from cutting block is a procedure developed especially for this work, requiring more repetitions until there is certainty in the results produced.

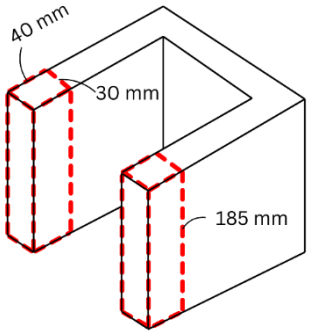


Figure 6 - Flexural strength sample size and dimensions

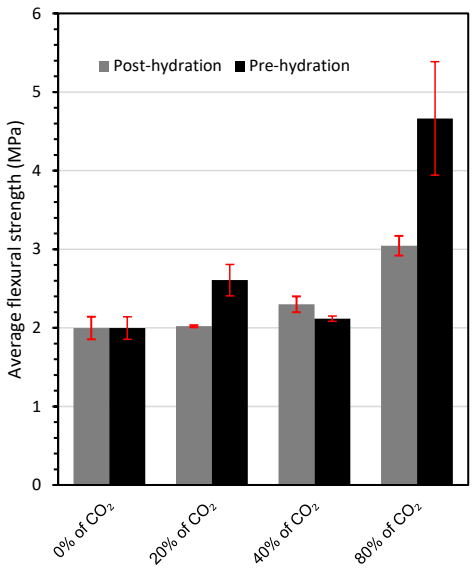


Figure 7 -Flexural strength for the different curing regimes

3.3.3 Ultrasound

The ultrasonic pulse velocity was carried out according to EN 12504-4 (2004). The testing procedure starts with preparing the concrete surface, calibrating the equipment, and applying a coupling agent to the transducers. The transducers were then positioned on the tested sample, and an ultrasonic pulse was sent through. The travel time and pulse velocity were recorded. Multiple measurements were taken and averaged for accuracy. Figure *8* presents the ultrasonic pulse velocity (UPV) for sawed sheets of the hollow blocks at various regimes. Once again, the results show the same trend as in compressive and flexural strength: considering only the specimens exposed to carbonation, there is an increasing performance for higher CO_2 concentration (except for the anomalous case of 40% concentration at pre-hydration curing regime), and specimens subjected to pre-hydration behave better than those subjected to post-hydration. Regarding the comparison with the reference specimens, two cases of pre-hydration

and one case of post-hydration present a better performance. These results are similar to those obtained in compressive and flexural strength, so previous assumptions also apply here.

3.3.4 Porosity

The porosity test of the hollow blocks were carried out according to EN-193639 (2006). The specimens were immersed in water under vacuum with the purpose of maximising the number of voids filled with water. This allows identifying the amount of water accessible within the voids by the specimen's bulk volume. Figure 9 presents the porosity test results for hollow block sheets at various regimes (i.e. uncarbonated, carbonated, pre-hydration, and post-hydration) at various CO_2 curing concentrations (i.e. 0%, 20%, 40% and 80%). From the results, the carbonation curing process has caused a decrease in the porosity except for samples which were cured under 40% concentration with the pre-hydration regime. Moreover, the pre-hydration regime presented lower percentage of porosity within the micro-structure than those of post-hydration. The outcomes of this test were expected considering the results obtained in the previous properties. The results support the microstructural densification of the blocks due to the pore-filling effect caused by calcium carbonates ($CaCO_3$) as a product of the carbonation curing (Li and Wu. 2022).

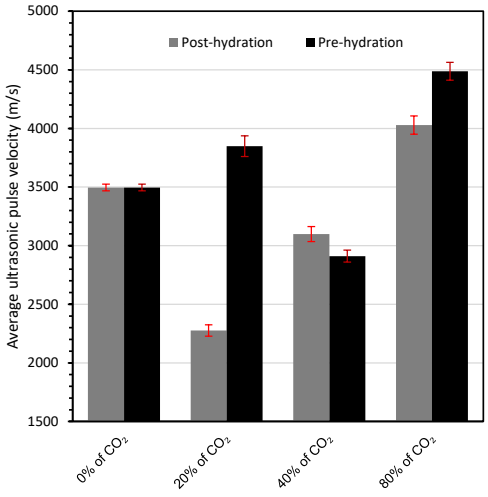


Figure 8 - Ultrasonic pulse velocity for the different curing regimes

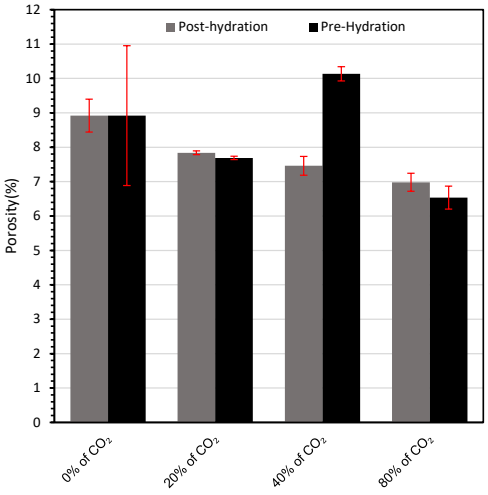
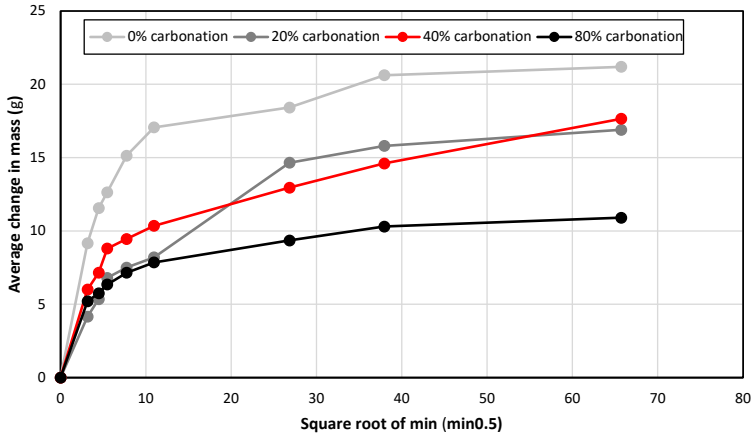


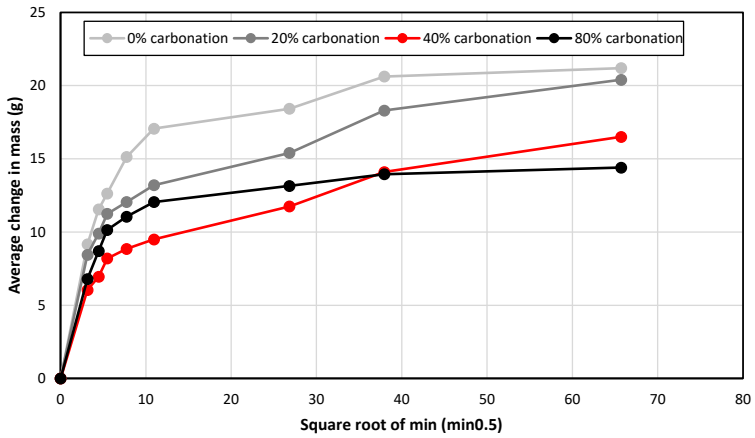
Figure 9 - Porosity of concrete hollow block (%)

3.3.5 Water absorption (by capillarity)

The water absorption test for the hollow blocks by capillarity effect was carried out according to EN 1015-18 (2002). The dried specimens were weighed and then placed vertically into a tray with about 2 mm of water, submerging only the bottom. Water primarily was absorbed through the bottom face and ascended vertically, filling the material's pores until the specimens were saturated or nearly saturated. The results presented in Figure10 (a) and (b) indicated that carbonation overall caused a lower change in mass over time due to water absorption by capillarity compared to the reference sample. However, 40% of CO_2 concentration exhibited anomalous results, as previously assumed. Similar to mechanical performance and porosity tests, the specimens cured under pre- and post-hydration regimes with 80% CO_2 concentration demonstrated better results in terms of water absorption. The results may indicate microstructural densification of the blocks due to the pore-filling effect caused by calcium carbonates (CaCO3) as a product of the carbonation curing (Li and Wu. 2022).



(a)



(b)

Figure10 - Change in mass due to capillarity effect over time for the carbonation pre (a) and post (b) hydration regime

4 CONCLUSIONS

This study investigated the effects of CO_2 concentration and curing time on the performance of masonry concrete hollow blocks, with a focus on optimising CO_2 capture time, fresh-state density, and various hardened-state properties including compressive strength, flexural strength, ultrasonic pulse velocity, porosity, and water absorption by capillarity.

The results indicated that the optimum CO_2 exposure times to achieve very high values of calcium hydroxide carbonation were 12, 9, and 2 hours for CO_2 concentrations of 20%, 40%, and 80%, respectively.

Carbonation caused improvement of the blocks performance, in terms of flexural strength, porosity and capillary absorption, and the improvement increased with increasing CO_2 concentrations. The microstructural pore-filling with the calcium carbonates ($CaCO_3$) as a product of carbonation curing can explain this outcome. The pre-hydration regime results were better than those obtained in the post-hydration regime, which suggests that it is advantageous to introduce carbon dioxide at an early stage of the cement hydration, where anhydrous cement compounds are also able to react with CO_2.

However, this improvement due to carbonation was not generalized for compressive strength and ultrasound pulse velocity tests, where it only occurred for the higher CO_2 concentrations. More work is required to understand the reasons for this unexpected outcome.

REFERENCES

EN 1015-11 (1999). Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels - Belgium: European Committee for Standardization (CEN).

EN 197-1 (2011). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels - Belgium: European Committee for Standardization (CEN).

EN 772 (2011). Methods of test for masonry units. Brussels - Belgium: European Committee for Standardization (CEN).

EN 772-1 (2011). Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength. Brussels - Belgium: European Committee for Standardization (CEN).

EN-1015-18 (2002). Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation (CEN).

EN-12390-10 (2018). Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the carbonation resistance of concrete at atmospheric levels of carbon dioxide. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation (CEN).

EN 12504-4:(2004). Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. Brussels - Belgium: European Committee for Standardization (CEN).

EN-193639(2006). Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation (CEN).

EN-206:2013+A1:2016 (2016). Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation (CEN).

Habert, G., Miller, S., John, V., Provis, J., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment 1(11): 559-573. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3.

Horowitz, C. (2016). Paris Agreement. International legal materials 55(4): 740-55. https://doi.org/10.1017/S0020782900004253.

IEA (2023). Energy System, Industry, Cement. Https://Www.Iea.Org/Energy-System/Industry/Cement (Accessed May 13, 2024).

Li, L., Wu, M. (2022). An overview of utilizing CO_2 for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. Journal of CO_2 Utilization 60: 102000. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102000.

Liu, X., Feng, P., Cai, Y., Yu, X., Yu, C., Ran, Q. (2022). Carbonation behavior of calcium silicate hydrate (C-S-H): Its potential for CO_2 capture. Chemical Engineering Journal. 431(3): 134243. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134243.

Marmier, A. (2023). Decarbonisation options for the cement industry. JRC technical report. issn 1831-9424.

Sikora, A. (2021). European Green Deal - Legal and financial challenges of the climate change. Era Forum: Springer 21:681-697. https://doi.org/10.1007/s12027-020-00637-3.

US Geological Survey (2023). Cement production worldwide from 1995 to 2023, Statista Research Department. https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/ (Accessed May 13, 2024).

Zhang, D., Shao, Y. (2016). Early age carbonation curing for precast reinforced concretes. Construction and Building Materials. 113: 134-143. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.048.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFEITO SINÉRGICO DAS CINZAS DE BIOMASSA EM ARGAMASSAS: DESEMPENHO MECÂNICO DOS TRAÇOS ÓTIMOS

Camila Cristina Canhestro Guimarães[a]; Heber Martins de Paula[a]; Antover Panazzolo Sarmento[a]

[a]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC (Universidade Federal de Catalão - UFCAT, Catalão - GO, Brasil) canhestroguimaraes@discente.ufcat.edu.br

[a]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC (Universidade Federal de Catalão - UFCAT, Catalão - GO, Brasil) heberdepaula@ufcat.edu.br

[a]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC (Universidade Federal de Catalão - UFCAT, Catalão - GO, Brasil) antoverps@ufcat.edu.br

RESUMO

A substituição parcial do cimento Portland nos produtos cimentícios por resíduos agroindustriais que possuam em sua composição química a sílica reativa e se caracterizam como materiais cimentícios suplementares (MCS), reduz o consumo de recursos não renováveis e diminui o passivo ambiental. Visando a utilização desses resíduos, foram produzidos três traços (Tmín, Tméd e Tmáx) de argamassa modificada com a substituição parcial do cimento Portland por *blends* de cinzas de biomassa (Cmín, Cméd e Cmáx), respectivamente. Estes *blends* são formados pela cinza da casca de arroz (CCA), cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e cinza do cavaco de eucalipto (CCE), nas seguintes proporções otimizadas: Cmín (12,50%CCA + 3,20%CBCA + 0,00%CCE), Cméd (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75% CCE) e Cmáx (18,80%CCA + 9,50%CBCA + 9,50%CCE). Para fins comparativos, foi produzido um traço de argamassa referência (Tref), isento de substituições. Por fim, os resultados apontaram que o traço da argamassa modificada Tméd pode ser escolhido como um traço ideal para o desenvolvimento de uma argamassa ecoeficiente, este traço contém o *blend* Cméd que apresentou o melhor perfil pozolânico e melhor desempenho mecânico no estado endurecido, considerando a máxima quantidade de teor de cinzas incorporadas nas argamassas modificadas, promovendo uma maior sustentabilidade.

Palavras-chave: Argamassa, materiais cimentícios suplementares, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cinza do cavaco de eucalipto.

1 INTRODUÇÃO

As cinzas produzidas por processos antrópicos, provenientes da combustão de biomassa pode ser usada para a geração de energia, contudo, de acordo com Carrasco *et al*. (2014), mesmo sendo uma tecnologia renovável, esse processo é responsável pelo aumento dos níveis de resíduos advindos da combustão em aproximadamente 210% até 2030. Assim, torna-se imprescindível encontrar aplicações para agregar valor a este resíduo transformando-o em um recurso alternativo em novos processos. Suas incorporações em matrizes cimentícias, substituindo parcialmente o cimento Portland, podem trazer vários benefícios, como a redução do impacto ambiental e o custo do material (ATAIE; RIDING, 2016). O emprego das cinzas de biomassa na construção civil com as suas incorporações nos produtos cimentícios, mitiga o problema de gestão de resíduos de biomassa, e, além disso, reduz as emissões de dióxido de carbono (CO_2) ao se tratar da produção do cimento (UKRAINCZYK; VRBOS; KOENDERS, 2016; CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA, 2015).

Não somente por razões ecológicas, mas também tecnológicas (MORAES *et al*., 2016), o uso de pozolanas proporciona menor consumo de cimento, melhorias no desempenho mecânico e durabilidade do concreto (LIMA *et al*., 2022; CAMPOS; MEDEIROS; HOPPE FILHO, 2017; RAMOS; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2013). Matos *et al*. (2021) realizaram um revisão bibliográfica e notaram grande aplicação dos resíduos de biomassa, com grande potencial de contribuição para pesquisas voltadas para a sustentabilidade na construção civil.

Os estudos realizados por Cabrale *et al.* (2022), Gonçalves *et al.* (2021), Castro *et al.* (2020) e Degen *et al.* (2019), mostram a real influência das adições minerais em concretos e argamassas. Além disso, as pesquisas sobre a cinza da queima da casca de arroz mostraram resultados promissores quando utilizado como substituto do cimento Portland, melhorando as propriedades como resistência mecânica (BEZERRA *et al.*, 2011; BEZERRA *et al.*, 2012 e absorção de água (BEZERRA *et al.*, 2011). No mesmo sentido, a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de cavaco de eucalipto também se mostraram viáveis nos estudos de Canova, Miotto e Mori (2015), Matos *et al*. (2021) e Modolo *et al*. (2013).

Dessa forma, a substituição parcial do cimento, na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento por cinzas de biomassa, é uma alternativa que vem sendo estudada pela academia (CARRASCO *et al.*, 2014; BONFIM, 2019), tendo em vista que, por se tratar de um material não estrutural, as argamassas apresentam uma predisposição para consumir maiores quantidades de resíduos em sua composição (SAMIEL *et al.*, 2015) e que a diminuição da demanda de cimento Portland está diretamente relacionada com a redução do lançamento de CO_2 na atmosfera (MONTES-HERNANDEZ *et al.,* 2009). Todavia, faz-se necessário considerar alguns fatores ao utilizá-las para esta finalidade, deve-se realizar testes e estudos para determinar a quantidade ideal de cinzas a serem incorporadas, a dosagem e produção, bem como os efeitos na resistência e durabilidade dos produtos cimentícios ao longo do tempo.

Para tanto, o presente estudo abordará o desempenho mecânico de argamassas modificadas com inserção de cinzas de biomassa, produzidas a partir dos traços ótimos indicados por Bonfim (2019) que utiliza cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza de cavaco de eucalipto (CCE), associadas, em substituição parcial do cimento Portland, definindo os teores de cada cinza por meio da análise por superfície de resposta. Neste sendido, buscando eleger o traço ideal a partir da produção dos traços ótimos das argamassas modificadas com os blends de cinzas de biomassa. Contribuindo assim com estudos voltados para produtos ecoeficientes, que atenuam a quantidade de consumo de cimento Portland em produtos cimentícios (BARBOSA; ALMEIDA, 2016).

2 METODOLOGIA

2.1 CINZAS E *BLENDS* DE BIOMASSA

As cinzas de biomassa utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em diferentes regiões industriais. A cinza da casca de arroz (CCA) foi coletada diretamente no pátio de uma indústria de produtos alimentícios, localizada em Araguari, MG, cujos principais produtos beneficiados são: arroz, feijão e café. Após o beneficiamento do arroz, a sua casca é utilizada como material combustível para geração de calor durante o processo de torra do café.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), foi adquirida em uma usina de etanol localizada em João Pinheiro, MG. Segundo a empresa, a CBCA é obtida durante o processo de geração de energia por meio da queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, para que seja feita a produção de etanol.

E, a cinza do cavaco de eucalipto (CCE) foi fornecida por uma indústria de mineração, situada em Catalão, GO, que atua no beneficiamento de nióbio e fosfatos utilizados em fertilizantes para agricultura. O cavaco de eucalipto é utilizado pela empresa na geração de calor através de fornalhas que atingem temperaturas entre 1000 e 1100°C com o intuito de secar a rocha fosfática.

Após a coleta das cinzas de biomassa *in loco*, as mesmas foram transferidas para o laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia (FENG) da (UFCat), para caracterização e uniformização. Com a finalidade de homogeneizar as cinzas de biomassa, reduzindo e simplificando os processos com tratamentos preliminares, individualmente as amostras de CCA, CBCA e CCE foram secas em estufa à uma temperatura de 50ºC até apresentarem massa constante, em seguida passaram por peneiramento com a peneira #4 (abertura 4,75mm), por fim, foram processadas em um liquidificador industrial por 15 minutos em uma rotação de 30 rpm (GUIMARÃES *et al*., 2023).

Após a uniformização, foi possível obter os *blends* das cinzas de biomassa formados pela combinação entre a CCA, CBCA e CCE (%CCA + %CCE + %CBCA), seguindo os teores apresentados no Quadro 1, baseados no estudo de Bonfim (2019), o qual estabeleceu através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), as faixas de otimização do traço de argamassas de assentamento e revestimento com adição das cinzas CCA, CBCA e CCE, considerando os melhores resultados no desempenho mecânico das argamassas para as maiores parcelas de substituição do cimento Portland pelas cinzas de biomassa. Estes *blends* de cinzas de biomassa foram intitulados de Cmín, Cméd e Cmáx, fazendo alusão aos teores totais de cinzas, sendo, Cmín a menor porcentagem, Cméd a porcentagem média e Cmáx a porcentagem máxima de substituição ao cimento Portland (GUIMARÃES *et al.*, 2023).

Quadro 1 – Blends de cinzas de biomassa, baseado em Bonfim (2019) e Guimarães et al. (2023)

Blends	%CCA	%CBCA	%CCE	(%CCA+%CBCA +%CCE)
Cmín	12,50	3,20	0,00	15,70
Cméd	15,65	6,35	4,75	26,75
Cmáx	18,80	9,50	9,50	37,80

2.2 DOSAGEM E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS ÓTIMOS

Esta etapa teve como objetivo realizar a produção dos traços ótimos das argamassas com incorporação de cinzas de biomassa obtidos por Bonfim (2019), para análise do desempenho físico e mecânico,

fornecendo assim, dados que corroborem com a escolha do traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa proposto ulteriormente.

A argamassa referência foi do tipo mista, composta por cimento Portland, cal hidratada, agregado miúdo natural e água tratada, com traço em volume dado por 1:1:6 (cimento:cal:areia). Tal traço é tradicionalmente empregado em obras correntes, apresentando bom desempenho para a produção de argamassas de revestimento (CAMPOS, 2014; CARASEK, 2017).

Para as argamassas modificadas com *blends* de cinzas biomassa, seguiram as porcentagens definidas no Quadro 1, com as porcentagens ótimas de substituição, Cmín, Cméd e Cmáx. Assim, a partir do traço referência (Tref), isento de cinzas de biomassa, foram definidos os demais traços como sendo, Tmín, Tméd e Tmáx, totalizando, respectivamente, 15,70%, 26,75% e 37,80% a substituição em massa do cimento Portland pelos *blends* de cinzas de biomassa. Os traços em massa dos materiais utilizados para a produção das argamassas estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Traços em massa (kg) dos materiais utilizados para a produção das argamassas

Traço	Cimento	*Blends*	Cal	Areia seca	Água	a/c	a/ms
Tref	1,000	0,000	0,66	7,67	1,690	1,69	0,18
Tmín	0,843	0,157	0,66	7,67	1,690	2,00	0,18
Tméd	0,732	0,268	0,66	7,67	1,707	2,33	0,18
Tmáx	0,622	0,378	0,66	7,67	1,716	2,76	0,18

O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial (CPV-ARI) que possui elevado teor de clínquer em sua fabricação, entre 90 a 100%, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018c), é o cimento disponível no mercado, com menores adições em sua composição, sendo empregado em estudos voltados para a real influência das adições minerais em concretos e argamassas, como os realizados por Cabral *et al*. (2022), Gonçalves *et al*. (2021), Castro *et al*. (2020) e Degen *et al*. (2019). A cal adotada foi a hidratada com carbonatos, classificada como CH-III, conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003). O agregado miúdo utilizado, foi a areia natural (AR) seca com denominação comercial “média”.

2.3 DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DOS TRAÇOS ÓTIMOS

As argamassas foram produzidas em um recipiente padrão para todas as misturas, utilizando a argamassadeira, o equipamento foi utilizado tanto na mistura do material seco quanto na mistura da própria argamassa, seguindo as etapas descritas na NBR 16541 (ABNT, 2016).

Após a moldagem, os corpos de prova (cp’s) foram envoltos com plástico e submetidos a cura em ambiente laboratorial sem submersão em água com o intuito de realizar a cura seca. Após 24 horas os mesmos foram desmoldados e envoltos novamente com plástico até o momento da realização dos ensaios de compressão simples, tração na flexão, e absorção de água por capilaridade.

Para a produção das dosagens ótimas das argamassas em estudo, foram realizados os ensaios apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Metodologia para a produção dos traços ótimos das argamassas

DESCRIÇÃO	METODOLOGIA	MATERIAIS
Pasta de consistência normal	Adaptação do método previsto na NBR 16606 (ABNT, 2018a)	CP V-ARI, Cmín, Cméd e Cmáx
Início e fim de pega	Adaptação do método previsto na NBR 16607 (ABNT, 2018b)	
Preparo da mistura para realização de ensaios	NBR 16541 (ABNT, 2016)	Tref, Tmín, Tméd e Tmáx
Determinação da resistência à tração na flexão e da resistência a compressão simples	NBR 13279 (ABNT, 2005a)	
Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005c)	

Utilizou-se a prensa universal, modelo WDW-300E, para realização dos ensaios de compressão simples e de tração na flexão. O equipamento foi programado conforme os parâmetros previstos na NBR 13279 (ABNT, 2005a). As partes resultantes dos cp's utilizados no ensaio de tração na flexão, foram aproveitadas no ensaio de compressão simples, totalizando 6 cp's para cada traço e idade, ou seja, 96 cp's.

O ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias, realizado conforme prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005c), segundo Farinha *et al*. (2018), este ensaio simula a absorção capilar de revestimentos quando colocados em contato com a água externa. Por ser um ensaio não destrutivo, foram utilizados os mesmos cp's moldados para serem ensaiados nos ensaios de compressão simples e tração na flexão aos 56 dias de cura. Assim, no ensaio de absorção por capilaridade, foram utilizados cp´s para cada traço, totalizado 12 cp's. Inicialmente, determinou-se a massa de cada corpo de prova (cp) ainda seco e, posteriormente as amostras foram posicionadas sobre peneiras metálicas permitindo o máximo contato superficial da base do prisma com a lâmina d'água constante em imersão parcial de 5±1mm, dentro de um reservatório de 250 L.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a determinação da quantidade de água (A) necessária para a obtenção das pastas de consistência normal, assim como os tempos de início de pega (IP), de fim de pega (FP), e intervalo de pega (Δ_p) para a pasta referência (Ref), sem inserção de cinzas de biomassa, e as pastas com taxas graduais de substituições ao cimento Portland pelos *blends* Cmín, Cméd e Cmáx, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados da quantidade de água (A), início de pega (IP), fim de pega (FP) e intervalo de pega (Δ_p)

Pasta	A (%)	IP (min)	FP (min)	Δp (min)
Ref	36	158	190	32
Cmín	60	115	165	50
Cméd	72	113	195	82
Cmáx	98	194	255	61

Nota-se, pelo Quadro 4, que a quantidade de água necessária para a obtenção da pasta de consistência normal aumentou gradativamente conforme aumentava o teor de substituição de cimento por cinzas de biomassa. Isso se deve ao fato que o maior teor de cinza contribui para a queda da trabalhabilidade, pois suas partículas são maiores que a do cimento, além disso a quantidade de matéria orgânica não queimada na composição das cinzas é maior, o que requer maior quantidade de água para atingir uma trabalhabilidade adequada, conforme elucidado por Rajamma *et al*. (2009) e Aprianti *et al*. (2016).

Para IP e FP, tanto a pasta Ref, quanto as pastas Cmín, Cméd e Cmáx, mostram-se dentro dos limites indicados para o cimento Portland CPV-ARI, sendo 60 min o tempo mínimo para IP, e 600 min o tempo máximo para FP, prescritos pela NBR 16697 (ABNT, 2018c).

Observa-se que os valores de IP para a pasta contendo os *blends* Cmín e Cméd foram menores que o valor de IP da pasta Ref, e que o valor de FP para a pasta Cméd ficou bem próximo ao da pasta Ref. De modo geral, observa-se que ocorreu uma ampliação no intervalo de pega para todas as pastas com os *blends* de cinzas de biomassa, comparadas à pasta Ref, isso pode ser justificado pelo aprisionamento da água intersticial devido a microporosidade das cinzas de biomassa (PAULA *et al*., 2009).

Para a pasta Cmáx em relação a pasta Ref ocorreram acréscimos nos tempos de IP e FP de 22,78% e 34,21%, respectivamente. Este retardo pode ser explicado devido a maior porcentagem de CCE presente neste *blend*, que apresenta maiores partículas em sua composição granulométrica, e maior perda ao fogo se comparada a CCA e a CBCA, consequentemente maior presença de matéria orgânica não queimada (GUIMARÃES *et al*., 2023). Essa tendência foi observada de modo similar nas pesquisas com maior substituição do cimento Portland por CBCA, apresentando maior teor de carbono presente na pasta (MOURÃO; PAULA, 2022; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007; CORDEIRO; KURTIS, 2017).

No estado endurecido, os resultados encontrados para a resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão dos traços Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura, estão apresentados na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente.

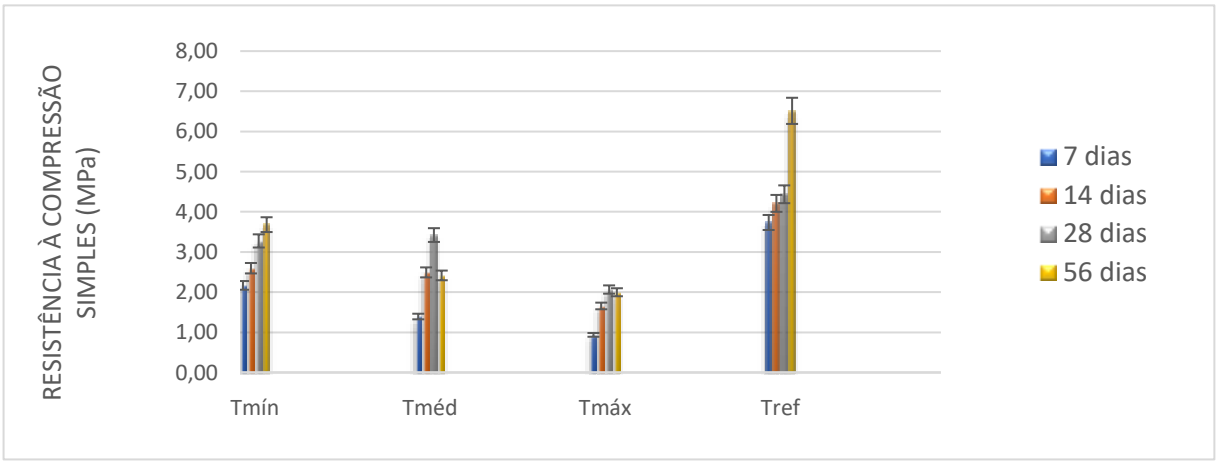


Figura 1 – Resistência à compressão simples para Tmín, Tméd e Tmáx, aos 7, 14 28 e 56 dias de cura

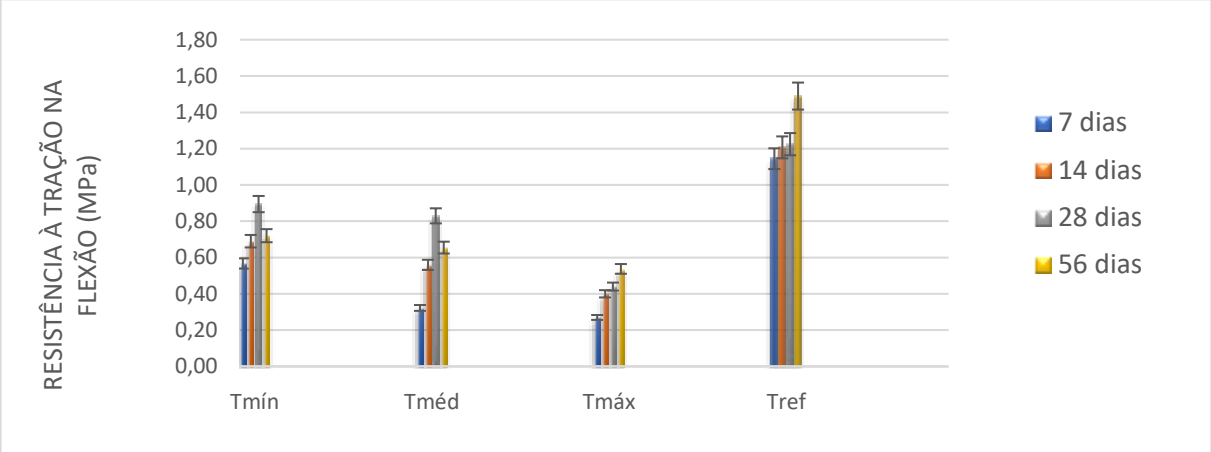


Figura 2 – Resistência à tração na flexão para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14,28, e 56 dias de cura

Observa-se na Figura 1, um aumento na resistência para os traços Tref, Tmín, Tméd e Tmáx ao longo do tempo de cura aos 7, 14 e 28 dias. Apesar de Tmín e Tref aos 56 dias de cura continuarem aumentando a resistência à compressão, o mesmo não ocorreu com Tméd e Tmáx, pois Tméd sofreu uma redução e o Tmáx manteve-se praticamente estável, sem ganho e ou perda, em sua resistência à compressão.

Cabe ressaltar que os resultados do ensaio de início de pega (IP) e fim de pega (FP), Quadro 4, mostram que as pastas utilizando Cméd e Cmáx, os mesmos *blends* utilizados em Tméd e Tmáx, respectivamente, requerem mais água para obtenção da pasta de consistência normal, e, considerando o intervalo de tempo de pega (Δ_p) dos *blends*, quanto maior o intervalo do tempo de pega menor foi a resistência à compressão simples obtida pela argamassa modificada apresentada na Figura 1. Essa relação aponta para uma possível adequação da dosagem (relação água/materiais secos), a fim de garantir os compostos hidratados das pastas modificadas com cinzas de biomassa.

Nos resultados da resistência à tração na flexão, Figura 2, percebe-se que tanto Tmín quanto Tméd sofreram uma redução da resistência à tração aos 56 dias de cura. Enquanto Tmáx e Tref continuaram crescendo com valores superiores aos obtidos aos 28 dias de cura. Ainda, observando os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5 e 6, é possível concluir que tanto a resistência da tração na flexão quanto na compressão simples, são grandezas que dependem diretamente da quantidade de cimento na mistura, posto que, quanto maior a porcentagem de cimento presente na argamassa, maior e melhor foi o resultado obtido para essas resistências aos 56 dias de cura.

A NBR 13281 (ABNT, 2023a) possibilita a classificação das argamassas conforme a resistência à compressão simples e à tração na flexão. Assim pode-se observar que de acordo com essa normativa, para o resultado da resistência à compressão (f_a) a argamassa Tref pode ser designada, pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023c), como argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE), com 5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa, enquanto, Tmín, Tméd e Tmáx, podem ser classificadas em argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, apenas vedação (AAV), com 2,0 MPa ≤ f_a < 5,0 MPa, ou para fixação horizontal da alvenaria, apenas encunhamento (AAF), com 1,5 MPa ≤ f_a < 5,0 MPa.

Para a resistência à tração na flexão (R_f), através dos intervalos de classificação apontados pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023b), as argamassas de revestimento de paredes e tetos, Tref classifica-se em R3, com R_f variando entre 1,5 a 3,0 MPa, Tmín, Tméd e Tmáx classificam-se em R2, com R_f variando de 0,5 a 1,5 MPa.

Observa-se que o Tmín foi o único traço modificado com cinzas de biomassa que não teve queda em sua resistência à compressão simples aos 56 dias, o que pode ser explicado pela isenção de CCE no *blend* Cmín (12,50%CCA + 3,20%CBCA + 0,00%CCE), neste caso a CCE pode ter interferido negativamente na resistência à compressão simples dos traços Tméd com *blend* Cméd (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75% CCE) e Tmáx com o *blend* Cmáx (18,80%CCA + 9,50%CBCA + 9,50%CCE). Além disso, por demandarem por mais água na obtenção da pasta de consistência normal, e um maior intervalo de pega, a relação a/ms pode ter sido insuficiente para garantir compostos hidratados, este fator pode ter sido agravado pela cura realizada sem a submersão, cura seca, dos cp's para aproximar ao comumente empregado na aplicação das argamassas nas obras. Também, Tméd e Tmáx possuem maiores teores de substituição do cimento, esse fato está diretamente ligado a perda de resistência comparado a Tref.

Para a resistência à tração na flexão, aos 56 dias de cura, apenas Tmáx manteve-se ganhando resistência, isso pode ser justificado pela menor porcentagem de cimento e maior porcentagem de cinzas garantindo um melhor desempenho mecânico.

No estado endurecido, os resultados encontrados para o ensaio de absorção por capilaridade, dos traços Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 28 dias de cura estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados da absorção e do coeficiente de capilaridade

Traço	cp	Absorção por capilaridade (g/cm²)		Coeficiente de capilaridade (C)			C*
		10 min	90 min	C (g/dm².min1/2)	Cmédia (g/dm².min$^{1/2}$)	DP (%)	Se DP>20%
Tref	I	0,013	0,031	0,3	1,1	27,3	1,3
	II	0,019	0,112	1,5			
	III	0,019	0,088	1,1			
Tmín	I	0,206	0,613	4,5	4,5	68,9	4,6
	II	0,069	0,263	3,1			
	III	0,231	0,525	4,7			
Tméd	I	0,281	0,537	4,1	3,2	128,1	3,2
	II	0,094	0,294	3,2			
	III	0,200	0,400	3,2			
Tmáx	I	0,481	0,725	3,9	3,7	75,7	3,8
	II	0,281	0,456	2,8			
	III	0,381	0,613	3,7			

Pelo resultado do coeficiente de absorção por capilaridade (C*), Quadro 5, nota-se que a ausência da CCE no *blend* Cmín culminou em uma maior velocidade de absorção de água por capilaridade no traço Tmín, enquanto que para Tméd e Tmáx pode ter ocorrido um melhor preenchimento da matriz cimentícia pelos diferentes tamanhos das partículas, pois tanto o *blend* Cméd quanto o *blend* Cmáx possuem em sua composição a CCA, CBCA e CCE. Além disso, observa-se que o aumento da porcentagem das cinzas no Tmáx com o *blend* Cmáx (18,80%CCA + 9,50%CBCA + 9,50%CCE), comparado ao Tméd com o *blend* Cméd (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75% CCE), resultou em um acréscimo no coeficiente de capilaridade do Tmáx. Assim, relacionando os resultados para o coeficiente de capilaridade deste estudo, com os resultados obtidos por Guimarães *et al*. (2023) nos ensaios de finura dos *blends* Cmín, Cméd e Cmáx, é possível observar que a menor finura para o *blend* Cmín, no valor de 52,5%, apresentou o maior coeficiente de capilaridade, 4,6 g/dm².min$^{1/2}$, e que a

maior finura para o *blend* Cméd, no valor de 53,5% apresentou o menor coeficiente de capilaridade, 3,2 g/dm².min$^{1/2}$.

A NBR 13281 (ABNT, 2005b) possibilita a classificação das argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade. Assim, as argamassas com traços Tref classifica-se em C1 (coeficiente de capilaridade ≤ 1,5 g/dm².min$^{1/2}$), Tmín em C4 (variando entre 3,0 a 7,05 g/dm².min$^{1/2}$), e por fim Tméd e Tmáx em C3 (variando entre 2,0 a 4,0 g/dm².min$^{1/2}$). Enfatizando o melhor desempenho entre as argamassas modificadas com cinzas de biomassa, o Tméd, utilizando o *blend* Cméd.

Por fim, está apresentado no Quadro 6 a síntese das características obtidas para a argamassa modificada com cinzas de biomassa, traço Tméd, escolhido como traço ideal para o desenvolvimento de uma argamassa ecoeficiente.

Quadro 6 – Síntese das características do traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa

<table>
<tr><td colspan="10">Argamassa Tméd = traço ideal</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Traço em massa (kg)</td><td>cimento</td><td>blend</td><td>cal</td><td>Areia</td><td>água</td><td>a/c</td><td>a/ms</td><td colspan="2">Classificação conforme o requisito estudado</td></tr>
<tr><td>0,732</td><td>0,268</td><td>0,66</td><td>7,67</td><td>1,69</td><td>2,33</td><td>0,18</td><td>NBR 13281 (ABNT, 2005b)</td><td>NBR 13281 (ABNT, 2023a)</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Resistência à compressão simples</td><td>(dias)</td><td>7</td><td>14</td><td>28</td><td>56</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">AAV
AAF</td></tr>
<tr><td>(MPa)</td><td>1,4</td><td>2,45</td><td>3,38</td><td>2,43</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Resistência à tração na flexão</td><td>(dias)</td><td>7</td><td>14</td><td>28</td><td>56</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">R2</td></tr>
<tr><td>(MPa)</td><td>0,33</td><td>0,56</td><td>0,77</td><td>0,65</td></tr>
<tr><td colspan="7">Coeficiente de capilaridade (g/dm².min$^{1/2}$)</td><td>3,2</td><td>C3</td><td>-</td></tr>
</table>

4 CONCLUSÕES

Os resultados apontaram que a argamassa modificada com o traço Tméd substituindo 26,75% a massa do cimento Portland por cinzas de biomassa (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75%CCE), pode ser escolhido como traço ideal para o desenvolvimento de uma argamassa modificada considerando a máxima quantidade de teor de cinzas no desenvolvimento de um produto ecoeficiente, promovendo uma maior sustentabilidade. Posto que o traço Tméd contém o *blend* Cméd com o melhor perfil pozolânico apontado por Guimarães *et al*. (2023), além disso apresentou o melhor desempenho mecânico identificado para as resistências à compressão simples e à tração na flexão, e o melhor desempenho físico para a absorção por capilaridade.

REFERÊNCIAS

APRIANTI, E. et al. Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials. Construction and Building Materials, v. 107, p. 365-377, 2016. ISSN: 0950-0618. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.100

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. NBR 13281: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2023a.

_____. NBR 13281-1: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023b.

_____. NBR 13281-2: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023c.

_____. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.

_____. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ATAIE, F. F.; RIDING, K. A. Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption. Construction and Building Materials, v.106, p. 274-281, 2016. ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091

BARBOSA, T. G.; ALMEIDA, M. M. O. G. Construção sustentável: contributo as ferramentas de avaliação. Curitiba: CRV, 2016.

BEZERRA, I. M. T. *et al.* Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011. ISSN 1807-1929. https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600015

BEZERRA, I. M. T. *et al.* Coating mortar using rice husk ash as binding. Materials Science Forum, Trans Tech Publications, v. 727-728, p. 1502-1507, 2012.

BONFIM, W. B. Otimização do teor de incorporação de cinzas de biomassa para produção de argamassas. Orientador: Heber Martins de Paula. 2019. 110f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Catalão - GO, 2019.

CABRAL, S. C.; BARBOSA, F. A.; PINTO, E. L. Análise comparativa de resistência à compressão uniaxial de traço de argamassa autoadensável e concreto celular espumoso com incorporação de sílica ativa ou cinza de madeira de eucalipto. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, IV, 2022, Salvador. Anais eletrônicos [...] Feira de Santana:

ABMTENC, 2022. p. 384-397. ISBN: 978-65-00-55912-5. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1_2JsuXiKwPpGW9AG35aFz6SmWk6BFttE/view

CAMPOS, M. O. Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CAMPOS, P. A.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Ação conjugada da sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio em compósitos de cimento Portland: porosidade, compostos hidratados, reserva alcalina e resistência a compressão. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, 2022. ISSN 1517-7076. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0018

CANOVA, J. A.; MIOTTO, J. L.; MORI, L. M. D. Avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Revista Ciência e Engenharia, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, v. 24, n. 1, p. 125-134, 2015. http://dx.doi.org/10.14393/19834071.2015.27888

CARASEK, H. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. In: [S.l.]: IBRACON, 2017. cap. 28, p. 1–37.

CARRASCO, B. *et al.* An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. Fuel, v. 118, p. 272–280, 2014. ISSN 0016-2361. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077

CASTRO, M. F. *et al*. Incorporação de cinza de casca de arroz para preparação de argamassas de assentamento e revestimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVIII, 2020, Porto Alegre. Anais eletrônicos […] Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. ISBN: 978-65-00-13688-3. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/issue/view/16

CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: an overview. Ain Shams Engineering Journal, v.6, n.2 p. 429-437, 2015. ISSN 2090-4479. http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar canebagasse ash pozzolanicity. Cement and Concrete Research. v. 97, 41-49, 2017.

DEGEN, M. K. *et al*. Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, VI, 2019, Belém. Anais eletrônicos [...] Belém: ENARC, 2019. p. 340-356. ISSN 2175-1870. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1LogcpPCkZWJ7mRUqXl_T60pX6kQqdFjJ/view

FARINHA, C. B. *et al*. Wastes as Aggregates, Binders or Additions in Mortars: Selecting Their Role Based on Characterization. Materials, v. 11, n. 3, p. 453, 2018. ISSN: 1996-1944. https://doi.org/10.3390/ma11030453.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites. v. 29, n. 6, 515-524. 2007. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001

GONÇALVES, C. F.; SOARES, A. F.; PAULA, H. M. Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar. Revista ALCONPAT, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2021. ISSN 2007-6835. https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484

GUIMARÃES, C. C. C. *et al*. Efeito sinérgico das cinzas de biomassa: avaliação do potencial pozolânico. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, VIII, 2023, Foz do Iguaçu, PR. Anais eletrônicos [...] Foz do Iguaçu: ENARC, 2023. p. 1-7. ISSN 2175-1870. https://doi.org/10.46421/enarc.v8i00.2909

LIMA, C. J. F. *et al*. Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 161-166, 2022. ISSN: 1678-8621. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100585

MATOS, W. E. C. *et al*. Utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. Revista Matéria. v. 26. n.4, Rio de Janeiro, 2021. ISSN 1517-7076. https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322

MODOLO, R. C. E. *et al.* Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. Construction and Building Materials, v. 45, p. 275–281, 2013. ISSN 0950-0618.

MONTES-HERNANDEZ, G. *et al.* Mineral sequestration of CO_2 by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. Journal of Hazardous Materials, Elsevier BV, v. 161, n. 2-3, p. 1347-1354, 2009.

MORAES, J. C. B. *et al*. Increasing the sustainability of alkali-activated binders: The use of sugar cane straw ash (SCSA). Construction and Building Materials, v. 124, p. 148-154, 2016. ISSN 0950-0618. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.090

MOURÃO, A. B.; PAULA, J. N. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça como substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, IV, 2022, Salvador. Anais eletrônicos [...] Feira de Santana: ABMTENC, 2022. p. 606-619. ISBN: 978-65-00-55912-5. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1_2JsuXiKwPpGW9AG35aFz6SmWk6BFttE/view

PAULA, M. O. *et al*. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial ao cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.13, n. 3, 353-357. 2009. https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019

RAJAMMA, R. *et al*. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. Journal of Hazardous Materials, v. 172, n. 2, p. 1049–1060, 2009. ISSN 0304-3894

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. Construction and Building Materials, v. 49, p. 343-351, 2013. ISSN 0950-0618. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026

SAMIEI, R. R. *et al.* Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, Elsevier BV, v. 84, p. 84-94, 2015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.042

UKRAINCZYK, N.; VRBOS, N.; KOENDERS, E. A. B. Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, v. 30, n. 2, p. 13–148, 2016. http://dx.doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRODUÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO COM O MICÉLIO NA CONSTRUÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Joyce de Deus Pires Teixeira[a]; Ana Carolina Rocha Tostes Oliveira[b]; Thiago Melo Grabois[c]; Lucas Rosse Caldas[d]

[a] (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon 550, 21941-901, Rio de Janeiro, Brasil), joyce.teixeira@fau.ufrj.br

[b] (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon 550, 21941-901, Rio de Janeiro, Brasil), ana.tostes@fau.ufrj.br

[c] (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon 550, 21941-901, Rio de Janeiro, Brasil), grabois@fau.ufrj.br

[d] (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon 550, 21941-901, Rio de Janeiro, Brasil), lucas.caldas@fau.ufrj.br

RESUMO

Os compósitos à base de micélio são biodegradáveis, com potencial de baixo impacto ambiental e podem ser uma alternativa a soluções convencionais na construção civil. Os blocos de micélio são formados por uma mistura de resíduos agrícolas e das raízes dos fungos, que atuam como um tipo de aglutinante. Suas propriedades mecânicas dependem do substrato e da espécie fúngica utilizada. A fim de identificar o histórico do desenvolvimento dos compósitos de micélio, foi feita uma revisão sistemática da literatura, por meio do mapeamento de artigos publicados nos últimos cinco anos. Os resultados foram compilados em uma tabela que sintetizaram: (1) os principais materiais constituintes, (2) o modo de produção, caracterização e propriedades; (3) os elementos construtivos e suas aplicações arquitetônicas. Os estudos demonstraram que a espécie fúngica mais utilizada foi a *Pleurotus ostreatus*, os substratos mais utilizados foram a serragem, cânhamo, palha e grãos de trigo, e as aplicações mais comuns foram os blocos, seguido dos compósitos impressos em 3D. No geral, o biomaterial oferece boas propriedades térmicas e mecânicas, atuando como um bom isolante térmico. Assim, o artigo apresenta um panorama geral dos desafios e oportunidades a partir do uso do micélio na arquitetura, no contexto das construções sustentáveis.

Palavras-chave: micélio, biomateriais, arquitetura sustentável, experimentação, revisão da literatura

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental tem sido um dos grandes desafios da contemporaneidade. Os materiais construtivos convencionais consomem muita energia e recursos naturais, que estão se tornando cada vez mais limitados, devido ao aumento populacional. Pelas projeções da ONU no relatório World Population Prospects (2022), chegaremos à marca de 8,5 bilhões de pessoas em 2030, o que aumentará ainda mais a demanda por habitações, infraestrutura e, consequentemente a produção de novos materiais de construção.

Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023) observam que o maior entendimento acerca das mudanças climáticas e dos impactos ambientais tem aumentado o interesse na busca por materiais mais eficientes e alternativos aos convencionais.

Neste contexto, o estudo a partir do crescimento de fungos filamentosos, também conhecidos por micélio, tem atraído interesse acadêmico e comercial, principalmente nesta última década, como uma opção biodegradável, de baixa energia, e de reciclagem de resíduos agrícolas. Além disso, possuem uma série de vantagens em relação aos materiais convencionais, destacando-se pelo seu baixo custo, a partir da utilização de recursos naturais mais baratos, pelo seu baixo impacto ambiental e de pegada de carbono, ao consumir menos energia em sua produção. (Jones *et al.* 2020)

A parte frutífera dos fungos, conhecida como cogumelo, não tem sido o alvo desses estudos, mas sim suas raízes, que são compostas de hifas, formando uma grande rede micelial. Özdemir *et al.* (2022) ressaltam que as hifas miceliais podem atuar como um adesivo natural, substituindo materiais que utilizam mais energia em sua produção, gerando menos impactos ambientais.

Quando o fungo encontra um local propício para germinar, o micélio se converte em uma espécie de cola, que aglutina todo o substrato, deixando-o mais rígido, formando um bloco sólido. Esse substrato pode ser composto por diversos resíduos lignocelulósicos agrícolas de baixo custo, como serragem, madeira moída, palha, grãos, entre outros. É importante salientar que cada substrato é composto por diferentes concentrações de polissacarídeos, lipídios, proteínas e quitina, e essas diferenças irão refletir diretamente nas propriedades mêcanicas do bloco de micélio formado posteriormente (Haneef *et al.* 2017).

Em geral, segundo Elsacker *et al.* (2021), os materiais miceliais apresentam comportamento dúctil e que a falta de homogeneidade na distribuição do micélio e do substrato afetam a capacidade de suportar cargas, ou seja, o biomaterial oferece boas propriedades térmicas e mecânicas, atuando como um bom isolante térmico, mas não é adequado para fins estruturais.

Diante do exposto, a fim de identificar o histórico do desenvolvimento dos compósitos de micélio, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, por meio do mapeamento de artigos publicados nos últimos cinco anos, de 2018 a 2023. O objetivo da pesquisa é responder os seguintes questionamentos: (i) Quais são os substratos e espécies fúngicas estão sendo mais utilizadas? (ii) Como é feita a produção destes blocos? (iii) Quais elementos construtivos estão sendo utilizados a partir do micélio? (iv) Que propriedades estão sendo analisadas nesses experimentos?

Assim, o presente estudo abordou um recente tema no contexto da economia circular e das construções sustentáveis, apresentando um panorama geral do uso do micélio na construção civil. Os resultados encontrados revelaram os principais materiais constituintes de soluções baseadas em micélio, o modo de produção, caracterização e propriedades das mesmas, os elementos construtivos em que mais foram utilizadas e as principais aplicações arquitetônicas. A partir desta pesquisa, espera-

se contribuir para o desenvolvimento e produção de materiais não-convencionais, biodegradáveis e com potencial de reaproveitamento de resíduos, no setor de AEC.

2 MÉTODO - REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

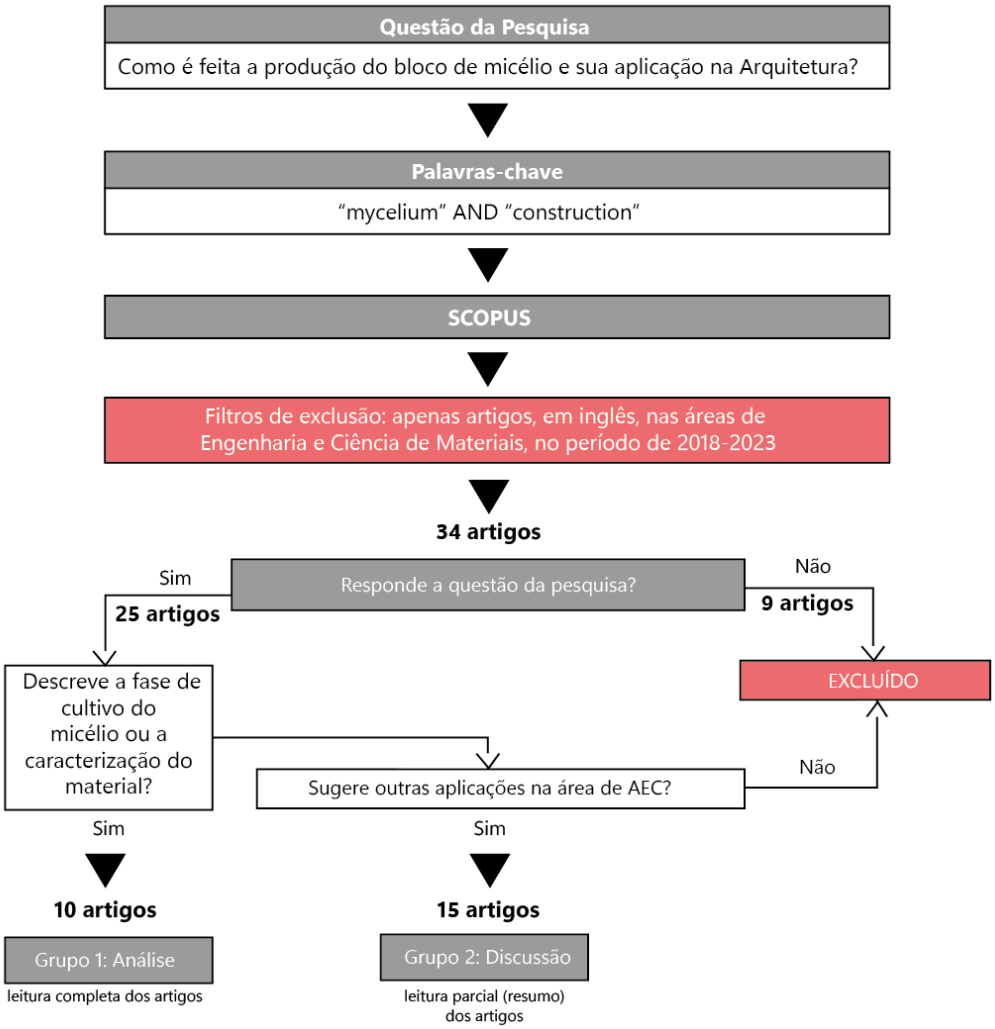


Figura 1 – Critérios de pesquisa.

A fim de identificar o histórico do desenvolvimento e uso de compósitos fúngicos na área de materiais e construção civil, foi feita uma revisão sistemática da literatura (RSL) de artigos científicos na língua inglesa dos últimos cinco anos, na base de dados Scopus, na qual estão indexadas algumas das revistas mais relevantes mundialmente.

O método adotado pela RSL começou pela definição de uma questão, que deveria ser respondida pela literatura. Em seguida, foram elencados as palavras-chave e os critérios de exclusão da busca para filtrar os artigos que não respondiam a questão da pesquisa. Alguns artigos, quando considerados úteis ou correlatos, seguiram para uma análise qualitativa.

A questão da pesquisa definida foi "Como é feita a produção dos blocos de micélio e qual sua aplicação na Arquitetura?". A seguir, utilizou-se as seguintes palavras-chave na base de dados Scopus: "mycelium" AND "construction". Foi considerado apenas os artigos publicados em revistas científicas, excluindo dissertações, teses e capítulos de livros. Para a seleção dos artigos relevantes foram

adotados os seguintes critérios de aceitação: (i) artigos em inglês; (ii) nas áreas de conhecimento de Engenharia e Ciência de Materiais; (iii) durante o período de 2018 a 2023; (iv) que apresentassem no título ou resumo, ou artigo completo, a questão da pesquisa.

A busca inicial, de acordo com os critérios da Figura 1, resultou em 34 artigos. Após a leitura na íntegra dos artigos, nove foram descartados por não atenderem aos seguintes critérios: (i) não estavam relacionados à área de arquitetura e construção civil; (ii) não descreveram a fase de cultivo e desenvolvimento do micélio e/ou a caracterização do material.

Destes 25 artigos selecionados, 10 estavam totalmente relacionados aos critérios estabelecidos acima, demonstrando a produção de blocos de micélio com diferentes substratos e espécies fúngicas, como também a aplicação de ensaios mecânicos para determinar sua resistência. Os outros 15 artigos apresentaram assuntos correlatos, ou seja, incluíram em suas pesquisas a produção de compósitos de micélio para diferentes aplicações, como de bioespumas, compósitos para impressão 3D ou bioconcretos.

3 RESULTADOS

3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

O micélio é a raíz do cogumelo, e tem sido utilizado na produção de biocompósitos que reaproveitam resíduos agrícolas, atuando como uma cola que liga os substratos como serragem, palha, cânhamo, grãos de trigo, casca de arroz, lascas de madeira, entre outros. Esses tipos de resíduos vegetais possuem uma quantidade moderada de carboidratos, água, proteínas e compostos inorgânicos que permitem o crescimento micelial (Lingam *et al*., 2023). Isso ocorre porque os fungos conseguem decompor a lignina, hemicelulose e celulose, degradando o substrato que são absorvidos pelas hifas, permitindo o crescimento fúngico (Saez *et al*., 2022).

Ainda analisando a composição das redes miceliais, a quitina, que é o segundo biopolímero mais abundante do mundo, é a responsável pela resistência à tração do micélio. É exatamente por essa característica que os testes de Ongpeng *et al.* (2020) demonstraram que ao adicionar o micélio nos ensaios de flexão, houve uma melhora na ductilidade das amostras, produzindo menos fissuras. Além disso, apresentam outras vantagens como serem bons isolantes térmicos e acústicos, pois em sua maioria, os substratos são muito porosos, e de baixa densidade (Alemu; Tafesse; Deressa, 2022).

Rezende *et al.* (2021) destacam as espécies do gênero Pleurotus como de cultivo relativamente fácil em substratos como palhas de cereais, grama seca, folhagens, serragem, resíduos da produção de milho, cascas de sementes, resíduos de café, bagaço da cana de açúcar, papel, papelão e subprodutos da indústria papeleira.

Nesse sentido, a partir da leitura dos artigos selecionados, pode-se perceber que as espécies fúngicas mais utilizadas nos estudos foram: *Pleurotus ostreatus* (36%), *Ganoderma lucidum* (28%) e *Trametes versicolor* (20%), seguidas de *Pycnoporus sanguineus* (8%) e *Ganoderma resinaceum* (8%), como demonstrado na Figura 2A.

Na figura 2B, percebe-se que os substratos mais utilizados foram serragem de madeira (22,5%), cânhamo ou resíduos têxteis (10%), palha (10%) e farelo ou grãos de trigo (7,5%).

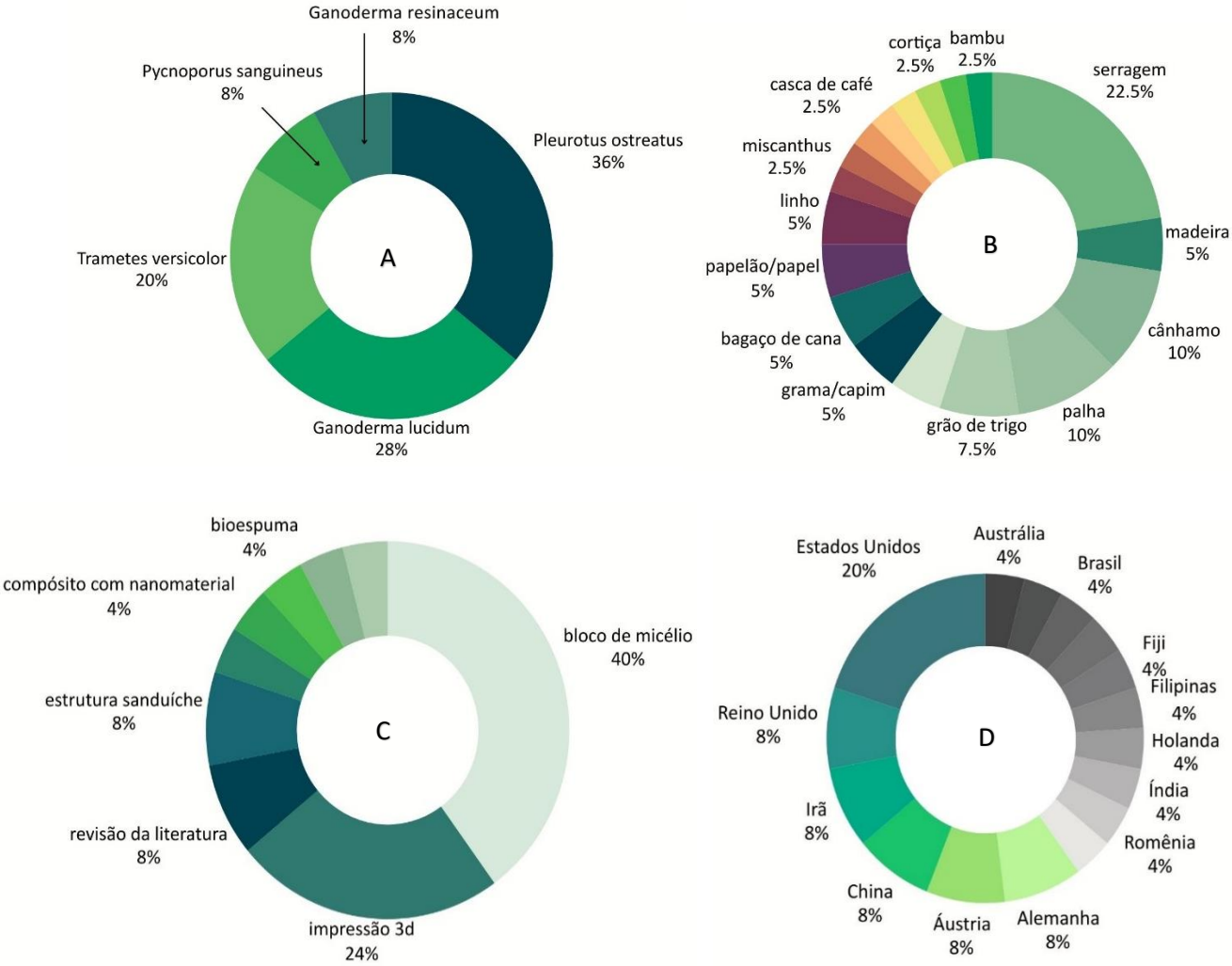


Figura 2A, 2B, 2C, 2D – Gráfico com espécies fúngicas (A), substratos mais utilizados (B), aplicações mais recorrentes (C) e os países de origem das pesquisas (D), respectivamente.

Na figura 2C, o gráfico aponta para as aplicações mais comuns das amostras, que foram: bloco ou placa de micélio (40%), compósitos impressos em 3D (24%), e parede ou estrutura sanduíche de madeira com forramento em micélio (8%).

Observa-se na figura 2D, que os Estados Unidos tem liderado as pesquisas acerca do micélio, apresentando as maiores taxas de publicações (20%), seguido do Reino Unido, Irã, China e Áustria (8%). O Brasil aparece no ranking (4%), com uma única pesquisa sobre bioespumas, expressando que as pesquisas brasileiras acerca do tema ainda não estão tão avançadas. Por outro lado, a justificativa para as pesquisas serem maiores em solos americanos podem se dar pelo fato das duas maiores fábricas (Mycoworks e Ecovative) produtoras de materiais derivados do micélio (como couro e embalagens) estarem localizadas no país.

A partir dessas informações, é possível fazer algumas correlações entre a escolha do substrato e respectivos países de origem. Como esperado, a serragem e a madeira aparecem na maior parte desses artigos, mas vale ressaltar também os estudos com grãos de centeio/trigo nos Estados Unidos, considerando que é um material amplamente produzido no país, e os estudos utilizando cânhamo em países europeus (Alemanha e Reino Unido), considerando que o cultivo dessa plantação tem aumentado na União Européia nos últimos anos.

A seguir, foram compiladas as informações citadas em uma tabela síntese (Quadro 1), que demonstram cada espécie fúngica utilizada, substrato e aplicação ou elemento desenvolvido nesses estudos, de acordo com cada autor, ano e país correspondente.

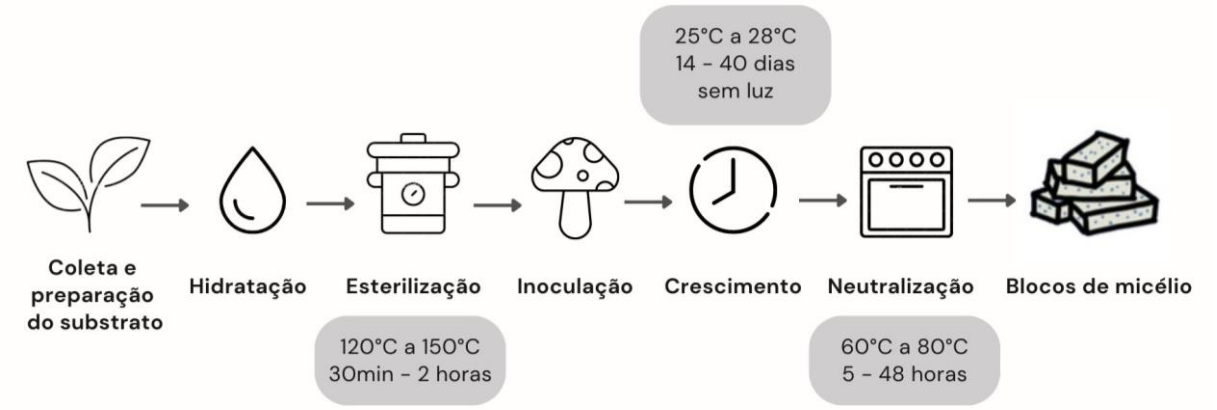
Quadro 1 – Espécies fúngicas, substratos e aplicações da amostra em trabalhos existentes à base de micélio, publicados entre 2018 e 2023, por autor, ano e país de origem.

Autor, ano	País	Espécie utilizada	Substrato	Elemento / aplicação
Bagheriehnajjar; Yousefpour; Rahimnejad, 2023	Irã	*Trametes versicolor*	Serragem, aparas de madeira, fibras finas e grossas de bambu	Bloco de micélio (cilindro)
Zhang *et al.,* 2023	China	*Trametes versicolor*	Serragem de choupo e bétula	Bloco de micélio (cilindro)
Lingam *et al*., 2023	Fiji	*Pleurotus ostreatus*	Capim juncão, bagaço de cana, casca de coco e combinação de casca de coco mais bagaço.	Bloco de micélio (placa)
Mohseni *et al*., 2023	Estados Unidos	*Pleurotus ostreatus*	Papelão	Impressão 3D
Kaiser *et al*., 2023	Reino Unido	*Ganoderma lucidum*	Serragem e fôrma têxtil	*"Myconcrete"*
Özdemir *et al*., 2022	Alemanha	*Ganoderma lucidum*	Restos de cânhamo misturados com farelo de trigo e sulfato de cálcio	Compósito impresso 3D com lâmina de madeira e mistura de cânhamo com micélio
Koh *et al*., 2022	Holanda	Não especificado	Micélio, palha, miscanthus e linho; grama; cânhamo; cortiça expandida	Parede de tijolos e parede com estrutura de madeira com cavidade de ar
Saez *et al*., 2022	Alemanha	*Ganoderma lucidum e P. sanguineus*	Madeira de faia	Bloco "sanduíche" de micélio
Zhang *et al*., 2022	Estados Unidos	*Pleurotus ostreatus*	Grãos de centeio	Bloco de micélio
Alemu; Tafesse; Deressa, 2022	Etiópia	*Pleurotus ostreatus*	Serragem, bagaço de cana e casca de café	Bloco de micélio
Sharma e Sumbria, 2022	Índia	-	-	Revisão
Brandić Lipińska *et al.*, 2022	Estados Unidos	*G. lucidum, C.neoformans, B. subtilis, P. Linteus, Annulohypoxylon*	Regolito comprimido, basalto sinterizado, concreto de enxofre, regolito lunar, gelo, micoterial	Elementos de construção para uso extraterrestre
Ilgun e Schmickl, 2022	Áustria	*Trametes versicolor*	Não especificado	Impressão 3D

Autor, ano	País	Espécie utilizada	Substrato	Elemento / aplicação
Ghazvinian e Gürsoy, 2022	Estados Unidos	*Pleurotus ostreatus*	Serragem de carvalho e palha de trigo em diversas proporções	Blocos de micélio
Jauk *et al*., 2022	Áustria	*Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum*	Argila e água + partes orgânicas (serragem e celulose).	Mistura chamada *MyCera* para impressão 3D
Adamatzky e Gandia, 2022	Reino Unido	*Ganoderma resinaceum*	Cânhamo e soja	Blocos de micélio
Răut *et al*., 2021	Romênia	*Ganoderma lucidum*	Palha de trigo, micélio fúngico e polipropileno incorporado com esporos bacterianos	Blocos de micélio (placa)
Modanloo *et al*., 2021	Irã	*Pleurotus ostreatus*	Papelão e papel picados, serragem, palha picada	Mistura para impressão 3D
Zhang *et al*., 2021	Estados Unidos	*Pleurotus ostreatus* e *Fusarium oxysporum*	Solução a base de batata + silicato de sódio	Fibras fúngicas com boa estabilidade térmica e resistência ao fogo
Elsacker *et al*., 2021	Bélgica	*Trametes versicolor* e *G. resinaceum*	Fibras de cânhamo e serragem em 2 amostras diferentes	Blocos de micélio e material para fabricação digital
Trabelsi *et al*., 2021	Tunísia	*Pleurotus ostreatus*	Ágar + extrato de malte + peptona (solução líquida)	Compósitos de micélio reforçados com nanomateriais
Manan *et al*., 2021	China	-	-	Revisão da literatura
Ongpeng *et al.*, 2020	Filipinas	Não especificado	Serragem e farelo de arroz, com e sem micélio	Blocos de substrato com e sem micélio, comparados com tijolo
Bruscato *et al.*, 2019	Brasil	*P. sanguineus, P. albidus e L. velutinus*	Serragem e farelo de trigo.	Bioespuma
Jones *et al*., 2018	Austrália	*Trametes versicolor*	Casca de arroz e grão de trigo	Compósitos de micélio menos inflamáveis que os polímeros e madeiras

3.2 PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E PRINCIPAIS PROPRIEDADES

A produção dos blocos de micélio variou muito em cada estudo devido ao substrato, espécie fúngica utilizada e aplicação desejada. Dessa forma, foi elaborado um resumo do processo de produção realizado nos principais estudos, ou seja, aqueles que desenvolveram as etapas indicadas em seus experimentos, como demonstrado na Figura 3.



Fonte: Bagheriehnajjar et al. (2023); Zhang et al. (2023); Lingam et al. (2023); Saez et al. (2022) e Özdemir et al. (2022)

Figura 3 – Principais etapas do processo de produção dos blocos de micélio

Em síntese, após a escolha do substrato, o material é embebido em água destilada, sofrendo o processo de hidratação, sendo esta primeira etapa, primordial para o crescimento fúngico. Em seguida, a mistura é homogeneizada, para aumentar a área de superfície de crescimento. O material macerado ou picotado é então esterilizado entre 120°C e 150°C, com tempo variando de no mínimo 30 minutos e no máximo 2 horas, por meio de uma autoclave, que mantém o material hidratado, removendo as bactérias e microrganismos existentes. Depois desse processo, o material resfriado é despejado em moldes (com formato da geometria desejada) iniciando o processo de colonização ou crescimento dos fungos. Após a inoculação, em que o substrato é misturado com as sementes inoculadas com o fungo escolhido, o material é armazenado em um ambiente sem contato com a luz, a uma temperatura de 25°C a 28°C, por um período de crescimento de 14 a 40 dias, a depender da espécie do fungo, do substrato utilizado, e da temperatura mantida. Em seguida, os compósitos podem ser removidos dos moldes e prensados a quente ou secos em estufa, para desidratar e neutralizar o crescimento fúngico, endurecendo o material. Outros tipos de revestimento e pós-processamentos podem ser aplicados para melhorar as propriedades mecânicas dos blocos (Bagheriehnajjar; Yousefpour; Rahimnejad, 2023; Zhang *et al.,* 2023; Lingam *et al*., 2023; Saez *et al.*, 2022; Özdemir *et al.*, 2022).

3.3 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS E PRINCIPAIS APLICAÇÕES NA ARQUITETURA

Em relação às aplicações arquitetônicas, o método mais comum é a montagem de pequenos blocos que formam uma estrutura maior, isso porque, de acordo com Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023), o micélio possui propriedades adequadas de compressão, para aplicações não estruturais.

Um dos primeiros exemplares utilizando blocos de micélio em larga escala foi a Hy-Fi Tower (Figura 4), exibida em 2014, em Nova York. Foi desenvolvida em parceria com o estúdio de arquitetura *The Living* e a *Ecovative Design*, uma startup que possuia expertise no assunto. De acordo com Abhijith, Ashok e Rejeesh (2018) a empresa americana foi pioneira na ideia de usar espuma à base de micélio em embalagens, tendo a capacidade de substitir materiais convencionais, como o poliestireno (isopor). Para o pavilhão em questão, demonstrado na Figura 4, foram confeccionados tijolos de micélio, produzidos em menos de uma semana, a partir de resíduos de talos de milho picados, misturados dentro de moldes, que depois se solidificaram, e conseguiram erguer uma torre de 12 metros de altura. Ao fim da exposição, a estrutura foi desmontada e os tijolos foram transportados de volta para as composteiras, tornando-se um bom exemplo de economia circular.

Figura 4 – Hy-Fi Tower na exposição do pátio do MoMA PS1 em Nova York.
Fonte: Souza (2020)

Existem outros protótipos arquitetônicos sendo desenvolvidos, especialmente na última década. É importante destacar, inclusive, a produção dos autores Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023), que desenvolveram uma pesquisa no intuito de fabricar peças de micélio em pequena escala, para serem aplicadas em sistemas modulares, interligadas por meio de um sistema de intertravamento. O estudo envolveu simulação computacional, testando vários tipos de módulos até alcançar o formato ideal de encaixe entre as peças, resultando em uma forma geométrica que isentasse o uso de peças extras para fixação. Como resultado, a pesquisa evidencia a importância de identificar as características e propriedades dos blocos de micélio, além de incentivar o uso de programas computacionais para o desenvolvimento de geometrias construtivas mais complexas.

Os blocos de micélio têm sido usados para diversas aplicações, desde embalagens, divisórias para isolamento, até utensílios e móveis (Alemu; Tafesse; Deressa, 2022). Outros estudos exploram a viabilidade e o potencial do uso de micélio para impressão 3D, considerando o cultivo das espécies *Pleurotus ostreatus* (Mohseni et al., 2023; Ilgun e Schmickl, 2023; Jauk et al., 2022; Modanloo et al., 2021) e *Ganoderma lucidum* (Mohseni et al., 2023) em substratos que mostram-se promissores, utilizando resíduos de papel, papelão e argila.

Nesse contexto, o micélio oferece boas propriedades térmicas e tem potencial para substituir produtos sintéticos tradicionais derivados do petróleo, como o poliestireno expandido (EPS), que é amplamente utilizado, mesmo sendo classificado como cancerígeno humano e não biodegradável (Bruscato *et al.*, 2019).

Além disso, o micélio também possui bom desempenho acústico de baixa frequência. Os melhores substratos, encontrados na revisão, para absorção acústica foram a palha de arroz (52 dBa), o cânhamo (53 dBa), o linho (53,5 dBa) e a fibra do cereal sorgo (54 dBa). Esta condição ocorre dada a natureza porosa e fibrosa dos compósitos de micélio, sabendo que materiais menos densos absorvem melhor sons de baixa frequência, enquanto materiais mais densos são melhores para frequências mais altas (Jones et al., 2020). No entanto, ainda não são capazes de substituir materiais estruturais

convencionais, sendo adequado para outros usos, como em embalagens, forramentos, painéis isolantes, divisórias, enchimento de portas ou espumas (Lingam *et al.*, 2023).

A interação entre o micélio e outros materiais naturais também é pauta na literatura recente. Kaiser et al. (2023) exploram o potencial da fabricação de biohíbridos têxteis visando a aplicação na construção civil, enquanto Ghazvinian e Gürsoy (2022) apostam no reaproveitamento de resíduos de serragem e palha junto ao micélio como uma solução para elementos de construção leves. Além disso, existem pesquisas que abordam o uso de nanofibras como forma de favorecer mecanicamente o biomaterial (Trabelsi *et al*., 2021) e o potencial do micélio em construções fora da Terra (Brandić Lipińska *et al*., 2022).

Apesar do micélio ser uma promessa no contexto das construções sustentáveis, existem obstáculos relacionados a escabilidade, disponibilidade de matérias-prima (a depender do substrato escolhido), durabilidade das construções e segurança, no tocante a obtenção de padrões de desempenho (Volk *et al.,* 2024). Nesse sentido, o aumento de pesquisas e testes com o material são essenciais para que exista uma adesão da indústria e do mercado.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou um panorama geral dos desafios e oportunidades a partir do uso do micélio no setor de AEC, no contexto das construções sustentáveis. Em geral, os blocos à base de micélio oferecem boas propriedades térmicas e acústicas, atuando como um bom isolante térmico, além disso, são totalmente biodegradáveis, ou seja, contribuem com o modelo de economia circular.

Por meio da revisão, foi possível observar que as espécies fúngicas *Pleurotus ostreatus, Ganoderma lucidum* e *Trametes versicolor* foram as mais utilizadas para aplicações no campo da arquitetura nos últimos cinco anos, representando respectivamente 36%, 28% e 20% dos 25 artigos selecionados. Os substratos mais utilizados nos estudos são a palha e o cânhamo, no entanto, existe uma variedade de resíduos agrícolas e da indústria têxtil que também foram explorados. Salienta-se que a escolha desse substrato dependerá da região onde ele será coletado, ou seja, é importante utilizar materiais que sejam produzidos em larga escala localmente, dando um novo destino para os resíduos gerados.

Como demonstrado, os materiais não-convencionais feitos a partir do micélio podem ter diversas aplicações dentro do campo da arquitetura. O bloco de micélio foi o elemento mais produzido de acordo com a revisão, mas também existem estudos que avaliaram as misturas para impressão 3D, bioconcretos ou compósitos com nanomateriais, que atribuem diferentes propriedades ao material. Apesar dos materiais à base de micélio já terem sido aplicados em escala comercial, como em pavilhões e exposições, ainda existem limitações e lacunas de conhecimento em relação à durabilidade e resistência desses materiais, especialmente quanto a produção em larga escala, que podem ser alvo de futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

Abdelhady, O., Spyridonos, E., Dahy, H. (2023) Bio-Modules: Mycelium-Based Composites Forming a Modular Interlocking System through a Computational Design towards Sustainable Architecture. Designs, v. 7, n. 1, p. 20. https://doi.org/10.3390/designs7010020

Abhijith, R., Ashok, A., Rejeesh, C.R. (2018) Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 1, p. 2139-2145. http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211

Adamatzky, A., Gandia, A. (2022) Living mycelium composites discern weights via patterns of electrical activity. Journal of Bioresources and Bioproducts, v. 7, n. 1, p. 26-32. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.09.003

Alemu, D., Tafesse, M., Deressa, Y. G. (2022) Production of Mycoblock from the Mycelium of the Fungus Pleurotus ostreatus for Use as Sustainable Construction Materials. Advances In Materials Science And Engineering, v. 2022, p. 1-12. https://doi.org/10.1155/2022/2876643

Bagheriehnajjar, G., Yousefpour, H., Rahimnejad, M. (2023) Multi-objective optimization of mycelium-based bio-composites based on mechanical and environmental considerations. Construction And Building Materials, v. 407, p. 133346. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133346

Brandić Lipińska, M., Cadogan, D., Head, J., Dade-robertson, M., Paulino-lima, I. G., Liu, C., Morrow, R., Senesky, D. G., Theodoridou, M. (2022) Biological growth as an alternative approach to on and off-Earth construction. Frontiers In Built Environment, v. 8. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.965145

BRASIL. Nações Unidas. População mundial chegará a 8 bilhões em novembro de 2022. (2022) https://brasil.un.org/pt-br/189756-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-chegar%C3%A1-8-bilh%C3%B5es-em-novembro-de-2022

Bruscato, C., Malvessi, E., Brandalise, R.N., Camassola, M. (2019) High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust: Sustainable technology for waste reduction. Journal Of Cleaner Production. 234: 225-232. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.150

Elsacker, E, Søndergaard, A., Van, W. A., Peeters, E., Laet, L. (2021) Growing living and multifunctional mycelium composites for large-scale formwork applications using robotic abrasive wire-cutting. Construction And Building Materials, 283:122732. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122732

Ghazvinian, A., Gürsoy, B. (2022) Mycelium-Based Composite Graded Materials: Assessing the Effects of Time and Substrate Mixture on Mechanical Properties. Biomimetics, v. 7, n. 2, p. 48. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020048

Ilgun, A., Schmickl, T. (2022) Mycelial Beehives of HEROPOLIS: Designing and Building Therapeutic Inner Nest Environments for Honeybees. Biomimetics, v. 7, n. 2, p. 75. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020075

Jauk, J., Gosch, L., Vałatko, H., Christian, I., Klaus, A., Stavric, M. (2022) MyCera: Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures. International Journal Of Architectural Computing, v. 20, n. 1, p. 31-40. https://doi.org/10.1177/14780771221082248

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., John, S. (2020) Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: a critical review. Materials & Design, v. 187, p. 108397. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397

Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., John, S. (2018) Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. Fire And Materials, v. 42, n. 7, p. 816-825. https://doi.org/10.1002/fam.2637

Kaiser, R., Bridgens, B., Elsacker, E., Scott, J. (2023) BioKnit: development of mycelium paste for use with permanent textile formwork. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 11. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1229693

Koh, C.H., Gauvin, F., Schollbach, K., Brouwers, H.J.H.(2022) Investigation of material characteristics and hygrothermal performances of different bio-based insulation composites. Construction And Building Materials, 346:128440. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128440

Lingam, D., Narayan, S., Mamun, K., Charan, D. (2023) Engineered mycelium-based composite materials: comprehensive study of various properties and applications. Construction And Building Materials, 391:131841. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131841

Manan, S., Ullah, M. W., Ul-islam, M., Atta, O. M., Yang, G. (2021) Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. Journal of Bioresources And Bioproducts, v. 6, n. 1, p. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001

Mohseni, A., Vieira, F. R., Pecchia, J. A., Gürsoy, B. (2023) Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination. Biomimetics, v. 8, n. 2, p. 257. https://doi.org/10.3390/biomimetics8020257

Modanloo, B., Ghazvinian, A., Matini, M., Andaroodi, E. (2021) Implementation of Additive Manufacturing and Bio-Welding of Mycelium-Based Composites. Biomimetics, v. 6, n. 4, p. 68. https://doi.org/10.3390/biomimetics6040068

Ongpeng, J. M. C., Inciong, E., Sendo, V., Soliman, C., Siggaoat, A. (2020) Using Waste in Producing Bio-Composite Mycelium Bricks. Applied Sciences. 10:5303. https://doi.org/10.3390/app10155303

Özdemir, E., Saeidi, N., Javadian, A., Rossi, A., Nolte, N., Ren, S., Dwan, A., Acosta, I., Hebel, D. E., Wurm, J. (2022) Wood-Veneer-Reinforced Mycelium Composites for Sustainable Building Components. Biomimetics, v. 7, n. 2, p. 39. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020039

Răut, I., Călin, M., Vuluga, Z., Oancea, F., Paceagiu, J., Radu, N., Doni, M., Alexandrescu, E., Purcar, V., Gurban, A. M. (2021) Fungal Based Biopolymer Composites for Construction Materials. Materials, v. 14, n. 11, p. 2906. https://doi.org/10.3390/ma14112906

Rezende, J. B., Wekhaizer, C. Q., Vale, J. L. R. V., de Paula, J. T. da R., de Souza, R. A. S., SILVA, L. K. S., VERTICCHIO, V. J. O. (2021) Biofabricação digital para a produção de micélios na arquitetura e design. Encontro Latino Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/2525

Saez, D., Grizmann, D., Trautz, M., Werner, A. (2022) Exploring the Binding Capacity of Mycelium and Wood-Based Composites for Use in Construction. Biomimetics, v. 7, n. 2, p. 78. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020078

Sharma, R., Sumbria, R. (2022) Mycelium bricks and composites for sustainable construction industry: a state-of-the-art review. Innovative Infrastructure Solutions, v. 7, n. 5. https://doi.org/10.1007/s41062-022-00903-y

Souza, Eduardo, 2020. Figura 1. Hy-Fi Tower. https://www.archdaily.com.br/br/948979/edificios-de-cogumelos-as-possibilidades-do-uso-do-micelio-na-arquitetura?ad_medium=gallery

Trabelsi, M., Mamun, A., Klöcker, M., Brockhagen, B., Kinzel, F., Kapanadze, D., Sabantina, L. (2021) Polyacrylonitrile (PAN) nanofiber mats for mushroom mycelium growth investigations and formation of mycelium-reinforced nanocomposites. Journal Of Engineered Fibers And Fabrics, v. 16, p. 155892502110379. https://doi.org/10.1177/15589250211037982

Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D.E., Schultmann, F. (2024) Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. Resources, Conservation And Recycling, 205:107579. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579

Zhang, M., Zhang, Z., Zhang, R., Peng, Y., Wang, M., Cao, J. (2023) Lightweight, thermal insulation, hydrophobic mycelium composites with hierarchical porous structure: design, manufacture and applications. Composites Part B: Engineering, 266:111003. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111003

Zhang, X., Hu, J., Fan, X., Yu, X. (2022) Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials. Journal Of Cleaner Production, 342:130784. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130784

Zhang, X., Fan, X., Han, C., Li, Y., Price, E., Wnek, G., Liao, Y. T., Yu, X. (2021) Novel strategies to grow natural fibers with improved thermal stability and fire resistance. Journal Of Cleaner Production, v. 320, p. 128729. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128729

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PERMEÁVEIS: UMA PERSPETIVA SUSTENTÁVEL INTEGRANDO A REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS E A CARBONATAÇÃO ACELERADA

Dina Barata Pinto[a], João Castro-Gomes[b]

[a] C-MADE, Centre of Materials and Building Technologies, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro. 6201-001 Covilhã, dina.gabriela.pinto@ubi.pt [b] castro.gomes@ubi.pt

RESUMO

Este trabalho explora o potencial desenvolvimento de materiais de construção permeáveis para revestimentos de pavimentos, obtidos por carbonatação acelerada de resíduos industriais. Esses materiais de revestimento contribuem para a economia circular e mitigam os efeitos de chuvas intensas no atual contexto climático. O estudo envolveu a preparação de argamassas porosas e permeáveis a partir de escória de forno de arco elétrico (EAF), cimento Portland e resíduos de centrais de energia de biomassa, com granulometria fina inferior a 125 µm. Foi usada areia de rio com diâmetro de 1,6 mm como agregado. As argamassas foram produzidas com proporção em massa de 1:3 e relação água/sólido de 8%. Os corpos de prova foram moldados e compactados com força de 5 toneladas por 60 segundos, e submetidos a carbonatação acelerada em autoclave a 0,8 bar e 50°C por 24 horas. Após a cura, os corpos foram testados quanto à resistência à compressão, análise termogravimétrica, microporosimetria de mercúrio, porosidade e permeabilidade. Os ensaios mostraram que esses materiais têm boa resistência à compressão, porosidade e permeabilidade adequadas para áreas urbanas. Com a carbonatação acelerada, é possível criar revestimentos que apoiam a economia circular, mitigam chuvas intensas e promovem a sustentabilidade na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE

Carbonatação acelerada, Materiais de Construção Sustentáveis, Permeabilidade, Reutilização de Resíduos, Economia Circular, Inundações Urbanas

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o crescimento urbano e o aumento populacional têm reduzido os espaços verdes e habitats naturais devido à construção de residências e pavimentos convencionais. Isso impede a absorção natural da água da chuva pelo solo, levando a inundações urbanas em áreas de menor altitude. A falta de infraestrutura adequada para drenagem pluvial, junto com o tratamento insuficiente das águas e sua mistura com esgotos, resulta na poluição de cursos d'água de água doce (Teymouri et al. 2020).

O pavimento permeável é uma alternativa sustentável aos revestimentos convencionais. Ele utiliza uma camada de argamassa coberta por agregados grossos, criando uma estrutura porosa semelhante a uma colmeia, o que facilita a permeabilidade da água (He, Jiao, and Li 2023; Yan et al. 2023). A pavimentação permeável desempenha um papel crucial na implementação de "cidades-esponja", absorvendo, armazenando, filtrando, purificando e gerindo a água da chuva nas vias urbanas. Isso

ajuda a reabastecer os lençóis freáticos e prevenir inundações de forma eficaz (Chandrappa and Biligiri 2016; Guan, Wang, and Xiao 2021). Além disso, o pavimento permeável contribui para a dissipação de calor, diminui as temperaturas da superfície e reduz a capacidade de reflexão da radiação solar nas superfícies apresentando assim uma solução praticável para o problema das altas temperaturas em regiões urbana (Luck et al. 2008; Yap et al. 2018). Devido à sua estrutura porosa, este tipo de revestimentos, não é tão resistente quanto o pavimento rígido e flexível tradicional, sendo mais adequado para áreas como calçadas, pavês praças e estacionamentos, onde as cargas são leves. A pesquisa atual foca-se em desenvolver soluções de revestimento com melhores propriedades mecânicas e de permeabilidade, estudando materiais porosos obtidos por combinação de resíduos.

Através da promoção da iniciativa da Comissão Europeia, (Anon 2019) com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica até 2050, é crucial concentrar-se em soluções para a redução de emissões de carbono e enfrentar as mudanças climáticas. Dessa maneira, procura-se atingir o centro focal para um desenvolvimento geral eficiente em termos energéticos e ecologicamente sustentável (Wang and Dou 2023). O cimento Portland, como componente essencial na indústria da construção, está associado à emissão de dióxido de carbono tanto durante sua produção quanto utilização. A indústria cimenteira é responsável por 7% das emissões globais totais de dióxido de carbono (Gao et al. 2023). Para mitigar essas emissões, uma abordagem promissora é o uso de adições que substituem parcialmente o cimento, como a escória de alto forno e a biomassa, reduzindo assim o consumo de cimento.

A utilização de escória proveniente de siderúrgicas e outras formas de escória industrial com composição química adequada, pode capturar carbono da atmosfera da mesma maneira que ocorre na formação de rochas sedimentares ou calcárias. (Anon 2019). Esse processo é conhecido como ciclo biogeoquímico "carbonato-silicato". Numa escala geológica, o dióxido de carbono na atmosfera, combinado com a água, forma ácido carbónico, que por sua vez reage com o cálcio e magnésio presentes na crosta terrestre para formar carbonatos que são arrastados devido a processos de erosão e se acumulam nos oceanos ao longo de milhares de anos, formando rochas sedimentares calcárias (rochas carbonatadas).

A formação de carbonatos nos resíduos da indústria siderúrgica e de fundição pode, portanto, remover dióxido de carbono da atmosfera a um custo potencialmente baixo, especialmente se a deposição de resíduos for feita de maneira otimizada (Mayes et al. 2018). Esta abordagem não só contribui para a redução das emissões de carbono, mas também promove a reutilização de resíduos. A reação química de carbonatação ocorre entre diferentes silicatos de cálcio e magnésio e CO_2, produzindo principalmente carbonatos que possuem propriedades ligantes. Essa reação também fornece propriedades mecânicas e durabilidade aos materiais, enquanto armazena e utiliza o CO_2. Os materiais resultantes dessa reação, além da capacidade de absorção de CO_2, apresentam propriedades de endurecimento mecânico semelhantes às rochas (Ashraf 2016). O processo de reação da escória inclui três etapas principais. Primeiramente, o CO_2 difunde e dissolve-se na solução porosa para formar ácido carbónico (H_2CO_3). O ácido H_2CO_3 ioniza-se em bicarbonatoHCO_3^-, carbonato CO_3^{2-} e iões de hidrogénio H^+. Finalmente, ocorre a reação do CO_3^{2-} com os iões de Ca^{2+} e Mg^{2+} formando-se carbonatos de cálcio ($CaCO_3$) e magnésio ($MgCO_3$). A Figura 1, ilustra as reações químicas dos principais componentes da escória com CO_2, que resultam em $CaCO_3$ (carbonato de cálcio) e $MgCO_3$ (carbonato de magnésio).

Resíduo de Escória de Alto Forno + CO_2

$Ca^{2+} + CO_3^{2+} \rightarrow CaCO_3$

$Mg_2^{+} + CO_3^{2+} \rightarrow MgCO_3$

Figura 1 - Reações químicas da escória com CO_2

A Biomassa é um resíduo industrial gerado pela produção calor e/ou eletricidade através da sua combustão, e também pela conversão da biomassa em combustíveis. De acordo com o Decreto-Lei n° 117/2010, a bioenergia é considerada toda energia obtida com a transformação da biomassa. Além disso, a bioenergia é reconhecida como uma fonte de energia renovável e é considerada neutra em emissões de CO_2 (Grünhäuser Soares and Castro-Gomes 2022).

Este trabalho explora o desenvolvimento de materiais de construção permeáveis, visando aplicações em revestimentos de pavimentos, através da carbonatação acelerada de resíduos industriais. Utilizando escória de forno de arco elétrico (EAF) e resíduos de biomassa, foram criadas argamassas porosas e permeáveis, que foram comparadas com argamassas de cimento. A combinação desses materiais, submetidos a uma cura por carbonatação acelerada, resultou em revestimentos que contribuem para a economia circular e mitigam os efeitos das chuvas intensas, promovendo a sustentabilidade na construção civil. Os resultados dos ensaios demonstraram que esses materiais apresentam boa resistência à compressão, porosidade e permeabilidade adequadas para o uso em áreas urbanas. Além disso, a porosidade dos materiais desenvolvidos permite o crescimento de vegetação, contribuindo para a criação de áreas verdes urbanas que ajudam na regulação da temperatura, redução do escoamento superficial e aumento da biodiversidade. Este aspecto é especialmente relevante no contexto de desenvolvimento sustentável e na implementação de soluções baseadas na natureza para enfrentar as mudanças climáticas (Pinto 2022).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

No estudo experimental, foram preparadas argamassas utilizando agregados de diferentes granulometrias obtidos da escória de forno de arco elétrico (EAF). Isso incluiu um agregado de granulometria fina, com diâmetro inferior a 125 µm, e outro de granulometria mais grossa, com diâmetro variando de 1,0 mm a 1,6 mm. A proporção em massa utilizada foi de 1:3, com uma relação água/sólido de 8% em relação ao componente de granulometria mais fina. Além disso, foi preparada uma mistura padrão inicial, utilizando cimento Portland como ligante, seguindo a mesma proporção em massa de 1:3 e uma relação água/sólido de 8% em relação ao componente de granulometria mais fina.

O resíduo de escória de alto forno, designado por EAF, utilizado neste estudo, trata-se de um resíduo da Harsco Portugal, empresa que se dedica à prestação de serviços e comercialização de ASIC – Agregado Inerte Siderúrgico Para Construção – PRODUTO CERTIFICADO CE NP EN1324. O material foi obtido junto à central de resíduos, Aldeia de Paio Pires, Seixal, Portugal e processado (peneirado ou peneirado e moído) para obtenção de diferentes granulometrias. Assim, foram obtidas partículas com diâmetro mínimo inferior a 125 µm. O resíduo de biomassa, designado por BIOM utilizado neste estudo, trata-se de areia de biomassa, a qual foi obtida junto à Central de Biomassa do Fundão, Unipessoal LDA, Fundão, Portugal. O material recolhido foi utilizado após ser processado (peneirado ou peneirado e moído) para obtenção de diferentes granulometrias. Assim, foram obtidas partículas com diâmetro mínimo inferior a 125 µm.

Foi utilizado ligante de Cimento Portland, designado por PC, www.cimpor.com, proveniente da empresa Cimpor em Portugal. Como agregado neste estudo foi utilizado, Areia de Rio, designado por Sand, www.tabalsepor.com, in Portugal. Inicialmente, o material foi seco numa estufa,

posteriormente desagregado e peneirado. A Figura 2 apresenta a curva granulométrica da areia de rio utilizada.

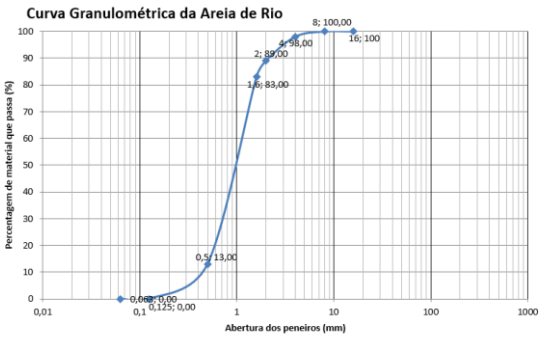


Figura 2 – Curva granulométrica de Areia de Rio

As Quadros 1 e 2 apresentam os dados da composição química dos ligantes em percentagem. A análise desses quadros revela um teor elevado de Ca e Mg, que são componentes responsáveis pelo efeito de uma reação de carbonatação.

Quadro 1 - Composição Química de ligantes (%)

Composição química (%)	Oxigénio	Sódio	Magnésio	Alumínio	Silício	Potássio	Cálcio	Titânio	Crômio	Manganês	Ferro
EAFS	34,92	-	2,45	6,34	6,5	-	24,47	-	1,86	3,11	20,35
Biomassa	42.3	1.0	1.2	5.9	17.5	2.5	2.5	0.2	-	1.2	1.7

Quadro 2 - Composição de óxidos de ligantes (%)

Composição dos óxidos dos ligantes (%)		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	Fe_2O_3	ZnO
EAF		-	4,06	11,98	13,9	-	-	-	34,23	-	2,72	4,01	29,09	-
PC		-	2,08	2,79	11,13	-	3,45	-	77,96	-	-	-	2,59	-

Foi também utilizado um picnómetro de hélio da Micromeritics, modelo AccuPyc1340, para medir a densidade de cada matéria-prima. Estes resultados são apresentados na Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedade física: densidade (g/cm^3)

Propriedade física	Matérias-primas			
	Ligantes			Agregados
	Escória de Alto Forno	Cimento Portland	Biomassa	Areia de Rio
Densidade do pó a granel (g/cm3)	3,82	3,06	2,70	2,64

2.2 PROPORÇÕES DA MISTURA

O estudo experimental, foram preparadas argamassas utilizando agregados de escória de forno de arco elétrico (EAF) de diferentes granulometrias: fina (diâmetro < 125 µm) e grossa (diâmetro de 1,0 mm a 1,6 mm). A proporção em massa foi de 1:3, com uma relação água/sólido de 8% para os componentes finos. Além disso, foi criada uma mistura padrão utilizando cimento Portland como ligante, seguindo a mesma proporção de 1:3 e relação água/sólido de 8%. O Quadro 4 indica as dosagens em (kg/m^3) presentes em cada mistura por volume de corpo de prova ($V_{C.P.}$).

Quadro 4 - Mistura Número de combinação

Mistura Número de combinação	1	2	3
Cimento Portland (kg/m3) x $V_{C.P.}$	45290	-	-
Escória de Alto Forno (kg/m3) x $V_{C.P.}$	-	55680	4476
Biomassa (kg/m3) x $V_{C.P.}$	-	-	7910
Agregado (Areia de Rio) (kg/m3) x $V_{C.P.}$	79300	78010	78390
Água (kg/m3) x $V_{C.P.}$	997	10700	10480

Note-se que a água utilizada nas misturas 2 e 3, submetidas a carbonatação acelerada, não fica incorporada nos corpos de prova após o processo de carbonatação, podendo ser recuperada.

2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os corpos de prova foram moldados e compactados com uma força de 16 toneladas/cm² durante 60 segundos, utilizando moldes cúbicos e cilíndricos. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a uma câmara de carbonatação acelerada, com uma pressão de CO_2 de 0,8 bar e 50 °C por um período de 24 horas.

Foram efetuados os seguintes ensaios: resistência à compressão, análise termogravimétrica (TGA), microporosimetria de mercúrio (MIP), Absorção de água por imersão e Permeabilidade.

2.3.1 Resistência à compressão

Os testes de resistência à compressão foram conduzidos 24 horas após o período de secagem pós-cura. Nestes ensaios, os corpos de prova foram avaliados por meio de carregamento uniaxial em 3 corpos de prova para cada mistura estudada. Para a realização dos testes, foi utilizado um equipamento ADR Touch 3000 BS EN (ELE International) com leitura digital, configurado para aplicar uma taxa de carregamento constante de 1,35 kN/s. É de referir que, a compressão foi aplicada na superfície superior, seguindo a mesma direção da força empregada no processo de moldagem por compactação.

2.3.2 Análise termogravimétrica (TG-DTG)

A análise termogravimétrica foi utilizada para avaliar a composição dos materiais após a cura por carbonatação acelerada. A determinação da perda de massa foi realizada com um equipamento SDT Q-50 da TA Instrument. O procedimento laboratorial foi conduzido com uma taxa de aquecimento de

20 °C/min a partir da temperatura ambiente (20 ± 5 °C) até atingir 1000 °C. Foi utilizado azoto como gás de purga e foram utilizados cadinhos de platina. As amostras dos materiais consistiram em cerca de 5,0 mg, as quais foram pulverizadas com uma haste de cerâmica e/ou peneiradas para obter partículas com diâmetro igual ou inferior a 63 µm (Humbert 2020).

2.3.3 Ensaio de Microporosímetro de Mercúrio (MIP)

O estudo de microporosímetro de Mercúrio (MIP) foi utilizado para caracterizar a estrutura porosa dos materiais carbonatados. O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) foi conduzido utilizando o equipamento AutoPore IV 9500 V1.07 (Microporometrics), com pressões máximas e mínimas aplicadas de 32990 psia e 0,53 psia, respectivamente, o que corresponde a um tamanho mínimo de poro de 5 µm, com um tamanho máximo de poro de 345 µm. O ângulo de contato do mercúrio empregado neste ensaio foi de 130°. Para o ensaio, foram utilizados fragmentos com uma massa compreendida entre 1,47g a 2,32 g dos corpos de prova das quatro composições de misturas estudadas. Esses fragmentos foram armazenados em um exsicador de vidro contendo sílica gel por um período de 7 dias, garantindo assim a remoção da humidade das amostras e a eficácia do ensaio.

2.3.4 Absorção de água por imersão e Permeabilidade

A determinação da absorção de água consistiu em medir a massa dos corpos de prova, antes e após a etapa de imersão num recipiente contendo água. A absorção de água por imersão consistiu em submergir cada corpo de prova e registar as pesagens em intervalos de tempo de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 4 horas e 24 horas, até a estabilização, ou seja, até atingir a máxima absorção de água. Foram realizados três ciclos de pesagens, e a média dos resultados de cada ciclo foi considerada. O índice de vazios (Shen et al. 2020; Yan et al. 2023), foi determinado utilizando o método do volume, com a superfície do corpo de prova. As dimensões (comprimento, largura, altura e volume) dos corpos de prova foram medidas e registadas para futuros cálculos. Em seguida, os corpos de prova das combinações foram submersos em água por 24 horas, e a massa após imersão foi registada como M1. Posteriormente, os corpos de prova foram removidos e secos num forno a 60 °C por 24 horas, com os dados de peso registados como M2. A fração total de vazios e a fração efetiva de vazios dos corpos de prova foram calculadas de acordo com as fórmulas das Equações (1) e (2):

$$\eta_o = \left(1 - \frac{p_s}{p_t}\right) \times 100, \text{(Eq. 1)}$$

$$\eta_e = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{\text{v}.p_w}\right) \times 100, \text{(Eq. 2)}$$

Onde: η_o é o índice de vazios total do corpo de prova (%), η_o é o índice de vazios efetivo do corpo de prova(%), ps é a densidade bruta do corpo de prova poroso do estudo (kg/m^3), pt é a densidade teórica do corpo de prova poroso do estudo (kg/m^3), M1 é a massa da água e do corpo de prova após a imersão do mesmo em água por 24 horas (kg), M2 é o peso do corpo de prova após a secagem de 24 horas (kg), pw é a densidade da água no experimento (kg/m^3), V é o volume médio do corpo de prova (m^3).

A densidade teórica (pt) dos materiais deste estudo foi calculada pela fórmula Eq (3):

$$p_t = \frac{m_g + m_c + m_w}{\frac{m_g}{p_g} + \frac{m_c}{p_c} + \frac{m_w}{p_w}}, \text{ (Eq. 3)}$$

Onde: m_g, m_c e m_w representam a massa dos agregados, dos ligantes e de água, respetivamente (kg), enquanto p_g, p_c e p_w são as densidades aparentes dos agregados, dos ligantes e de água, respetivamente (kg/m^3).

O estudo de permeabilidade vertical para os corpos de prova, foi desenvolvido de acordo com a lei de H. Darcy (Shen et al. 2020).O coeficiente de permeabilidade dos corpos em estudo foi calculado de acordo com a EN 12697-19 e NLT 327, pela fórmula:

$$K = \frac{s \times L}{S \times \Delta t} \times ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right), \ (Eq.4)$$(Afonso et al. 2019).

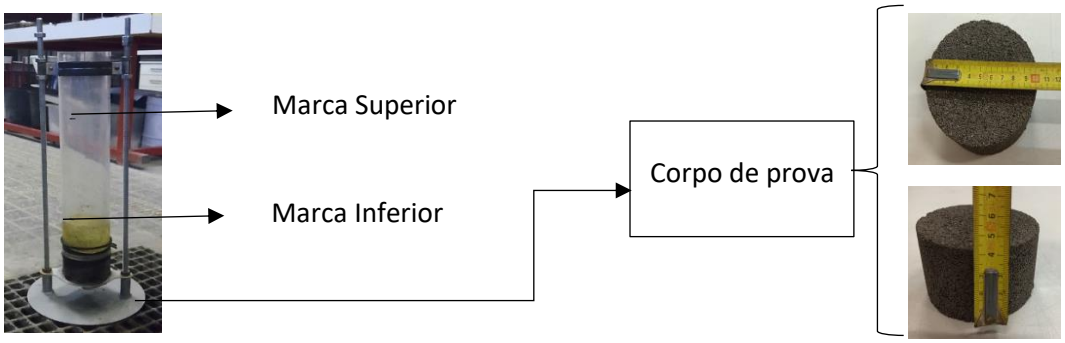


Figura 3 - Corpos de prova, medição do coeficiente de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade visa determinar a capacidade de permeabilidade das misturas, utilizando um permeâmetro LCS. Esse procedimento permite o estudo tanto da permeabilidade vertical quanto horizontal dessas misturas. Para realizar essa análise em laboratório, foi necessário adaptar o permeâmetro LCS convencional, foi feita uma modificação para tornar o permeâmetro de carga constante similar ao sugerido pela norma espanhola NLT-327/00: "Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes com o permeâmetro LCS (CEDEX, 2000)". Essa adaptação específica para o caso em questão é ilustrada na Figura 3 (Afonso et al. 2019). O procedimento para determinar a permeabilidade vertical envolve inserir o corpo de prova em um tubo de borracha para evitar que a água passe pelas paredes do mesmo, permitindo assim apenas a circulação vertical da água. A manga de borracha que envolve o corpo de prova precisa ser adequadamente ajustada ao tubo de acrílico que constitui o permeâmetro. Para garantir que não ocorra vazamento de água pelo interior da manga, são colocados dois anéis de vedação em torno dela para aplicar pressão, além de uma braçadeira na junção entre o corpo de prova e o permeâmetro, conforme mostrado na Figura 3.

3 RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Figura 4, verifica-se uma comparação da resistência à compressão entre as diferentes composições de mistura deste estudo. Todos os corpos de prova, alcançaram uma resistência à compressão superior a 9 MPa. A resistência à compressão média da combinação 1, amostra padrão, permite verificar que as condições de cura por carbonatação acelerada foram satisfatórias. Além disso, os resultados do desvio padrão dos ensaios de compressão indicam um alto grau de homogeneidade nos materiais deste estudo, sugerindo que a metodologia aplicada para a preparação e cura dos corpos de prova foi eficaz e consistente.

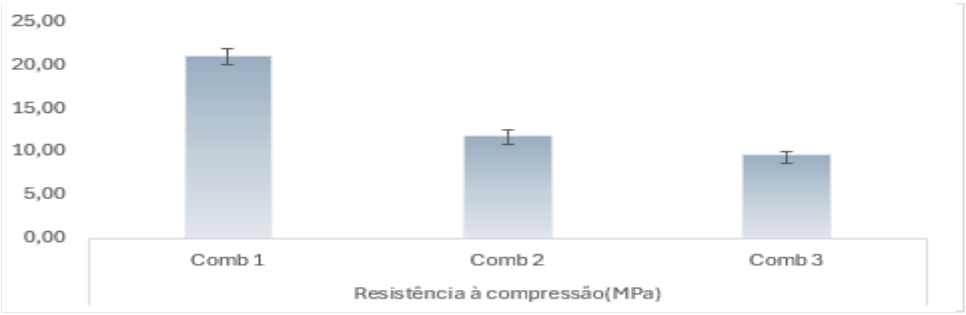


Figura 4 - Resultados do ensaio de Resistência à compressão

3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG-DTG)

Os resultados dos ensaios TG, apresentados na Figura 5, demonstram que a perda de massa das composições estudadas ocorreu de forma gradual. A maior taxa de perda de massa foi observada na faixa de temperatura entre 450 – 700 °C. Em particular, a combinação padrão registou a maior perda de massa, atingindo 19 %, enquanto as combinações 2 e 3 perderam 7 %, 6 % da massa inicial, respetivamente. Essa perda de massa está em conformidade com os resultados obtidos nos testes de resistência à compressão.

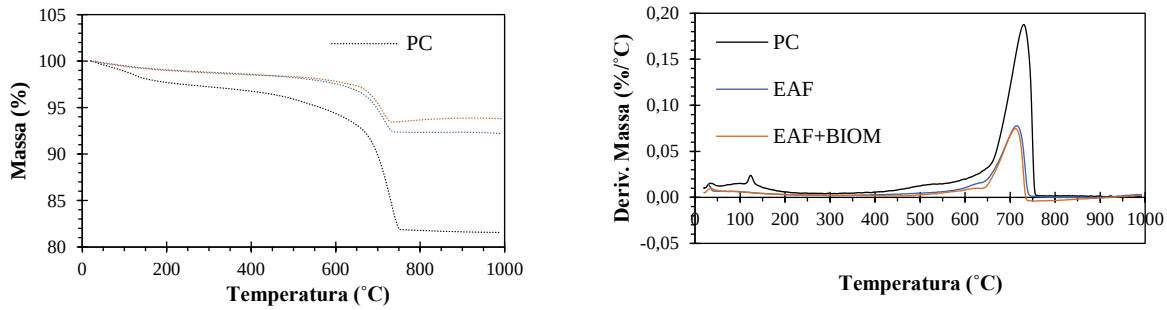


Figura 5 - Resultados do ensaio TG-DTG: perda de massa das composições e TG-DTG: derivada de massa em função da temperatura

Ao analisar as curvas DTG (Figura 5), é evidente que todas as composições das misturas exibem dois pequenos picos iniciais distintos (86 – 130 °C), associados à desidratação da água ligada aos HMCs (Humbert 2020). Além disso, um pico bem definido entre as faixas dos 650 – 678 °C, relacionado com o conteúdo de $CaCO_3$ e carbonatos amorfos (Humbert 2020) (Grünhäuser Soares and Castro-Gomes 2022) presentes na areia de biomassa e escória de alto forno, e cimento Portland.

A combinação 1, combinação constituída por cimento $CaCO_3$ teve um maior percentual de perda de massa relativamente a esse intervalo. Comparando a taxa de CO_2 adsorvida, as combinações 2 e 3, que utilizam resíduos como ligantes, apresentam valores de absorção de CO_2, muito semelhantes. Isso indica que os materiais presentes nessas combinações, são bons potenciais substitutos do cimento Portland tradicional, contribuindo para a redução da pegada de carbono na indústria de materiais de construção.

A perda de massa observada está em conformidade com os resultados obtidos nos testes de resistência à compressão. A maior perda de massa na combinação padrão, que também apresentou a

maior resistência à compressão, sugere a formação de uma matriz mais densa e resistente. Por outro lado, as menores perdas de massa nas combinações 2 e 3, associadas ao uso de resíduos, indicam uma menor densidade de matriz, mas ainda com resistência significativa devido à formação de carbonatos que melhoram as propriedades mecânicas dos materiais.

3.3 ENSAIO DE MICROPOROSÍMETRO DE MERCÚRIO (MIP)

Neste estudo, a porosidade do ligante presente nas misturas de argamassa curadas por carbonatação acelerada foi avaliada por meio de ensaios de MIP. Portanto, este e outros parâmetros do estudo estão resumidamente apresentados na Quadro 5 (Grünhäuser Soares, Castro-Gomes, and Magrinho 2023). Os gráficos na figura 6 relacionam o tamanho dos poros. No eixo das ordenadas está a capacidade de intrusão de mercúrio e no eixo das abcissas o tamanho dos poros.

Quadro 5 - Parâmetros observados no ensaio MIP

Mistura - Combinação	1	2	3
Porosidade (%)	0,5331	24,6895	25,3854
Densidade Aparente (g/cm^3)	0,1438	2,3463	2,4044
Massa específica (g/cm^3)	0,1141	2,8429	2,8179
Diâmetro médio do poro (µm)	18,8147	1,3806	9,7685
Mesoporos (0.002 – 0.05 µm) (%)	13,38	9	0,1
Macroporos (0.05 µm – 10 µm) (%)	4,55	33,38	8,64
Vazios de ar / rachaduras (> 10 µm) (%)	82,07	58,04	91,36

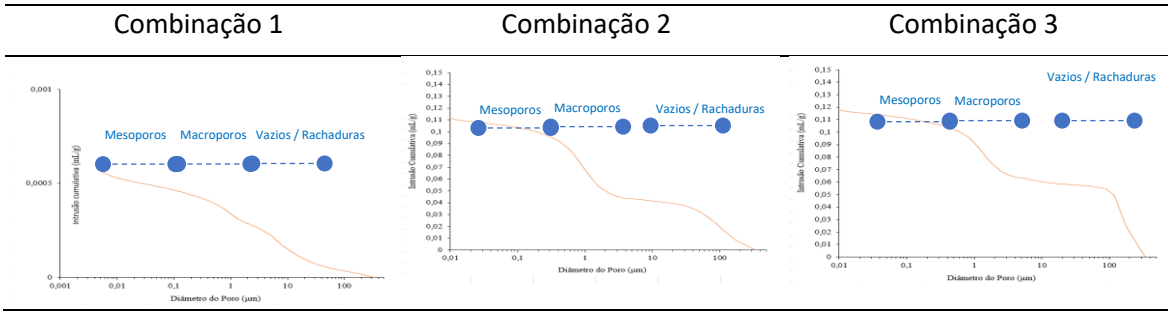


Figura 6 - Gráficos Diâmetro do poro VS intrusão cumulativa(ml/g) – Combinação 1, 2, 3

Com base nos resultados obtidos nestas amostras, podemos interpretar que a combinação 2 e 3 apresentam maior percentagem de macroporos e vazios.

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA E PERMEABILIDADE

Após a submersão de cada corpo de prova, de cada combinação, em cada ciclo foi possível interpretar a absorção de água de cada combinação. Segundo o gráfico da figura 7, as combinações com ligantes de resíduos (escória de alto forno e escória de alto forno com biomassa) têm maior capacidade de absorção de água. O índice de vazios foi determinado pelo método do volume, permitindo calcular a fração total e efetiva de vazios dos corpos de prova com as fórmulas (1) e (2). A densidade teórica das argamassas porosas foi calculada pela fórmula (3). A permeabilidade, verificada no Quadro 6, mostrou os tempos de escoamento e os coeficientes de permeabilidade das misturas estudadas.

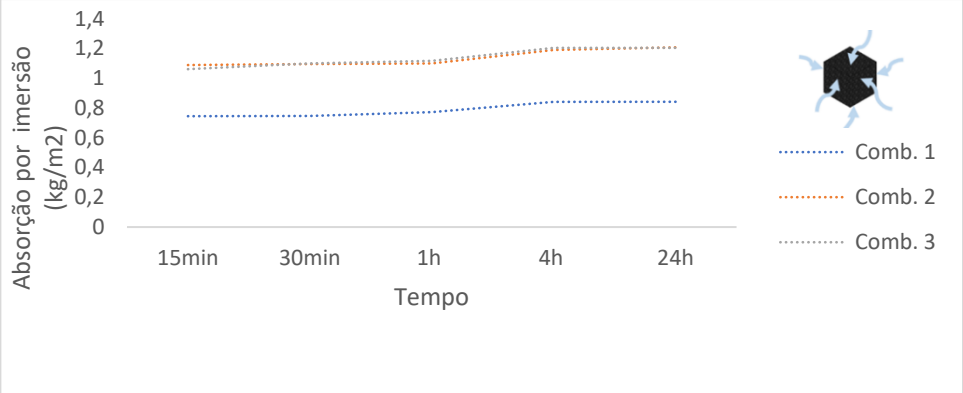


Figura 7 - Determinação da absorção de água

Quadro 6 – Absorção de água e Permeabilidade

Combinações	Absorção (%)	Tempo de escoamento (seg)	h (m)	Coeficiente de permeabilidade (10^{-3} m/seg)
1	10,08	4780	0,04	0,01
2	17,41	71	0,04	0,49
3	20,84	666,8	0,04	0,05

Com base nos resultados obtidos, é possível interpretar que os corpos de prova 2 e 3 absorvem mais água do que o corpo de prova 1, que contém cimento Portland. Em termos de permeabilidade, o corpo de prova 2 foi o mais eficaz, seguido pelo corpo de prova 3 e, por último, pelo corpo de prova 1. O corpo de prova 1 tem menor absorção de água e permeabilidade em comparação às outras combinações. A combinação 2 possui boa absorção de água e permeabilidade, facilitando o escoamento rápido das águas pluviais para os rios. A combinação 3 tem alta absorção, mas menor permeabilidade, funcionando bem como um "efeito esponja" para armazenar água em condições de chuva intensa. Esses resultados indicam que as misturas contendo resíduos de escória e biomassa são eficazes em criar materiais permeáveis, adequados para aplicações em áreas urbanas sujeitas a chuvas intensas, promovendo a sustentabilidade na construção civil.

4 CONCLUSÕES

O estudo apresentado demonstra que a utilização de resíduos industriais, como escória de forno de arco elétrico e biomassa, em combinação com cimento Portland, é uma abordagem viável e sustentável para a criação de materiais de construção permeáveis. A carbonatação acelerada destes materiais resultou em revestimentos com propriedades mecânicas e de permeabilidade adequadas para aplicações urbanas, como calçadas e pavimentos em áreas sujeitas a chuvas intensas.

Os ensaios de resistência à compressão mostraram que as argamassas desenvolvidas são capazes de suportar cargas consideráveis, sendo todas as composições estudadas capazes de alcançar resistência superior a 9 MPa. Além disso, a maior perda de massa observada na análise termogravimétrica está em conformidade com os resultados obtidos nos testes de resistência à compressão.

Os testes de absorção e permeabilidade revelaram que as misturas contendo resíduos de escória e biomassa possuem uma maior capacidade de absorção de água e melhores características de

permeabilidade em comparação ao cimento Portland tradicional. A combinação 2, em particular, destacou-se por sua elevada permeabilidade, facilitando o rápido escoamento da água, enquanto a combinação 3 apresentou um efeito "esponja" eficiente para armazenar água durante chuvas intensas.

Estes resultados indicam que os materiais desenvolvidos não apenas contribuem para a redução da pegada de carbono da indústria da construção, mas também oferecem soluções práticas para problemas urbanos como inundações e ilhas de calor. A implementação de tais materiais pode, portanto, promover cidades mais resilientes e sustentáveis, alinhando-se aos objetivos de neutralidade carbónica e de economia circular da Comissão Europeia.

5 REFERÊNCIAS

Afonso, Marcia Lopes, Tiago Silva Santos, Cristina Sena Fael, and Marisa Dinis-Almeida. 2019. "Hydraulic Conductivity of the Permeable Asphalt Pavement - Laboratory vs in Situ Test." in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 471. Institute of Physics Publishing.

Anon. 2019. "The European Green Deal."

Chandrappa, Anush K., and Krishna Prapoorna Biligiri. 2016. "Comprehensive Investigation of Permeability Characteristics of Pervious Concrete: A Hydrodynamic Approach." *Construction and Building Materials* 123:627–37. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035.

Gao, Xiaoquan, Cuiping Liao, Xiaoling Qi, and Yulong Zhang. 2023. "A Scenario Simulation of Material Substitution in the Cement Industry under the Carbon Neutral Strategy: A Case Study of Guangdong." *Sustainability (Switzerland)* 15(7). doi: 10.3390/su15075736.

Grünhäuser Soares, Erick, and João Castro-Gomes. 2022. "The Role of Biomass Bottom Ash in Carbonated Reactive Magnesia Cement (CRMC) for CO2 Mineralisation." *Journal of Cleaner Production* 380. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135092.

Grünhäuser Soares, Erick, João Castro-Gomes, and Manuel Magrinho. 2023. "The Influence of Casting Static Compaction Pressure on Carbonated Reactive Magnesia Cement (CRMC)-Based Mortars." P. 5 in. MDPI AG.

Guan, Xin, Jiayu Wang, and Feipeng Xiao. 2021. "Sponge City Strategy and Application of Pavement Materials in Sponge City." *Journal of Cleaner Production* 303.

He, Song song, Chu jie Jiao, and Song Li. 2023. "Investigation of Mechanical Strength and Permeability Characteristics of Pervious Concrete Mixed with Coral Aggregate and Seawater." *Construction and Building Materials* 363. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129508.

Humbert, Pedro Silva. 2020. "Synthesis and Characterisation of CO 2 Activated Binders and Concretes Using Industrial Wastes for Precast Buildings Applications."

Luck, Joe D., Stephen R. Workman, Mark S. Coyne, and Stephen F. Higgins. 2008. "Solid Material Retention and Nutrient Reduction Properties of Pervious Concrete Mixtures." *Biosystems Engineering* 100(3):401–8. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.03.011.

Mayes, William Matthew, Alex L. Riley, Helena I. Gomes, Peter Brabham, Joanna Hamlyn, Huw Pullin, and Phil Renforth. 2018. "Atmospheric CO2 Sequestration in Iron and Steel Slag: Consett, County

Durham, United Kingdom." *Environmental Science and Technology* 52(14):7892–7900. doi: 10.1021/acs.est.8b01883.

Pinto, Dina;, Castro Gomes J. 2022. "Waste Subtracts and Nutrients as Ingred___A Review _ Leitor Avançado Da Elsevier." *Cleaner Engineering and Technology*.

Shen, Weiguo, Yi Liu, Miaomiao Wu, Di Zhang, Xuejian Du, Deqiang Zhao, Gelong Xu, Bingliu Zhang, and Xing Xiong. 2020. "Ecological Carbonated Steel Slag Pervious Concrete Prepared as a Key Material of Sponge City." *Journal of Cleaner Production* 256. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120244.

Teymouri, Ehsan, Sayed Farhad Mousavi, Hojat Karami, Saeed Farzin, and Maryam Hosseini Kheirabad. 2020. "Municipal Wastewater Pretreatment Using Porous Concrete Containing Fine-Grained Mineral Adsorbents." *Journal of Water Process Engineering* 36. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101346.

Wang, Di, and Wei Dou. 2023. "Research on the Synergy Mechanism of Multiple Subjects in Global Climate Governance: Based on the Perspective of the Evolutionary Game of Carbon Neutral Strategy between China, the US, and the EU." *Journal of Cleaner Production* 419. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138306.

Ashraf, Warda. 2016. *Carbonation of Cement-Based Materials: Challenges and Opportunities*. Construction and Building Materials.

Yan, Xiwen, Xuezhi Wang, Chuanwu Sun, Ming Xin, and Jingjing He. 2023. "Performance Analysis and Admixture Optimization of GBFS-HPMC/Fiber Pervious Concrete." *Materials* 16(19). doi: 10.3390/ma16196455.

Yap, Soon Poh, Paul Zhao Chiat Chen, Yingxin Goh, Hussein Adebayo Ibrahim, Kim Hung Mo, and Choon Wah Yuen. 2018. "Characterization of Pervious Concrete with Blended Natural Aggregate and Recycled Concrete Aggregates." *Journal of Cleaner Production* 181:155–65. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.205.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ETHYLENE VINYL ACETATE (EVA) E METACAULIM COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS DO AGREGADO MIÚDO E DO AGLOMERANTE, RESPECTIVAMENTE, EM ARGAMASSAS ESTABILIZADAS

Letícia Sabrina de Melo Souza[a]; Aline Figueiredo da Nóbrega [b]; Raphaele Lira Meireles de Castro Malheiro [c] , Fabíola Luana Maia Rocha[d], Leane Priscilla Bonfim Sales[e], Iranilza Costa da Silva[f]

[a] (Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil)/ (Instituto Federal do Ceará- IFCE, Av. Dr. Geraldo Barbosa Marques, 567 - Venancio, Crateús - CE, 63708-260, Crateús, Ce, Brasil), leticiassabrina@hotmail.com.

[b] (Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprigio Veloso 882, 58429-140, Campina Grande, Brasil), alinefnobrega@hotmail.com

[c] (Universidade do Minho, Azurém, Guimarães, Portugal), raphaelemalheiro@civil.uminho.pt.

[d,e] (Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil), [d]flmr2@academico.ufpb.br e [e]leanepriscillab@gmail.com .

[f] (Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife - PE, Brasil), iranilza.costa@ufpe.br.

RESUMO

A argamassa estabilizada é fabricada em usina com controle de qualidade rigoroso e capaz de se manter trabalhável por até 72 horas, todavia possui poucos estudos científicos, principalmente utilizando resíduos. Assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar seu comportamento, considerando a substituição fixa de 20% em massa do cimento Portland por Metacaulim (MC) e a substituição do agregado miúdo por Ethylene Vinyl Acetate (EVA) (resíduo da indústria calçadista), em volumes variados (10%, 20%, 30%), para tempos de estabilização de 0h e 48h. Os ensaios realizados no estado fresco foram flow table (consistência), densidade de massa fresca e teor de ar incorporado; e endurecido foram densidade de massa aparente e resistência à compressão. Os ensaios de consistência mostraram que o aumento do teor de EVA e MC reduziu o espalhamento das misturas. As densidades das misturas frescas com EVA diminuíram com o aumento de EVA em 0h de estabilização, mas aumentaram em 48h. O teor de ar incorporado aumentou nas argamassas com EVA, mas diminuiu em 48h de estabilização. A densidade de massa endurecida das argamassas com MC e EVA diminuiu, mas houve aumento ao longo da estabilização. O metacaulim melhorou a resistência à compressão, enquanto o EVA a reduziu.

Palavras-chave: Argamassa leve, Resíduo de EVA (*Etilene Vinil Acetato*), agregado leve, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A argamassa estabilizada é uma argamassa que se mantém trabalhável por um período de tempo de 24 h a 72 h. Ressalta-se que comumente ela é uma argamassa produzida em fábrica e entregue na obra por caminhões, devendo ser armazenada em contêineres. As argamassas estabilizadas são compostas por aglomerantes, agregados finos, água e aditivos. O que possibilita o elevado tempo de manutenção da trabalhabilidade é a adição de aditivos químicos como o aditivo incorporador de ar (AIA) e o aditivo estabilizador de hidratação (AEH) (Antoniazzi, 2019).

Entre os aditivos, temos os incorporadores de ar (AIA), eles são tensoativos e sua estrutura química possibilita a melhora na trabalhabilidade (Mehta e Monteiro, 2008). Segundo Antoniazzi (2019) o AIA

proporciona um efeito de rolamento de esferas melhorando a trabalhabilidade. Dessa forma, é possível diminuir a quantidade de água durante as dosagens.

Paralelamente temos o uso do aditivo estabilizador de hidratação (AEH), que é um aditivo que atua sobre a molécula do cimento, bloqueando a reação com a água e mantendo, assim, sua trabalhabilidade por até 72h após a mistura (Bauer et al., 2015). Os AEH atuam no controle da hidratação agindo sobre as moléculas do cimento Portland criando uma película hidrorrepelente, bloqueando a ação da água, não permitindo que o elemento para iniciar a reação de hidratação alcance o cimento Portland (Guindani, 2018).

Ressalta-se que existem alguns estudos com o objetivo de entender a argamassa estabilizada (Paulino, 2020, Antoniazzi, 2019) com a adição de materiais. Os materiais pozolânicos, como o metacaulim, vem sendo avaliado em argamassas (Rocha, 2005; Mota et al., 2016), buscando a redução da emissão de dióxido de carbono (CO2), redução dos custos e sustentabilidade. Entretanto, estudos com materiais leves são pouco explorados em argamassas estabilizadas e poucos são os trabalhos encontrados na literatura como o de Silva (2023), usando EVA e Metacaulim.

Nesse ínterim, visando sanar essa lacuna, foi realizado o estudo da argamassa estabilizada com a aplicação de adições que ajudam a melhorar as propriedades e serem substitutos parciais de componentes da mistura e buscando alternativas técnicas viáveis e mais sustentáveis para esse material. Neste trabalho foram estudadas misturas contendo metacaulim (MC) como substituição ao cimento Portland e EVA (Etileno Acetato de Vinila) como substituto parcial do agregado miúdo.

A justificativa da escolha do uso do metacaulim ocorreu devido ele possuir diversas vantagens quando aplicado como adição pozolânica em matrizes cimentícias. Os autores Siddique e Klaus (2009) destacam as melhorias na resistência mecânica em todas as idades, redução da absorção capilar e da permeabilidade, maior resistência ao ataque de agentes deletérios, como sulfatos e cloretos. Ademais, o MC tende a proporcionar melhorias na resistência da argamassa que é prejudicada pela adição de agregados leves como o EVA (Silva, 2023; Da Costa et al., 2021; Rocha, 2008)

No caso da escolha da utilização do EVA, a indústria da construção civil vem buscando soluções sustentáveis na fabricação de novos materiais. Mediante a isso, neste estudo a adição de resíduos de EVA provenientes da indústria calçadista é uma opção viável e ambientalmente interessante, visto que os resíduos de calçados não são biodegradáveis e não podem ser reprocessados, pois o EVA é um polímero termofixo, o que torna a reação que o originou irreversível (Garlet, 1998).

Adicionalmente, estudos para obtenção de uma argamassa leve são importantes, pois por possuir menor densidade ela tem poros formados que dificultam a transmissão de som e calor, por isso, pode ser considerado um material termoacústico. Outro fator interessante é a redução do seu peso, que resulta em componentes mais leves em uma estrutura (Rocha, 2008). Nesse ínterim, são necessários estudos aprofundados e com embasamento científico para avaliar o processo de estabilização, soluções técnicas e economicamente viáveis para melhoria da argamassa estabilizada no estado fresco e endurecido (Guindani, 2018).

2 DADOS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 1 apresenta um resumo das etapas de trabalho propostas nesta pesquisa.

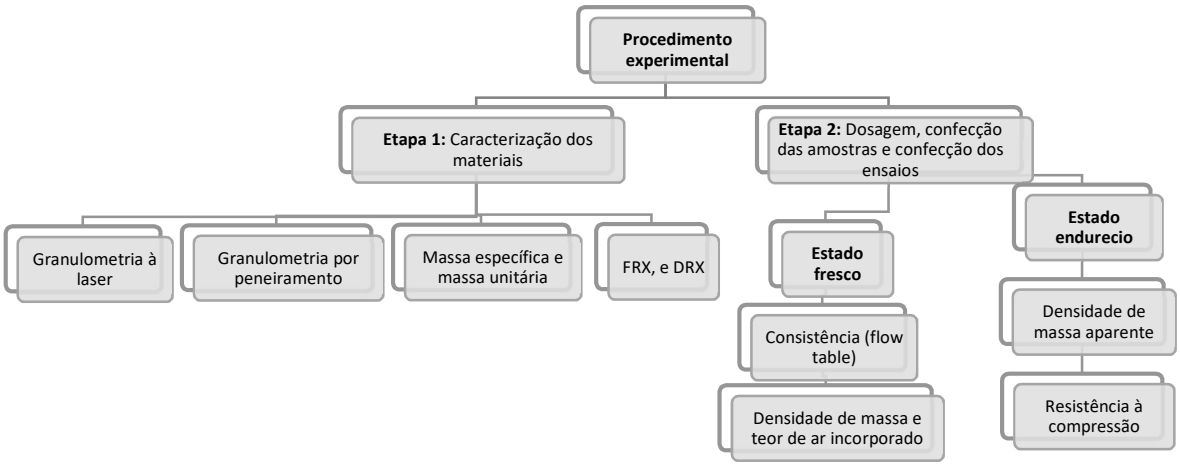


Figura 1: Fluxograma das etapas da pesquisa.
Fonte: Autor, 2024.

2.1 DADOS

O programa experimental partiu dos materiais apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Materiais utilizados nas argamassas estabilizadas.

Materiais	Descrição
Cimento Portland	CP V - ARI
Agregado miúdo	Areia natural de rio
Resíduo calçadista (EVA)	Material triturado doado pela empresa calçadista
Metacaulim Comercial (MC)	Metacaulim BZ (MK)
Aditivo Incorporador de Ar (AIA)	TEC-NOL da marca GCP Applied Technologies.
Aditivo Estabilizador de hidratação (AEH)	ECO-TEC da marca GCP Applied Technologies.
Água	Concessionária local

Fonte: Autor, 2024.

As misturas produzidas são compostas por cimento Portland (CP-V-ARI), areia natural, metacaulim (MC), EVA (resíduos de calçados), água e os aditivos incorporador de ar (AIA) e estabilizador de hidratação (AEH). Para a produção das argamassas, a areia foi colocada em estufa por 24 horas em temperatura de 100 °C, seguido de seu peneiramento, utilizando a peneira 4,8 mm. O EVA (Figura 2) foi colocado na mistura sem nenhuma umidade inicial (seco previamente em estufa em baixa temperatura de 50 °C por 24 horas.

Figura 2: EVA utilizado nas argamassas estabilizadas.
Fonte: Autor, 2024.

O cimento CP-V-ARI foi escolhido por haver menores teores de adições. Além disso, o EVA atrasa as reações de hidratação de acordo com Silva, Roman e Gleize (2002), necessitando de um maior período de cura para as argamassas. Assim, para diminuir o tempo de desforma e liberação dos serviços com essas argamassas em aplicações práticas, esse tipo de cimento foi utilizado.

2.2 MÉTODOS

- Caracterização física

Os materiais foram caracterizados quanto aos seus aspectos físicos e químicos. As características físicas dos materiais utilizados são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Massa unitária e massa específica dos materiais

Material	Massa unitária (g/cm³)	Norma	Massa específica (g/cm³)	Norma
Cimento portland Tipo CP V- ARI	0,916	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	2,92	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Areia	1,66	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	2,63	NBR 16916 (ABNT, 2021b)
Resíduo calçadista (EVA)	0,28	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	1,28	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Metacaulim Comercial (MC)	0,48	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	2,55	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Aditivo Estabilizador de Hidratação (AEH)	-	-	1,14	-
Aditivo Incorporador de Ar (AIA)	-	-	1,1	-

Fonte: Autor, 2024.

As distribuições granulométricas do CP-V- ARI e MC podem ser observadas na Figura 3 (a), obtidas pelo método de difração a laser através de um analisador granulométrico a laser seco CILAS 1090, medindo a distribuição do material em um tamanho faixa entre 0,05 µm e 500 µm. A granulometria do EVA e da areia foi determinada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022) e são apresentados na Figura 3 (b).

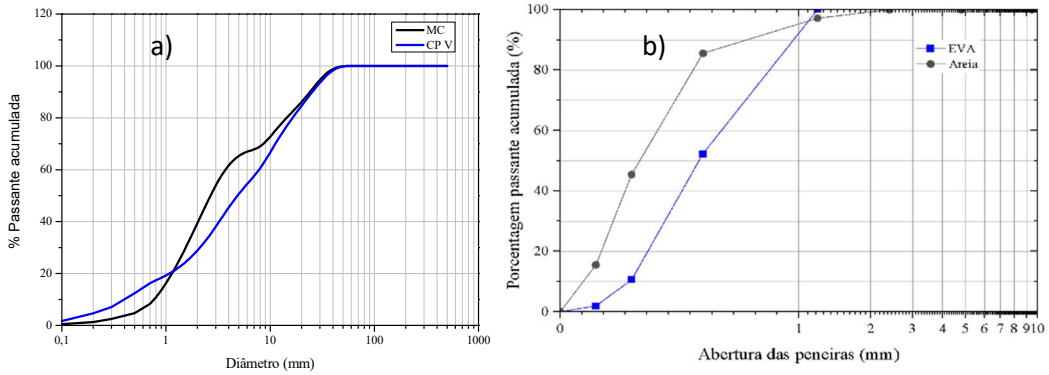


Figura 3: Curvas granulométricas- a) Cimento e MC. B) Areia e EVA
Fonte: Autor, 2024.

As curvas de distribuição granulométrica de CP V- ARI e MC, apresentadas na Figura 3 (a), mostram que as partículas de ambos os materiais possuem tamanho máximo de aproximadamente 50 µm. Cerca de 70% das partículas no CP-V- ARI têm diâmetro menor que 10,1 µm, enquanto no MC, cerca de 70%

das partículas têm diâmetro menor que 8,5 µm. Pode-se observar que o MC possui tamanhos de grãos menores em comparação ao CP-V- ARI, o que pode contribuir para o efeito fíler. Na Figura 3 (b) o diâmetro máximo da areia é 1,2 mm e o módulo de finura é 1,57. O diâmetro máximo dos grãos do EVA é de 1,2 mm e o módulo de finura é de 2,35.

- Caracterização química

Para a análise da composição química dos materiais foram feitos ensaios de fluorescência de Raios-x (FRX) para o Cimento CP-V e o MC.

Tabela 3: Composição química por fluorescência de raios-x (FRX) (% em massa) do CP-V e do MC.

Material/ composição química	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	CaO	TiO_2	BaO	SO_3	MnO	Cr_2O	Outros	Perda ao fogo
CP-V ARI	18,97	6,2	-	3,38	-	51,8	-	-	5,16	-	-	14,47	8,64
MC	62,55	19,2	8,40	-	2,21	0,61	1,79	0,36	0,34	0,12	0,042	0,30	6,10

Fonte: Autor, 2024.

Ao observar os resultados da análise química (Tabela 3), percebe-se que o CP-V-ARI está dentro dos limites especificados na norma NBR 16697 (ABNT, 2018), exceto pela perda ao fogo de 8,64% de massa encontrada no FRX que é superior ao limite recomendado de 6,5% pela norma, indicando uma perda de massa considerável quando submetido a altas temperaturas. A perda ao fogo superior ao máximo recomendado por norma sugere que o cimento utilizado sofreu uma pré-hidratação maior que a admitida.

Quanto a isso, denota-se que o clima de João Pessoa é tipicamente tropical, ademais há na cidade o registro de altas temperaturas e grandes índices de umidade. Assim, essa perda ao fogo fora do limite da norma refere-se a condições de armazenamento, onde o cimento pode ter sido exposto a condições inadequadas de armazenamento, resultando em pré-hidratação. Provavelmente houve uma pré-hidratação em relação ao armazenamento dentro da própria fábrica ou dentro da loja de materiais de construção, não foi possível ver a olho nu as partículas aglomeradas características de pré-hidratação.

Dessa forma, o ensaio foi realizado e por indisponibilidade laboratorial não pode ter sido feito ensaios complementares. Adicionalmente, experiências anteriores com cimentos de características similares não mostraram problemas significativos em aplicações semelhantes (Bezerra, 2023). Considerando as circunstâncias e baseado na experiência, acredita-se que o desempenho do cimento será adequado para a aplicação específica, sem comprometer a qualidade e durabilidade da construção.

Quanto ao MC, conforme NBR 12.653 (ABNT, 2014), ele é classificado como material pozolânico de classe N, pois os percentuais de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 79,09\% \geq 70\%$. Já a perda ao fogo, conforme NBR 15894-1 (ABNT, 2010), ultrapassa o limite de 4,0%, isso indica que uma quantidade superior de massa é perdida quanto o MC é aquecido a altas temperaturas.

- Caracterização mineralógica

A análise mineralógica foi realizada utilizando testes de Difração de Raios X (DRX) para Cimento Portland V - ARI e MC. O teste de DRX utilizou um difratômetro Siemens D5000 sob as seguintes condições de ensaio: radiação CuKα, com comprimento de onda λ = 1.5418 com raios-x em 30 kv e 30 mA; velocidade de leitura de 1º/min. Os resultados são apresentados na Figura 4.

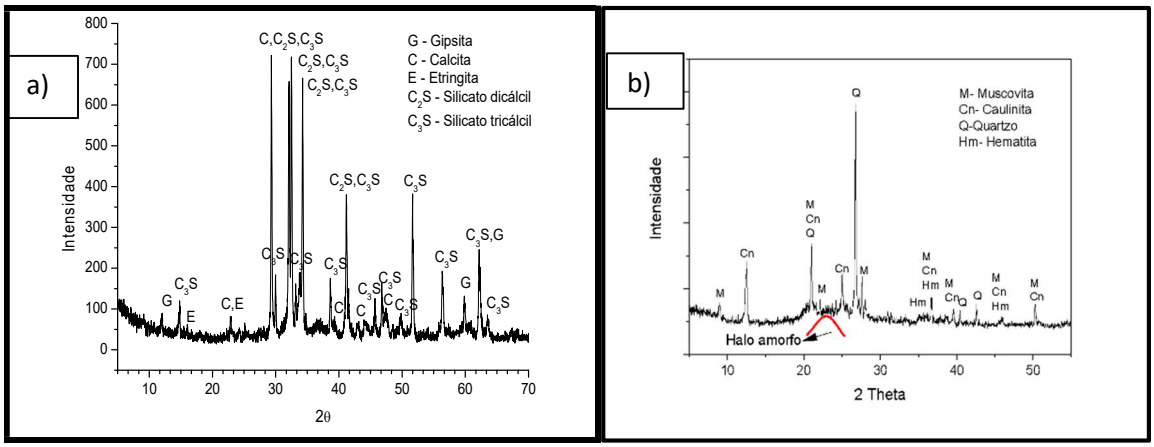


Figura 4: a) Resultado do DRX para o CP V. b) Resultado do DRX para o MC.
Fonte: Autor, 2024.

A análise DRX padrão de CP-V-ARI identificou picos com maior intensidade correspondentes a silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S) e picos menos intensos de Gipsita ($CaSO_4$. $2H_2O$), Calcita ($CaCO_3$) e Etringita ($Ca_6Al_2(SO4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$). Para MC, o gráfico (Figura 4b) revela que apresenta uma região cristalina, com picos correspondentes a muscovita (M), caulinita (Cn), quartzo (Q) e hematita (Hm). O quartzo indica a presença de areia. A caulinita indica que a calcinação não foi suficiente. A presença da hematita indica um alto teor de óxido de ferro. Ocorre um halo amorfo entre 20 e 30 (2 theta), apesar de ser discreto, é comum em material pozolânico.

2.3 PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA

A preparação das amostras de argamassa incluiu uma mistura de referência (sem aditivos) e outras contendo uma substituição fixa de metacaulim (MC) a 20% em massa do aglomerante. As argamassas com EVA foram preparadas com substituições de 10%, 20%, 30%, em volume, da areia pelo EVA. Como o EVA é um material mais volumoso que a areia, ele precisou ser adicionado de acordo com seu peso específico, considerando o volume. Todos os materiais tiveram suas quantidades convertidas em massa para a preparação da argamassa em laboratório.

A proporção da mistura de referência utilizada neste estudo foi de 1:3 (aglomerante: areia) em volume, que se converteu em massa como 1:5,44 (aglomerante: areia). Foi utilizado 0,06% de aditivo incorporador de ar e 0,98% de aditivo estabilizador de hidratação em massa do aglomerante. Os teores de aditivos foram obtidos por meio de estudos preliminares dos teores utilizados por Paulino (2020) da concreteira local SUPERMIX CONCRETO SA, que comercializa esse produto na cidade de Campina Grande-PB. O traço de referência foi obtido após ajustes por meio de estudo piloto, baseado no traço sugerido por Silva (2023).

A Tabela 4 apresenta as misturas analisadas neste trabalho com suas siglas de referência. O volume de argamassa produzido com os materiais, para cada traço, foi de aproximadamente 3.000 cm³, variando devido às mudanças de volume da argamassa pela incorporação de novos materiais.

Tabela 4: Identificação e quantidade de materiais nas misturas analisadas.

Argamassas*	MC (%)	EVA (%)	CP-V (g)	Areia (g)	MC (g)	EVA (g)	AIA (g)	AEH (g)	A/AGL.	Água (g)
Referência(REF)	0	0	700	3808,00	-	-	0,42	6,86	0,90	630
20%MC/0%EVA	20	0	560	3808,00	140	-	0,42	6,86	0,90	630
20%MC/10%EVA	20	10	560	3425,11	140	63,27	0,42	6,86	0,90	630
20%MC/20%EVA	20	20	560	3044,54	140	126,55	0,42	6,86	0,90	630
20%MC/30%EVA	20	30	560	2663,97	140	189,83	0,42	6,86	0,90	630

* A coluna 1 apresenta a nomenclatura adotada para as argamassas neste trabalho.

Fonte: Autor, 2024.

A relação água/aglomerante (relação A/AGL) foi fixada em 0,9 para proporcionar boa trabalhabilidade à mistura de referência, com índice de consistência inicial de 275 ± 5 mm (ensaio feito de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016b), estabelecido no momento da mistura inicial, para que após as 48h de estabilização a argamassa de referência pudesse manter seu espalhamento dentro do mínimo sugerido na norma NBR 16541 (ABNT, 2016a) que é 260 ± 5 mm.

O procedimento de mistura da argamassa foi realizado conforme NBR 16.541 (ABNT, 2016a). As misturas foram armazenadas em recipientes de PVC, protegidos da luz solar e do vento, com camada de água de 3 cm para estabilização. Após 48 horas foi feita uma mistura para homogeneização em argamassadeira por 30s antes dos ensaios.

Foram realizadas as avaliações de todas as misturas no seu estado fresco e endurecido. As propriedades avaliadas no estado fresco são: trabalhabilidade segundo o ensaio da mesa de consistência ou “Flow Table”, conforme a NBR 13.276 (ABNT, 2016b) e a determinação da massa fresca e teor de ar incorporado foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 13.278 (ABNT, 2005a).

Para o ensaio do índice de consistência das argamassas (figura 5) foram realizadas medições do diâmetro em três direções para cada mistura. Além disso, foi realizada apenas uma medida do índice de consistência para cada argamassa.

Os ensaios de caracterização no estado endurecido foram: o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido, que seguiu os preceitos da NBR 13280 (ABNT, 2005c) e resistência à compressão conforme a NBR 13279 (2005b). Para a determinação da densidade de massa aparente das argamassas foram analisados três corpos de prova para cada amostra. No caso da análise da resistência à compressão foram utilizados seis corpos de provas de cada traço.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

- **ENSAIO DE CONSISTÊNCIA**

A figura 5 apresenta os espalhamentos das misturas preparadas. As barras de erro estão presentes na imagem.

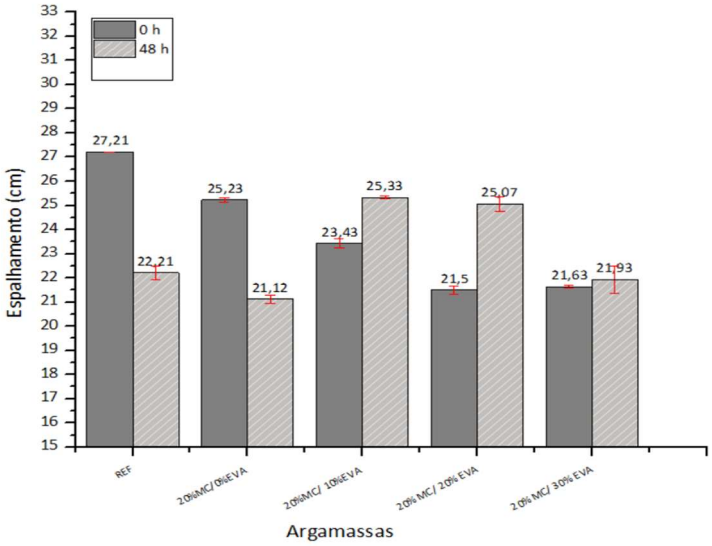


Figura 5 - Espalhamento das argamassas
Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar a figura 5, é possível notar a diminuição do índice de consistência da mistura REF e da mistura 20%MC/0%EVA com o aumento do tempo de estabilização, diminuindo sua trabalhabilidade, ocasionado por um melhor arranjo das partículas, reduzindo o ar incorporado na argamassa. A mistura com Metacaulim apresentou menor espalhamento em relação à mistura de referência no tempo de estabilização de 0 e 48h. Tal fato pode ser explicado devido ao fato do metacaulim apresentar uma granulometria mais fina, facilitando a redução do ar incorporado e absorvendo mais água de amassamento, como observado também por Silva e Azerêdo (2022) e Paulino (2020). Denota-se que a redução do espalhamento em alto grau afeta a consistência das argamassas, havendo a possibilidade de comprometer a estabilização destas, todavia, para as substituições realizadas não houve esse problema.

As argamassas contendo EVA reduziram seu espalhamento para 0h de estabilização com o aumento do teor de EVA, porém apresentaram mais facilidade de manuseio durante os ensaios. Isto pode ser explicado devido a incorporação do EVA nas misturas ter proporcionado melhor rolamento entre os grãos, mas aumentando a coesão do sistema em um primeiro momento e aumentando o teor de ar incorporado, como foi observado por Silva (2023). Apesar do espalhamento das argamassas com EVA, em 0h de estabilização, terem tido valores inferiores a referência, ao longo dos ensaios foi possível perceber a boa trabalhabilidade e consistência. Para uma melhor análise desse fato seriam necessários ensaios reológicos como o squeeze flow.

Observa-se também que houve um aumento do espalhamento das misturas com EVA, em 48h, em relação à mistura de referência e a mistura 20%MC/ 0%EVA em 48 h. Esse aumento contradiz outros autores (Paulino, 2020; Antoniazzi, 2019, Silva, 2023) que estudaram a argamassa estabilizada sem adição de EVA. Esse fato pode ser explicado por uma separação da água com o EVA ao longo da estabilização, visto que a mistura ficou nitidamente mais coesa, no primeiro momento, e após 48 h, estava mais fluida.

Segundo Ohama (1998), a adição de um polímero nas misturas possibilita o aumento da plasticidade e da trabalhabilidade, e por consequência, possibilita um aumento da viscosidade das misturas na fase líquida, devido ao efeito de vedação provocado pela formação de filmes poliméricos muito finos e impermeáveis. No caso das argamassas estudadas, a formação do filme polimérico ocorre, principalmente, ao longo do tempo de estabilização.

- **DENSIDADE DE MASSA FRESCA E TEOR DE AR INCORPORADO**

A densidade de massa fresca e o teor de ar incorporado das argamassas preparadas são indicados na figura 6.

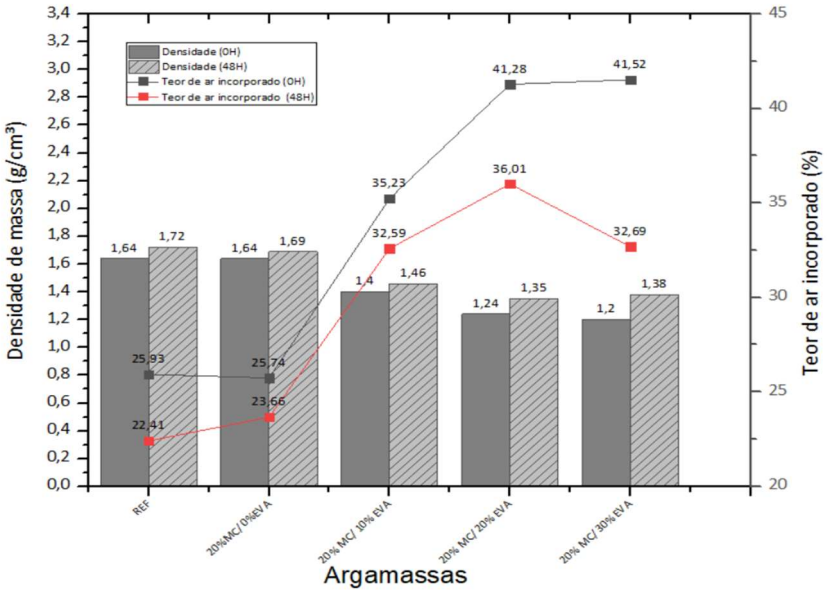


Figura 6: Densidade da massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas
Fonte: Autor, 2024.

De acordo com os resultados apresentados na figura 6, todas as argamassas tiveram uma diminuição dos seus teores de ar incorporados em 48h em relação ao seu teor de ar incorporado em 0h. As argamassas com EVA tiveram um aumento considerável do teor de ar incorporado em comparação com a argamassa referência e a 20%MC/ 0%EVA em todos os tempos de estabilização. Além disso, é possível observar que há um pico do teor de ar incorporado na argamassa 20%MC/30%EVA no momento inicial da mistura.

As argamassas com EVA apresentaram uma diminuição da densidade de massa fresca em relação a densidade de massa fresca da mistura de referência e a mistura 20%MC/ 0%EVA para 0h de estabilização, assim também, quando em comparação ao tempo de estabilização de 48h. Além disso, percebe-se que quanto maior a porcentagem de EVA menor é a densidade de massa fresca para o mesmo tempo de estabilização, como esperado pois a substituição parcial do agregado por EVA promove uma redução da densidade das argamassas uma vez que ele é menos denso que a areia, corroborando com o estudo de Silva (2023).

Entretanto, com o aumento do tempo de estabilização, há uma tendência de aumentar a densidade de massa fresca para todas as argamassas. Isso pode ser explicado pela diminuição do teor de ar incorporado com 48h de estabilização e devido à argamassa utilizada possuir uma porcentagem de finos significativa, representada pelo uso do CPV e o MC em 20% de substituição do cimento. Sendo

assim, essa grande quantidade de finos facilita a acomodação das partículas ao longo do tempo de estabilização e diminui o teor de ar incorporado (Oliveira, 2017).

3.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

- **DENSIDADE DE MASSA APARENTE**

A Figura 7 apresenta as densidades de massa aparente no estado endurecido das misturas aos 28 dias de idade após moldagem. As barras de erro estão presentes na imagem.

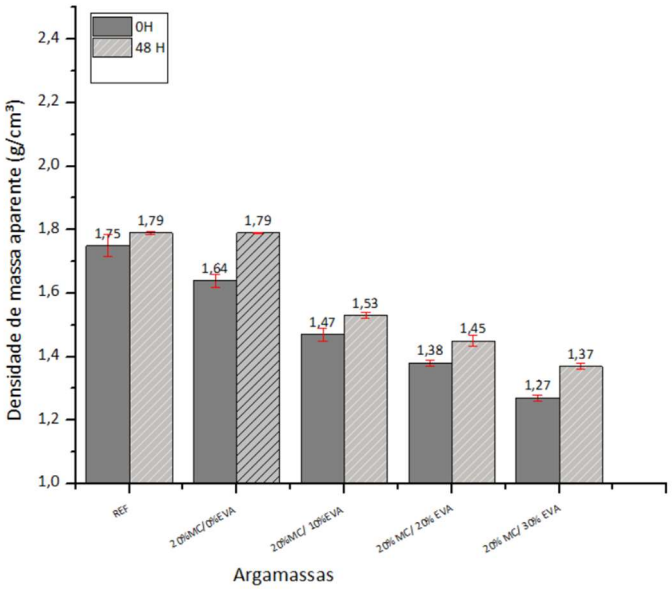


Figura 7: Densidade da massa aparente das argamassas.
Fonte: Autor, 2024.

Como observado na Figura 7, uma menor densidade ocorreu na argamassa com metacaulim. Este fato pode ser devido a um atraso na reação pozolânica do metacaulim, pois ele é incorporado junto ao cimento CP-V (Cyr et al, 2014). O fato do metacaulim possuir uma massa específica e massa unitária menor do que a do cimento, como visto na Tabela 2, também influencia na densidade geral da argamassa.
A partir da Figura 7 é possível observar que a densidade de massa aparente no estado endurecido diminui com a incorporação de agregado leve. Esses resultados corroboram com aqueles encontrados nos trabalhos de Silva (2023) e Da Costa et al. (2021) que trabalharam com a incorporação de EVA nas argamassas.

Todas as argamassas apresentam um aumento da densidade aparente após a estabilização de 48, comparado à 0h. A maior densidade pode ser explicada pelo melhor arranjo dos grãos durante a estabilização e consequentemente, durante a cura.

- **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A Figura 8 apresenta as resistências à compressão das argamassas analisadas aos 28 dias de idade após moldadas. Além disso, está representado o limite da NBR 13281-2 (ABNT, 2023) para a resistência à compressão de argamassas de assentamento. As barras de erro estão presentes na imagem.

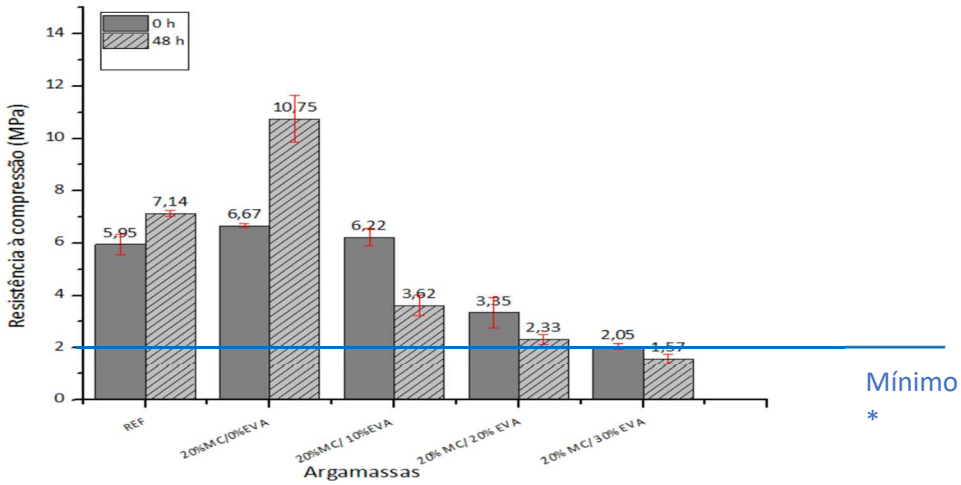


Figura 8: Resistência à compressão das argamassas.
Fonte: Autor, 2024.
* Valor mínimo para argamassa de assentamento de alvenaria de vedação - NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Analisando a Figura 8, nota-se uma redução da resistência à compressão das misturas contendo EVA em relação à argamassa de referência, exceto para a argamassa 20MC/10%EVA, que apresentou resistência superior em 0 h de estabilização. Comparando com a argamassa 20%MC/0%EVA, todas as argamassas com EVA apresentaram redução de resistência nos dois tempos de estabilização. Esse comportamento de redução foi de acordo com os resultados observados nos trabalhos com EVA (Guimarães e Andrade. 2017; Da Costa et al., 2021).

Esse comportamento era esperado, pois a resistência à compressão do compósito formado depende da resistência dos grãos que constituem a argamassa, além do empacotamento dessas partículas. O EVA tem uma resistência à compressão menor do que a areia, conforme destaca Guimarães e Andrade (2017). Assim, destaca-se que as argamassas com 10% e 20% de EVA apresentaram resistências para utilização em assentamento de alvenarias de vedação em 0 e 48 h de estabilização. A argamassa com o teor de 30% de EVA apresentou resistência dentro da norma apenas para 0h de estabilização.

A NBR 13281-2 (ABNT, 2023) fixa o valor mínimo de 2,0 MPa para argamassas inorgânicas para assentamento de alvenaria de vedação e a partir de 5 MPa já podem ser usadas em alvenaria estrutural. Assim, podemos analisar que as argamassas apresentam resistências superiores à solicitada em norma dois tempos de estabilização, exceto a argamassa com 30% de EVA.

4 CONCLUSÕES

Nos ensaios de consistência das argamassas foi possível observar uma tendência de diminuição do espalhamento das misturas com o aumento do teor de EVA para o mesmo tempo de estabilização. Além disso, as misturas contendo EVA apresentaram menor espalhamento em 0 h de estabilização, quando comparada com a argamassa de referência, mas para 48h de estabilização foi ao contrário.

Na análise das densidades das misturas com EVA no estado fresco identificou-se uma redução das densidades com o aumento da percentagem de EVA em relação à referência. Como esperado, já que a densidade de uma mistura de materiais depende da densidade dos seus componentes, e no caso, o EVA é menos denso que a areia. Com o aumento do tempo de estabilização, há uma tendência de aumentar a densidade de massa fresca tanto para a amostra de referência quanto para as demais argamassas. Na análise dos teores de ar incorporados nas misturas notou-se uma tendência de que quanto maior a percentagem de EVA nas misturas maiores foram os teores de ar incorporados nas argamassas.

Verificou-se que as argamassas com EVA apresentaram menor densidade de massa no estado endurecido e houve menor resistência à compressão em todos os tempos de estabilização, se comparadas à referência, devido ao EVA ser um polímero leve e de menor resistência.

Ademais, a substituição do cimento por MC nas argamassas resultou em menor consistência, densidade endurecida ligeiramente inferior e maior resistência à compressão em comparação com a argamassa de referência, devido às características mineralógicas da pozolana.

- **REFERÊNCIAS**

Antoniazzi, J. P. (2019). O efeito dos aditivos incorporador de ar e estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas.258 f. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) Santa Maria-RS.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2005a). NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro.

_____ . (2005b). NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT.

_____.(2005c). NBR 13280. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2017). NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

_____ . (2021a). NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro.

_____. (2021b). NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro,

_____. (2018). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro.

_____ (2022). NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

_____. (2010a). NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.

_____.(2016a). NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro.

_____. (2016b). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.

_____ . (2023). NBR 13281-2: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios. Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro.

Bauer, E., Reguffe, M., Nascimento, M.; Caldas, L. (2015). Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Porto Alegre. Disponível em: file:///E:/Downloads/MATERIA_0025.pdf. Acesso em: 17 Maio. 2023.

Bezerra, D. de P (2023). Propriedades de concreto permeável contendo resíduo de caulim. João Pessoa. Paraíba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 122 f. : il.

Cyr, M; Trinh, M; Husson, B; Casaux-Ginestet, G. (2014). Effect of cement type on metakaolin efficiency. Cement and Concrete Research., 64 (10), pp. 63-72

Da Costa, M. Do R. De M. M., Pinto, M. C. C., Pessanha, M. D., Trevisan, D. B., Herzer, P. H. (2021). Argamassas contendo resíduos a base de EVA e poliéster como agregado leve paper 818 / Mortars containing EVA and polyester based waste as lightweight paper 818 aggregate. Brazilian Journal of Development, 7(1), 8421–8436. https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-571.

Garlet, Givanildo (1998). Aproveitamento de resíduo de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como 56 agregado para concreto leve na construção civil. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Guimarães, C. C.; Andrade, Érica S. (2017). Propriedades de argamassas com EVA (Ethylene Vinyl Acetate) em substituição parcial ao agregado. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 13, n. 1. DOI: 10.5216/reec.v13i1.40167. Disponível em: https://revistas.ufg.br/reec/article/view/40167. Acesso em: 24 maio. 2023.

Guindani, E. N. (2018). Argamassa estabilizada para revestimento: avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco endurecido. Florianópolis, 2018. 146 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2008). Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais, 3ª ed., Ed.:IBRACON.

Mota, J.M.F., Oliveira, R.A., Carneiro, A.M.P. (2016). "Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria". Revista Matéria v.21 n.4, pp. 1105-1116.

Ohama, Y (1998). Polymer-based admixtures. Cement and Concrete Composites, v. 20, n. 2-3, p. 189-212.

Oliveira, V. C. (2017). Estudo comportamental da formulação, dos requisitos, e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento. 245 f. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília (UNB). Brasília/DF.

Paulino, I. M. (2020). Propriedades de argamassa estabilizada contendo metacaulim e resíduo de tijolo cerâmico. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande : s.n.

Rocha, G. G. N. (2005). Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Minas Gerais: Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais.

Rocha, F. M. D. (2008). Aproveitamento de resíduos sólidos industriais em materiais alternativos na perspectiva da construção seca: bloco EVA-intertravamento e racionalização das alvenarias. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba.

Siddique, R. ; Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science, v. 43, n. 3-4, p. 392-400.

Silva, I. C. Da; Azerêdo, A. F. N. De. (2022). Argamassa estabilizada contendo metacaulim (in Portuguese). Anais do VII CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/86817>. Acesso em: 27/05/2023.

Silva, I. C. (2023). Argamassa estabilizada para assentamento contendo etileno acetato de vinila (EVA) e metacaulim (in Portuguese). 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, PB.

Silva, D. A.; Roman, H. R.; Gleize, P. J. P. (2002). Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 9, p. 1383-1390, Sep.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS EXTRUSADAS SUBMETIDAS A AMBIENTES AGRESSIVOS

Madeleing Taborda Barraza[a]; Fernanda de Marco[b]; Afonso Rangel Garcez de Azevedo[a]; Philippe Jean Paul Gleize[b]

[a]Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[b]Universidade Federal de Santa Catarina, Rua João Pio Duarte Silve 205, Florianópolis, SC, Brasil.

RESUMO

As argamassas extrusadas registram teores menores de água quando comparadas com um sistema tradicional que, baseado na fluidez faz uso de formas para confinar o material. Assim, a argamassa extrusada deve garantir sua continuidade e estabilidade de suas camadas. Esses fatores dependem do tamanho e morfologia das partículas em estado fresco. Por isso, as propriedades reológicas são muito importantes. Foram caracterizadas reologicamente três composições híbridas binarias de pastas, utilizando o metacaulim como precursor predominante com substituições de 20% de escória para um sistema e 20% cinza volante para outro sistema. Em condições de temperatura normal (23°C) e após 14 dias, a resistência à compressão dos sistemas variava entre 4 e 40 MPa. Sistemas de pastas contendo 100% de metacaulim a temperatura ambiente (sem tratamento térmico) apresentaram melhor desempenho mecânico que em ambientes agressivos, porém sua viscosidade foi significativamente maior do que sistemas contendo resíduos. O sistema contendo cinza volante apresentou maior redução do desempenho mecânico durante a imersão salina (67% redução) e no ataque ao fogo. O alto teor de álcalis nos sistemas prejudicou o desempenho após condições de imersão e o leve fissuramento superficial comprometeu desempenho mecânico após condições adversas.

PALAVRAS-CHAVE

Pasta, Geopolímero, Extrusão, Temperatura, Ataque

1 INTRODUÇÃO

A reologia desempenha papel importante no desenvolvimento e otimização de materiais para a construção civil, especialmente se estiverem envolvidas tecnologias de impressão 3D. Entre os materiais mais promissores nessa área estão os cimentos ativados por álcalis, que apresentam potencial para reduzir significativamente as emissões de CO_2 e aumentar as resistências mecânicas em comparação ao cimento Portland tradicional (IEA, 2023).

Os materiais à base de ligantes impressos em 3D necessitam de características operacionais distintas, incluindo bombeabilidade, capacidade de impressão e extrusão. Para isso, esses materiais devem apresentar características específicas, como baixa tensão de escoamento dinâmica para garantir a fluidez ideal da mistura no momento da extrusão. Ao mesmo tempo, devem manter alta tensão de escoamento estático e tixotropia para serem moldáveis e aplicadas na construção civil (Zhu et al.,2024). Isso ocorre porque tanto a estrutura quanto às propriedades impressas estão diretamente relacionadas às mudanças de fluidez que ocorrem antes da extrusão da pasta e depois. Para tanto, é necessário que se tenha excelente liquidez de forma a garantir a continuidade das pastas de acordo com a necessidade, ou seja, antes da extrusão ela precisa ser consistente o suficiente para manter sua forma após a extrusão (Jacquet et al., 2021).

Uma das formas de atingir a consistência desejada nos estudos em pastas, construindo uma amostra impressa estável e com deformação estrutural mínima, é compreender parâmetros os reológicos das pastas. Nos últimos anos, foi evidenciado que as propriedades reológicas da pasta tendem a influenciar de forma significativa as propriedades da estrutura impressa em 3D, controlando sua estabilidade, destacando o papel crucial da reologia na regulação da estrutura impressa (Chen et al., 2022).

Considerando os componentes dos álcali-ativados, o silicato de sódio pode atuar como elemento dispersante quando possui alto modulo de sílica (Zhang *et al.,* 2013) e em temperaturas ambiente não contribui à aceleração das reações (Uppalapati; Vandewalle; Cizer, 2020) e o hidróxido de sódio como dissolvente ativo em concentrações molares maiores (Zhang et al., 2012). Para garantir a construtibilidade da impressão é necessário que o processo de endurecimento do material aconteça em tempo razoável para evitar a deformação das camadas, assim, neste trabalho é definida uma proporção alta de hidróxido de sódio que garante a estabilidade da geometria criada após 24 horas.

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo investigar a influência da escória e cinza volante nas propriedades reológicas de materiais à base de cimento geopolimérico para impressão 3D. Para tanto, as pastas foram analisadas quanto a reologia, calorimetria e resistência à compressão, sob diferentes condições de ambiente, em busca de indicar se a presença de resíduos após extrusão favorece a estabilidade química das amostras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como precursores foram utilizados: um metacaulim comercial (MK), uma escória de aciaria (ESC) categorizada como de rápido resfriamento de uma fábrica de ferro gusa local e uma cinza volante (CV) oriunda de uma termelétrica local. As composições químicas estão registradas na Tabela 1 e é indicado o diâmetro médio das partículas nela. As principais fases mineralógicas dos precursores e suas curvas granulométricas estão registradas na Figura 1.

Tabela 1 - Composição de óxidos dos materiais utilizados

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	Outros	D50(µm)
MK (%)	51,3	38,3	7,20	0,10	0,10	1,00	0,00	0,8	35,40
CV (%)	58,6	25,9	6,18	2,10	0,30	3,57	1,89	1,19	31,73
ESC (%)	20,7	6,4	11,50	56,82	2,35	0,50	1,03	0,67	21,15

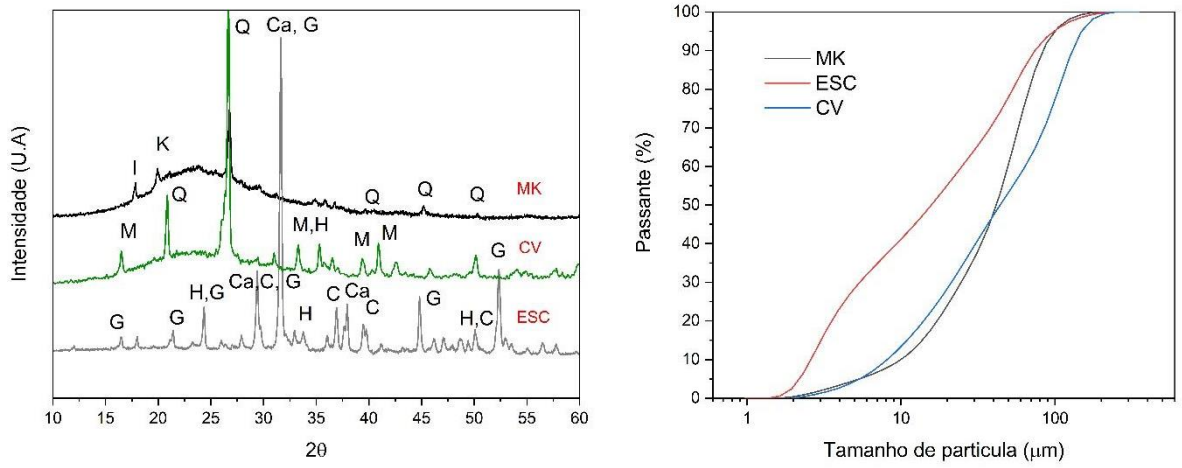


Figura 1 - Espectro de difração de raios-X e distribuição granulométrica do metacaulim (MK), cinza volante (CV) e a escória (ESC). *K: caulinita, Q: quartzo, I: ilita; Ca: óxido de cálcio, G: Gehlenita, H: hematita, C: Carbonato de sódio, M: Mulita.*

A solução ativadora foi constituída de silicato de sódio líquido (com módulo de sílica SiO_2/Na_2O = 3,36) e de hidróxido de sódio (HS) (98% de pureza), misturados em agitador magnético durante 1 hora, numa proporção de 1:10 de hidróxido para silicato, aprox. 12 M de NaOH. A solução foi utilizada após 24 horas. Uma vez resfriada, foi adicionado um aditivo superplastificante PCE (MC PowerFlow 4000) à solução e agitado por 30 segundos. Posteriormente, a solução foi acrescentada à mistura seca dos precursores, misturando durante 4 minutos e depois esvaziado num aparelho de extrusão, que possuía um bocal circular de 15 mm de diâmetro. Foram criadas 3 camadas para definição da pasta, criando espécimenes de 50mmx25mmx15mm (Comprimento, altura e espessura). A proporção utilizada para todas as misturas se resume na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das pastas, em gramas

Suma dos Precursores	Solução ativadora	Aditivo (1%)
100	80	1,12

O estado fresco das pastas foi avaliado mediante reologia oscilatória, com um reômetro MCR-72 da *Anton Paar,* com geometria placa-placa ranhurada, gap de 2 mm, fazendo uma varredura dos módulos no tempo, fixando a frequência em 1 Hz, a 25°C, para dois tempos diferentes: 5 minutos e 20 minutos após contato do precursor com a solução ativadora. Foi utilizado um calorímetro de condução isotérmica da marca *Tam Air* com 8 canais, a 25°C, durante 70 horas. O estado endurecido das pastas

foi avaliado mediante a resistência à compressão uniaxial, utilizando uma prensa *instron* 34 FM-10 numa taxa de aplicação de carga de 0,25MPa/s.

Após 14 dias parte das amostras foram imersas, durante 7 dias, em dois sistemas: uma solução que simula o ambiente salino, com componentes registrados na Tabela 3, e outro em água destilada. Outro grupo de amostras foram submetidas ao ataque ao fogo, usando um forno até 300°C durante 2 horas. E finalmente, o grupo de controle, foi deixado a temperatura ambiente.

Tabela 3 - Composição da água salina (CEN 1999)

Composto químico	Concentração (g/L)
Cloreto de sódio – NaCl	30,0
Sulfato de Magnésio – $MgSO_4$	5,0
Cloreto de Magnésio – $MgCl_26H_2O$	6,0
Carbonato de potássio - $KHCO_3$	0,2
Sulfato de cálcio $CaSO_4$	1,5

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da aparência das pastas foram registrados na Figura 2, numa primeira linha, quando saem do bocal do aparelho extrusor, e em uma segunda linha após serem colocados no sistema de placas paralelas do reômetro. O aspecto visual das pastas apresentaram tendência congruente com as referências bibliográficas, i.e., conforme a CV e a ESC eram incorporadas, as pastas se tornaram “mais fáceis” de ser extrusadas no bocal (com a mesma aplicação de esforço saia mais quantidade de material), isso pela morfologia das partículas típicas da CV (esférica) e da ESC (bordas irregulares) (Klima *et al.*, 2022; Li; Chen; Gao, 2024). Sendo a mistura composta por MK de maior coesão e de alta viscosidade, devido ao empilhamento morfológico das suas partículas é mais irregular e aleatório que as dos outros precursores. Seguida pelo grupo 80MK-20ESC, também de aspecto firme enquanto o 80MK-20CV parece ter maior tendência à segregação sob aplicação de esforço.

Consecutivamente, a Figura 3a apresenta as curvas de viscosidade pelo tempo traçadas em dois tempos distintos: de 5 até 20 minutos e de 20 até 40 minutos. Assim como, o comportamento dos módulo de armazenamento (G’) e o módulo de perda (G’’) durante esses mesmos tempos para avaliar o processo de enrijecimento ou desestruturação com a sua interseção ou superposição (Ma *et al.*, 2023), ver Figura 3b,c. Os valores de viscosidade nestes sistemas são altos e congruentes com os encontrados na literatura (Muthukrishnan; Ramakrishnan; Sanjayan, 2021).

Figura 2 - Aparência das pastas com incorporação dos resíduos sendo extrusadas, e sendo confinadas pela geometria do reômetro.

Para tempos iniciais a 5 minutos, as misturas se comportam como sólidos em valores de torques menores (já que G' > G"), sendo seu caráter elástico maior a seu caráter viscoso (KAZE *et al.*, 2022). Sendo que, o sistema a base de 100MK requer de maior potência mecânica (±3200 µN.m) para levar o afastamento das partículas. Entretanto, para 80MK-CV e 80MK-20ESC esse ponto de fluidez é atingido com esforços mínimo de aprox. 1610 e 1170 µN.m, respetivamente, sendo que o sistema com incorporação de escória é mais fácil de ser empurrado pelo bocal do que um sistema contendo CV. Essa consistência de maior coesão pode ser justificado pela área superficial das partículas, que é maior em escorias que em cinzas volantes (Hu *et al*., 2019; Li; Chen; Gao, 2024), e é concordante com a finura demostrada pela curva granulometria dos precursores. Após desestruturar o sistema com a rotação continua por 20 minutos iniciais, a dispersão das partículas se faz mais significativa, considerando o afastamento das curvas G' e G" (Denadai *et al*., 2021; Ma *et al.*, 2023) em valores de torques menores para o segundo tempo de medição.

a)

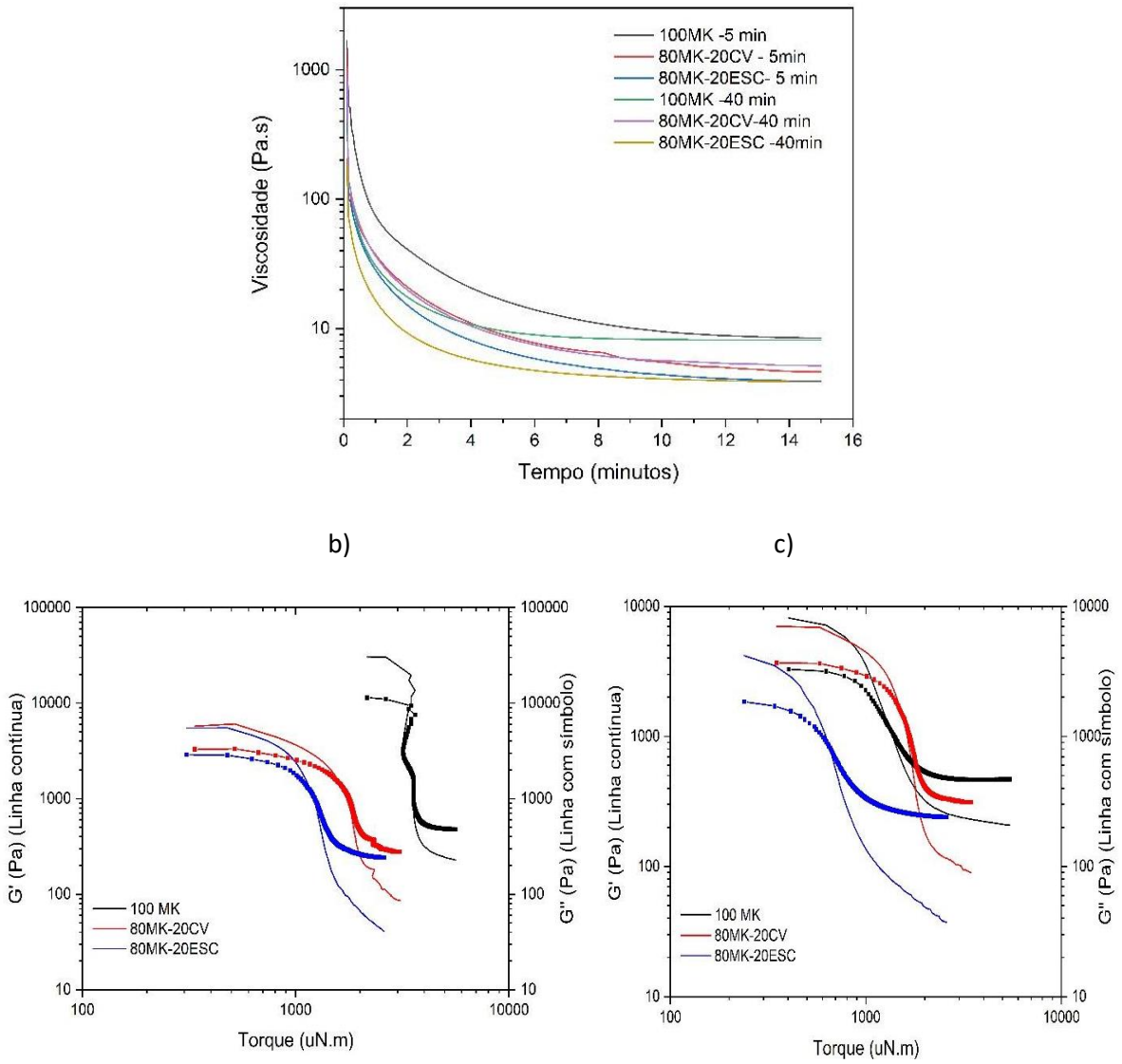


Figura 3 – Comportamento dos parâmetros reológicos: a) viscosidade complexa no tempo, b) G' e G" segundo a variação de torque nos primeiros 20 minutos, c) G' e G" segundo a variação de torque nos seguintes 40 minutos

Na Figura 4 são apresentados as variações no fluxo de calor e o calor total acumulado das pastas durante as primeiras 70 horas. Nesse período, somente foi possível registrar um único pico de dissolução em todos os grupos avaliados. No entanto, observa-se uma discrepância no pico de dissolução entre os grupos 100MK e 80MK-20ESC, o que pode ser justificado pelas características da escoria utilizada. Esta possui alto teor de formas cálcicas, oxido de cálcio e carbonato de cálcio, que reage com o a sílica ativa presente no silicato para formar silicato de cálcio hidratado (CSH) (Pelisser, Gleize and Mikowski, 2009; Blotevogel *et al.*, 2024).

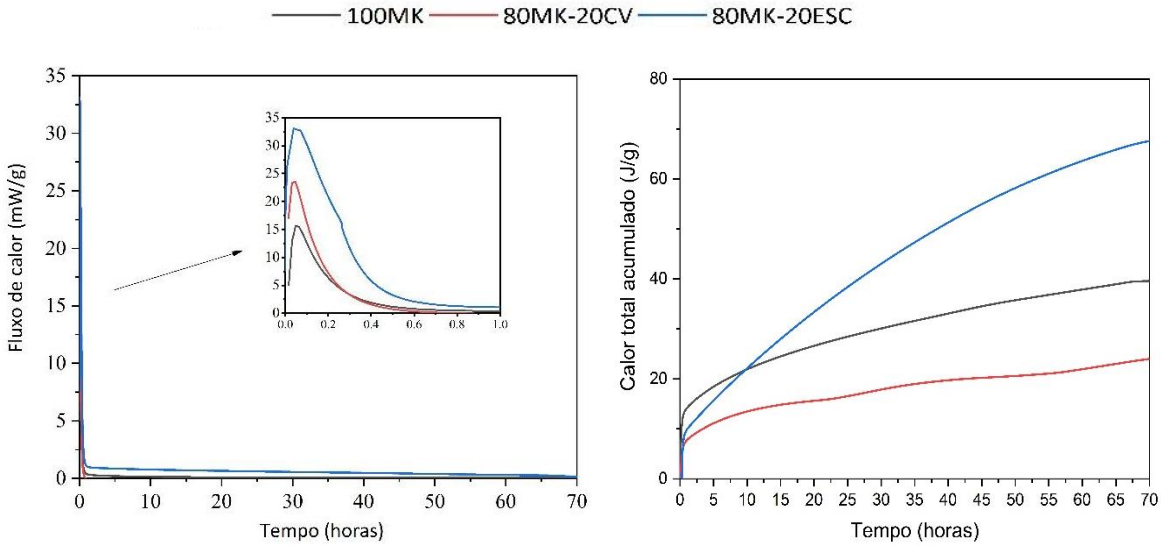
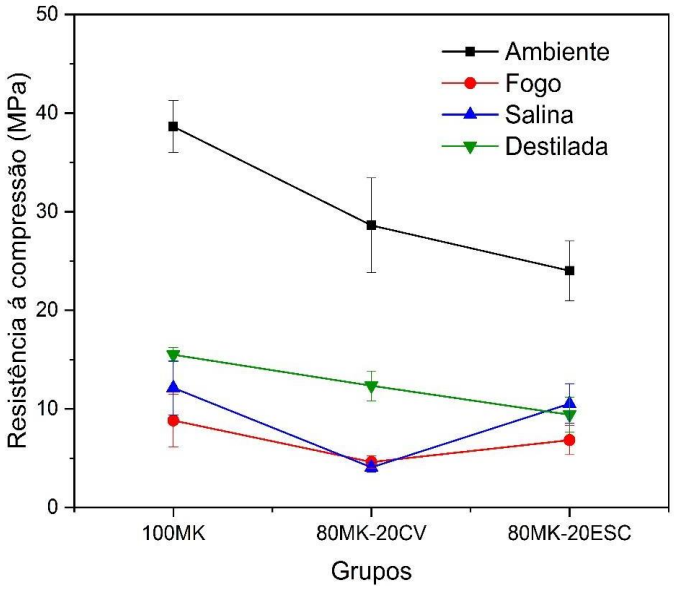


Figura 4 - Curva de fluxo de calor e calor total acumulado das pastas

Essa reação libera uma quantidade significativa de energia, como observado no calor total acumulado durante as 70 horas seguintes ao contato do precursor com o ativador (Ishwarya *et al.*, 2019). O grupo 80MK-20CV, registra um pico significativo de dissolução atrelado ao teor de CV presente nele, que também faz a sua contribuição de dissolução, mas que não tão significativa quanto a reatividade do MK, isso acompanha sua emissão de calor que é menor comparados a todos os grupos, o que é consistente com a presença de cinza volante, que requer imprimir mais energia ou mais tempo de exposição para ter sua contribuição na formação de produtos de reação (Overmann *et al.*, 2024).

Na seguinte Figura 5, são apresentados os resultados de resistência à compressão para as misturas nas condições avaliadas durante 7 dias. Inicialmente, é necessário indicar que sobre a condição de imersão em água destilada todos os sistemas perdem mais do 56% da sua resistência inicial. Esta resposta pode ser uma consequência do efeito combinado de uma concentração alta de álcalis que passaram a ser lixiviados após imersão e a alta retração das misturas que permanecendo em temperatura ambiente uma vez em contato com a água produz dilatação nos elementos de contorno (dos blocos poliméricos formados) o que incrementa a porosidade total e leva à redução do desempenho mecânico (Uppalapati; Vandewalle; Cizer, 2020). Em relação ao ataque ao fogo, dita retração por secagem tornou-se mais significativa, criando um caminho para expulsar até a água que, por teoria é produzida internamente pelos geopolímeros.



Aparência de algumas amostras antes de colocar nos diferentes ambientes, algumas microfissuras.

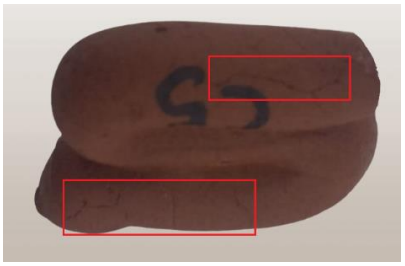


Figura 5 - Comportamento da resistência à compressão das pastas em todos os ambientes

Em resultados Araujo *et al*., (2023), verificou que o ataque salino neste tipo de matriz leva a uma queda significativa do desempenho mecânico (redução de 44%), porém em situação de ataque ao fogo, em outros sistemas contendo cinza volante conseguiram resistir melhor que sistemas unitário garantindo uma cura térmica maior que 60°C, 24 horas após contato com o precursor (KLIMA *et al.*, 2022).

Quando se trata da variação de desempenho pelo ataque salino e fogo os resultados são similares: os menores valores de resistências estão associados a estes ataques, do qual, o grupo 80MK-20CV é o mais prejudicado, isso poderia ser justificado por um reduzido aproveitamento da reatividade da cinza nas condições avaliadas (Hosseini *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2024).

4 CONCLUSÕES

A introdução de resíduos como a cinza volante e a escória de resfriamento lento em um sistema unitário à base de metacaulim ativado alcalinamente apresenta benefícios na redução da viscosidade aparente e complexa, assim como nos esforços de condução do material mediante bocais de extrusão. Entretanto, quando o sistema que contém cinza volante é exposto a condições adversas como fogo e ataque químico (salino) existe uma redução significativa no desempenho mecânico. Isso se justifica pela barreira termo-física que não foi superada para garantir a contribuição do resíduo no sistema, e que em condições de impressão 3D não seria conveniente incorporar a cinza volante quando se quer avaliar o desempenho mecânico em idades menores a 28 dias, pois a sua contribuição é maior a estes tempos ou quando se aplica cura térmica. No entanto, sistemas contendo escória apresentam comportamento similar a um sistema unitário à base de metacaulim, mesmo que, sem condições adversas, sua resistência seja 38% menor que um sistema à base de metacaulim.

5 REFERÊNCIAS

ARAUJO, A., BARRAZA, M. T., SILVA, S. M. S., ONGHERO, L., & PELISSER, F. (2023). Durabilidade De Sistemas Geopoliméricos Reforçados Com Fibras Poliméricas Naturais E Sintéticas. **Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas**, 14(00).

CEN (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION). (1999) – Methods of Testing Cement– Part X: Determination of the Resistance of Cements to Attack by Sulphate Solution and by Seawater, PR ENV 196-X.

DENADAI, Â. M. L.; DOS SANTOS, E. T.; DOS SANTOS, H. L. MOREIRA, J. M. Q.; DE OLIVEIRA, F. C.; BOMBARD, A. J. F.; OLIVEIRA, T. M. Investigação do comportamento viscoelástico de amostras de licor negro oriundas do processo de polpação Kraft da Cenibra-MG à 25°C. **Latin American Journal of Development**, v. 3, n. 4, p. 2411–2425, 2021.

L. ZHU, W. ZHAO, Y. ZHAO, X. GUAN. Mechanism analysis of rheological properties of 3D printed steel slag cementitious composite based on low field nuclear magnetic relaxation test, **Case Studies in Construction Materials**, Volume 20 (2024).

IEA. International Energy Agency. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 29/05/2023.

Y. JACQUET, A. PERROT, V. PICANDET. Assessment of asymmetrical rheological behavior of cementitious material for 3D printing application. **Cement Concr Res**, 140 (2021), 106305.

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 42, p. 129-139, out./dez. 2009.

M. CHEN, H. LI, L. YANG, S. WANG, P. ZHAO, Y. HUANG, et al. Rheology and shape stability control of 3D printed calcium sulphoaluminate cement composites containing paper milling sludge. **Addit Manuf**, 54 (2022), Article 102781.

X. HU, et al. Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars**. Cement and Concrete Composites** 104 (2019) 103392.

BLOTEVOGEL, S. *et al.* The influence of Al2O3, CaO, MgO and TiO2 content on the early-age reactivity of GGBS in blended cements, alkali-activated materials and supersulfated cements. **Cement and Concrete Research**, v. 178, n. March 2023, p. 0–15, 2024.

HOSSEINI, S. *et al.* Mechanochemically activated bottom ash-fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, n. August 2020, 2021.

ISHWARYA, G. *et al.* Effect of sodium carbonate/sodium silicate activator on the rheology, geopolymerization and strength of fly ash/slag geopolymer pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, n. December 2018, p. 226–238, 2019.

KAZE, C. R. *et al.* Influence of mineralogy and activator type on the rheology behaviour and setting time of laterite based geopolymer paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, n. November 2020, 2022.

KLIMA, K. M. *et al.* Thermal and fire resistance of Class F fly ash based geopolymers – A review. **Construction and Building Materials**, v. 323, n. January, p. 126529, 2022.

LI, L.; CHEN, T.; GAO, X. Synergistic effect of CO2-mineralized steel slag and carbonation curing on cement paste. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 145, n. May 2023, p. 105357, 2024.

MA, S. *et al.* Unveiling the critical role of rheology modifiers in additive manufacturing of geopolymers and their mechanical properties. **Additive Manufacturing**, v. 78, n. July, 2023.

MUTHUKRISHNAN, S.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. Effect of alkali reactions on the rheology of one-part 3D printable geopolymer concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 116, n. December 2020, p. 103899, 2021. Disponível em:

OVERMANN, S. *et al.* Statistical assessment of the factors influencing fly ash reactivity. **Construction and Building Materials**, v. 426, n. July 2023, p. 136151, 2024.

UPPALAPATI, S.; VANDEWALLE, L.; CIZER, Ö. Autogenous shrinkage of slag-fly ash blends activated with hybrid sodium silicate and sodium sulfate at different curing temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 121276, 2020.

XIAO, Q. *et al.* Early age reaction, rheological properties, and environment impact of NaOH-activated fly ash mixtures at ambient environment. **Journal of Building Engineering**, v. 88, n. March, p. 109145, 2024.

ZHANG, Z. *et al.* Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. the activation of metakaolin with sodium hydroxide. **Thermochimica Acta**, v. 539, p. 23–33, 2012.

ZHANG, Z. *et al.* Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. **Thermochimica Acta**, v. 565, p. 163–171, 2013.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

LIGANTE ALTERNATIVO OBTIDO DO TRATAMENTO TÉRMICO OTIMIZADO DE RESÍDUOS DE CIMENTO-AMIANTO

Gessivaldo Oliveira Carneiro[a]; Vanderley Moacyr John[b]; Cleber Marcos Ribeiro Dias[c]

[a] Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, n. 02, Federação, Salvador/BA, Brasil, CEP: 40210-639, gessivaldo19@outlook.com;

[b] Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, Av. Professor Almeida Prado, Trav. 2, n. 83, Cidade Universitária, São Paulo/SP, Brasil, CEP: 05508-900, vanderley.john@poli.usp.br;

[c] Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, n. 02, Federação, Salvador/BA, Brasil, CEP: 40210-639, clebermrd@gmail.com.

RESUMO

Este estudo visa validar um método inovador para a produção de ligante alternativo a partir do tratamento térmico de resíduos de cimento-amianto in natura (RCA_{nat}). A pesquisa comprova a efetividade do tratamento térmico na eliminação das fibras de amianto do RCA_{nat}, por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Pastas de cimento foram preparadas com o RCA tratado termicamente (RCA_T) e cimento Portland (CP II F-32) como referência, utilizando uma relação mássica água/materiais sólidos de 0,60. Os resultados indicam que o tratamento térmico otimizado do RCA, i.e., na temperatura de 800°C por 1 h minimizou a emissão de CO_2, promoveu a transformação da crisotila em forsterita e a formação de α'_H-C_2S, o que proporcionou o caráter aglomerante ao material. Por meio da calorimetria isotérmica, da difração de raios-X (DRX) e compressão axial, a pesquisa revela que as pastas de RCA_T apresentam taxas de hidratação e calor acumulado inferiores às pastas de referência. Essa diferença é atribuída ao alto teor de α'_H-C_2S no RCA_T. No entanto, as pastas com RCA_T exibem resistência à compressão aos 7 dias superior à pasta de referência (17,68 MPa vs. 15,45 MPa), demonstrando o potencial do uso do RCA_T como um ligante alternativo com boas propriedades.

Palavras-chave: Resíduos de cimento-amianto, tratamento térmico, emissão de CO_2, aglomerante alternativo.

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta do potencial carcinogênico das fibras de amianto contidas nos artefatos de cimento-amianto, mais de 75 paises proibiram sua exploração (ABREA, 2018), incluindo o Brasil, em 2017 (FLANAGAN, 2019), classificando-o como resíduo perigoso na Classe D[1]. No entanto, Flanagan(2024) aponta para um aumento em seu consumo de 15,4% entre 2015 a 2023, explorando mais de 12 milhões de toneladas na China, Rússia, Cazaquitão. Por outro lado, ao comparar o consumo das fibras de amianto entre 2000 e 2023, observa-se uma redução de 32,5%, tendo em vista o banimento do amianto em alguns países neste período.

Spasiano e Pirozzi (2017) estimaram que entre 1900 e 2015, cerca de 210 milhões de toneladas de fibras de amianto foram comercializadas no mundo, resultando na produção de mais de 2,4 bilhões de toneladas de manufaturados contendo essas fibras. No Brasil, no mesmo período, a industrialização de 8,8 milhões de toneladas de amianto crisotila gerou aproximadamente 100 milhões de toneladas de artefatos (Carneiro et al., 2021).

Em virtude da morfologia das fibras de amianto, Iwaszko et al. (2018) relatam que cerca de 100 mil pessoas morrem todos os anos, dado o elevado consumo de produtos contendo amianto e o período de latência (Spasiano; Pirozzi, 2017). Além disso, Carneiro et al. (2021) relatam que mesmo após o banimento das fibras de amianto em vários países do mundo, diversas edificações aindam possuem coberturas com artefatos de cimento-amianto, além do passivo gerando após sua vida útil. Nesse sentido, faz-se necessário desenvolver tecnologias para eliminar riscos à saúde e viabilizar sua reutilização.

Diante da crescente preocupação com os riscos à saúde oriundos do contato com o amianto e o impacto ambiental da geração de resíduos de cimento-amianto in natura (RCA_{nat}), diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de inertizar as fibras de amianto e possibilitar a reutilização do RCA_{nat}. Esses estudos exploram diferentes métodos, abrangendo as seguintes categorias de tratamento: mecânicos (Colangelo et al., 2011; Iwaszko; Zawada; Lubas, 2018), biológicos (Spasiano et al., 2019), químicos (Spasiano; Pirozzi, 2017), e térmicos (Carneiro et al., 2021; Gualtieri et al., 2008; Ligabue et al., 2020; Obmiński; Janeczek, 2020; Viani; Gualtieri, 2013; Witek; Kusiorowski, 2017).

De acordo com Kusiorowski et al. (2015), o tratamento térmico se destaca como o método mais eficaz na inertização dos RCA_{nat}. No entanto, este processo pode ser oneroso. Diante desse desafio, Carneiro et al. (2021) propuseram uma solução inovadora e sustentável: estabelecer as condições ideais para a desidroxilação completa das fibras de amianto, minimizando a emissão de CO_2 e o consumo energético. Essa otimização garante a máxima cristalização do silicato dicálcico (α'_H-C_2S), conferindo ao material tratado o caráter aglomerante.

Por outro lado, a patente DE19718606A1 descreve que os resíduos tratados termicamente entre 600°C e 1000°C podem ser detectadas partículas fibrosas, sendo necessário submeter este a tensões mecânicas, a fim de quebrar a estrutura transversalmente e obter partículas com comprimento inferior a 5 µm, atendendo as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). Em contrapartida, Kusiorowski, Zaremba e Piotrowski (2016) relatam que tratamentos acima de 700°C provocam alterações significativas na estrutura fibrosa, levando à eliminação das fibras.

Nesse contexto, diversos trabalhos foram desenvolvidos para avaliar o RCA com matéria-prima na produção de clínquer (Gleichmar et al., 1998; Santos; Cilla; Ribeiro, 2022; Yvon; Sharrock, 2011) e clínquer sulfoaluminato de cálcio (Viani; Gualtieri, 2013). Além disso, os resíduos de cimento-amianto

[1] Classe D do artigo 3 e inciso IV da resolução 348/2004 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

tratados termicamente (RCA_T) foram utilizados com SCM na produção de concreto convencional (Gualtieri; Boccaletti, 2011), na produção de geopolímero (Gualtieri et al., 2012; Santana et al., 2023) e álcali-ativado como precursor (Carneiro et al., 2022), na fabricação de tijolos cerâmicos como matéria-prima secundária (Kusiorowski; Zaremba; Piotrowski, 2014) e na produção de placas de procelanato Ligabue et al. (2020). No entanto, observa-se a ausência de estudos direcionados ao entendimento da cinética de hidratação de aglomerantes alternativos de RCA_T.

Neste artigo, descreve-se a morfologia das partículas resultantes do tratamento térmico otimizado do RCA_{nat} desenvolvido por Carneiro et al. (2021). Este estudo valida o tratamento térmico otimizado como um método eficaz para a inertização das fibras de crisotila presentes nos RCA_{nat}. Adicionalmente, examina-se a cinética de hidratação de pastas dos resíduos de cimento-amianto tratados termicamente (RCA_T) e água com o intuito de avaliar o potencial desse material como ligante hidráulico alternativo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

No planejamento experimental foram empregados resíduos de cimento-amianto tratados termicamentes (RCA_T) obtido por Carneiro et al. (2021) como ligante, em que os níveis ótimos das variáveis independentes (temperatura, tempo e massa) foram iguais a 800°C, por 1 h e 5 kg de RCA, respectivamente, calcinando em forno elétrico Linn Elektro Therm, modelo KK-200. Após o tratamento térmico, os RCA_T foram cominuidos em moinho de bolas horizontal durante 8 h e peneirados em peneira #100 (149 µm). Este aglomerante alternativo ao cimento Porland apresentou massa específica igual a 2,97 g/cm³, determinada por meio de um picnômetro a gás hélio AccuPyc II-1340 da Micromeritics, e área superfícial específica BET igual a 7,68 m²/g, obtida em um analisador Belsorp Max, Bel Japan. Para efeito comparativo foi selecionado o cimento Portland CP II F-32, equivalente ao cimento europeu CEM II 40 da norma EN 197-1, com teores de clínquer mais $CaSO_4$ e fíler calcário de 75-89 (em massa %) e de 11-25 (em peso), respectivamente. Para este, a massa específica foi igual a 3,15 g/cm³ e BET de 1,25 m²/g.

As composições químicas do CP II-F 32 e do RCA_T foram obtidas por meio da fluorescência de raios-X (FRX) em um espectrômetro da Malvern Panalytical, modelo Zetium. Pode ser observado a Tabela 1 que o cimento CP II-F 32 atende aos requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) quanto a perda ao fogo, que permitiu estimar o teor de material carbonático em 16,18%. Porém, o teor de SO_3 está superior ao recomendado pela referida Norma (≤ 4,50). O RCA_{nat} e RCA_T, por sua vez, é constituido majoritariamente por CaO, SiO_2 e MgO. O teor expressivo de MgO no nestes materiais se deve à presença da crisotila [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] no RCA_{nat} e o silicato de magnésio anidro no RCA_T.

Tabela 1 – Composição química dos materiais por FRX, na forma de óxidos. Valores em (%)

Materiais	Óxidos									Perda ao Fogo
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	Outros	
CP II-F 32	53,46	16,55	4,46	3,25	5,11	7,16	0,37	0,93	1,59	7,12
RCA_{nat}	33,69	13,16	2,40	2,42	1,69	6,97	0,04	0,35	0,65	33,65
RCA_T	45,70	23,20	3,03	3,36	2,25	12,50	0,07	0,53	0,45	8,91

[a]Perda ao fogo.

A Figura 1 presenta os difratogramas do CP II-F 32 e do RCA_T obtido por difração de raios-X (DRX), utilizando um difratômetro de raios-X da Panalytical modelo Empyrean, com tubo em alvo de cobre (CuKα) de 40 kV e 40 mA, obtidos para 2θ entre 5° e 75°, no modo contínuo, para o passo de 0,02°, tempo do passo de 300 s e detector por área. Nesta análise pode ser observada a presença das fases calcita [$CaCO_3$, ICSD #80869], quartzo [SiO_2, ICSD #41414] e dolomita [$CaMg(CO_3)_2$, ICSD #31277] nos materiais selecionados, e periclásio (MgO, ICSD #9863), ferrita [$Ca_4Al_2Fe_2O_5$, ICSD #3] e anidrita [$CaSO_4$, ISCD #24473] no RCA_T e CP II-F 32. No RCA_T foi possível identificar ainda o polimorfo α'_H-C_2S ($Ca_2.SiO_4$, ICSD #81097), forsterita [Mg_2SiO_4, ICSD #39797] e merwinita [$Ca_3Mg(SiO_4)_2$, ICSD #43078] (ver Figura 1b). Nota-se também que o óxido de cálcio (CaO), obtido a partir da decomposição parcial da calcita e C-S-H a 800 °C, não foi identificado devido à alta reatividade do CaO nas condições de resfriamento (presença de umidade), formando porlandita [$Ca(OH)_2$, ICSD #15471]. Já no CP II-F 32, observou-se a presença do silicato tricálcico (Ca_3SiO_5, ICSD #64759), aluminato tricálcico ($Ca_3Al_2O_6$, ICSD #4), gipsita ($CaSO_4.2H_2O$, ICSD #151692) e belita ($Ca_2.SiO_4$, ICSD #39006), em consonância com Winter (2012) e Nobre et al. (2017). Conforme indicado por Carneiro et al. (2021), o tratamento ótimo eliminou completamente as fibras de amianto presentes nos resíduos de cimento-amianto in natura (RCA_{nat}), como pode ser observado na Figura 1a.

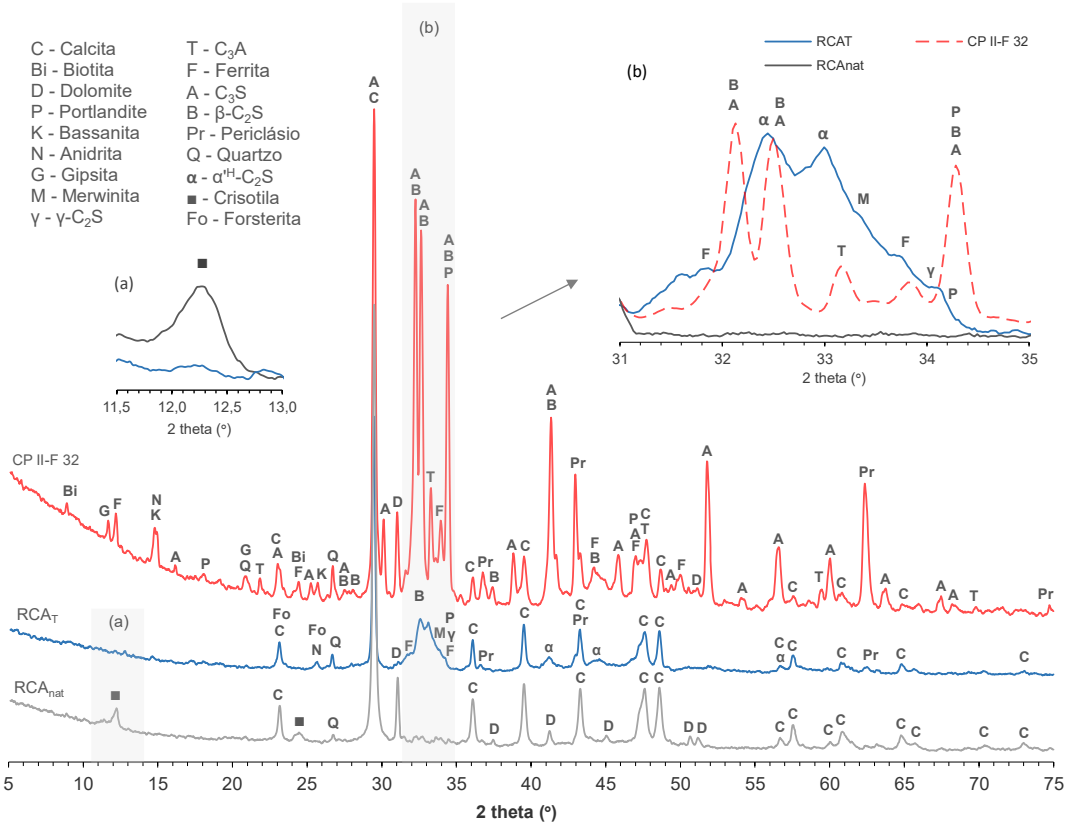


Figura 1 – Difratograma de raios-X do CP II-F 32, RCA_T e RCA_{nat}, mostrando a (a) desidroxilação da crisotila e a (b) cristalização das diferentes fases nos materiais selecionados.

Para Link et al. (2015) a formação do α'_H-C_2S em baixa temperatura pode ser atribuída a decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Serpell; Zunino, 2017), em função da sua elevada área superficial e refinamento do tamanho dos cristalitos presentes nos resíduos de finos cimentícios. Além disso, Real et al. (2020) descrevem que estes nesossilicatos se formam essencialmente entre 600°C e 800°C, em

consonância com a temperatura estabelecida no tratamento ótimo empregado no presente estudo (ver Figura 1b).

Ademais, para validar a inertização do tratamento ótimo estabelecido por Carneiro et al. (2021), realizou-se a análise da morfologia do RCA (sem e com tratamento térmico) por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para este, utilizou-se um microcópico tipo FEG (field emission gun), da marca FEI, modelo Inspect F50, com tensão de 15 a 20 kV, corrente de 0,96 mA e detetor EDS da marca EDAX e distância de trabalho próxima a 10 mm, além de utlizar o equipamento BAL-TEC BALZERS SCD 050 Sputter Coater para recobrimento das amostras.

Para avaliar a desidroxilação dos grupos funcionais presentes na estrutura da crisotila, foi utilizado a análise de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), empregando um espectrômetro de infravermelho FT-IR Shimadzu, modelo IRTracer-100, com acessório de refletância total atenuada empregando um cristal de seleneto de zinco (ZnSe) com recobrimento em diamante. Os espectros foram analisados na faixa de 600 a 4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1} e 45 varreduras.

2.2 PREPARO DAS PASTAS COM LIGANTE ALTERNATIVO

Para avaliar a comportamento do RCA_T como ligante alternativo no preparo de pastas, utilizou-se a relação água/sólido fixa de 0,60 (em massa), tendo o cimento Portland CP II F-32 com referência (**REF**) e RCA_T (**RT**). As misturas foram produzidas a partir das seguintes etapas: adição da água no pó durante 5 s; (ii) mistura manual com espátula por 50 s; e (iii) dispersão mecânica em um misturador rotativo de alta energia, modelo RT0700C da Makita, a 10.000 rpm por 90 segundos. Para analisar a cinética de hidratação das pastas utilizou-se um calorímetro isotérmico, modelo Calmetrix I-CAL 8000 HPC, com temperatura controlada em 23 °C por 168 h.

Ademais, na análise da resistência à compressão (R_C) das pastas, foram produzidos corpos de prova cúbicos com 20 mm de aresta, curados em câmara úmida a 23 ± 2 °C e umidade relativa igual a 95%. A R_C foi determinada após 1, 3 e 7 dias de cura, utilizando seis corpos de prova de cada formulação. Os ensaios foram executados em prensa universal Instron, modelo 5569, com célula de carga de 50 kN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO RCA_T

A Figura 2b apresenta uma micrografia da seção fraturada da telha de cimento-amianto, obtida através de microscopia eletrônica de varredura, em que se pode observar a presença de feixes fibrosos característicos do amianto distribuídos na matriz cimentícia, semelhantes aos observados por Belardi e Piga (2013), Dias et al. (2008) e Pawełczyk et al. (2017). Verifica-se, também, que as superfícies fraturadas das amostras não apresentaram características preferenciais ou ordenadas dos feixeis fibrosos na estrutura apresentada.

A análise química obtida por EDS, mostra que os altos teores de Mg e Si podem estar associados às fibras de amianto, enquanto parte desses elementos, junto com Ca, Fe, Al e S, correspondem a matriz cimentícia, conforme apresentado na Figura 2a. Vale ressaltar que a amostra, ao ser caracterizada quimicamente por meio da técnica FRX, os elementos identificando estão em consonância com os óxidos detectados na análise química pontual por EDS e por Viani e Gualtieri (2014). Além disso, o tipo mais provável de amianto na presente amostra é a crisotila, por apresentar uma razão molar Mg/Si próximo de 1,5 (Belardi e Piga, 2013).

A morfologia do cimento-amianto tratado termicamente a 800°C é apresentada na Figura 3, onde é possível verificar as alterações na microestrutura do material a partir da degradação da estrutura fibrosa com a quebra longitudinal da micro-fibrilas do amianto crisotila. No entanto, observa-se a presença de partículas quase exclusivamente retas e de menor comprimento em relação ao material de partida. Para Iwaszko (2019), as fibras perdem sua flexibilidade e tornam-se quebradiças. Este fenômeno pode ser explicado pela remoção da água quimicamente combinada (íons OH^-) da estrutura cristalina da crisotila.

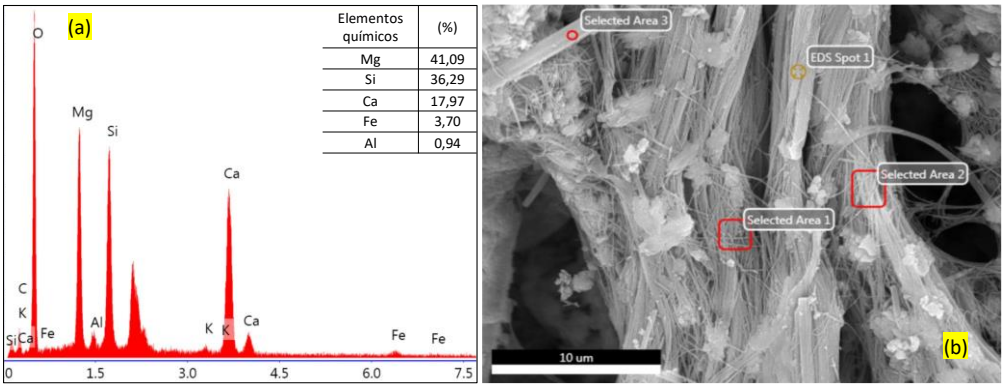


Figura 2 - Micrografia da seção fraturada da telha de cimento amianto obtida através de microscopia eletrônica de varredura e respectivo resultado da análise química por EDS.

De acordo com Kusiorowski et al. (2024), as fases geradas após as transformações térmicas com a calcinação das fibras de amianto tendem a manter o mesmo arranjo cristalino, apesar de sofrerem modificação completa da estrutura em escala molecular (ou seja, a pseudomorfose), como pode ser observado na Figura 2a. Tais fatores colapsaram os feixes microfibrilados em partículas alongadas com morfologia estriada e quebradiças. Ademais, verifica-se ainda que a clivagem das fibrilas da crisotila paralela ao eixo da fibra presente na seção fraturada da telha de cimento-amianto foi totalmente transformada após o tratamento em um intercrescimento de cristais subesféricos de silicato recém formados (Gualtieri *et al.*, 2008).

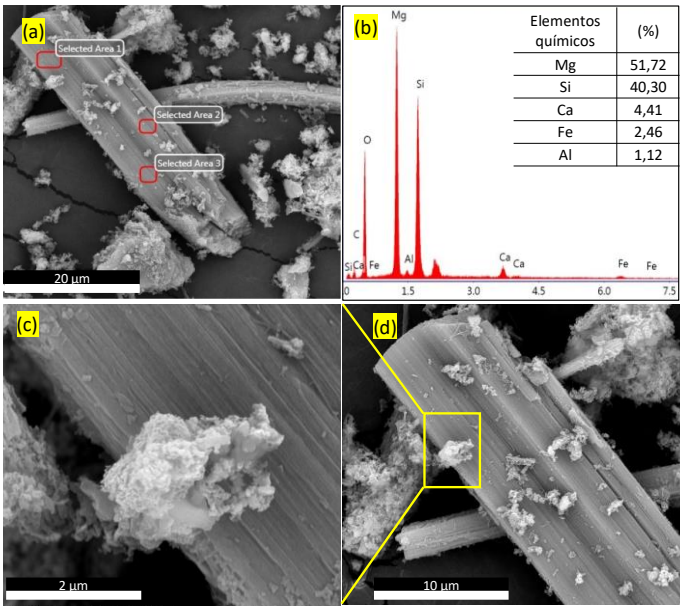


Figura 3 - Micrografia da seção fraturada da telha de cimento amianto tratada termicamente obtida na microscopia eletrônica de varredura e respectivo resultado da análise química por EDS.

Este resultado pode ser validado através da análise de Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), que mostra a ausência das bandas em 3680-3640 cm^{-1}, características da crisotila, no espectro do RCA_T. Isso evidencia a desidroxilação da crisotila, não sendo possível identificar as bandas típicas de estiramento interno e externo das hidroxilas ($O\text{-}H^-$) nas ligações Mg-OH da crisotila (Iwaszko *et al.*, 2018; Kusiorowski *et al.*, 2015). Nota-se ainda que as bandas em 3442-3430 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramento simétrico (υ_1) e assimétrico (υ_3) da ligação O-H presentes nas moléculas de H_2O (Borges *et al.*, 2023).

Observa-se na Figura 4 que as bandas em 2983-2875 cm^{-1}, 1550-1350 cm^{-1} e em 875 cm^{-1} (Hughes; Fletcher; Hall, 1995; Ylmén *et al.*, 2009), correspondem ao υ_3 e as vibrações de deformação no plano (υ_2) do CO_3^{-2} (Colangelo *et al.*, 2011), indicando a presença de carbonatos ($CaCO_3$) nos resíduos de cimento-amianto (RCA). De acordo com Colangelo et al. (2011) as bandas centradas em 1150 e 700 cm^{-1} são dadas as vibrações υ_3 e a deformação fora do plano (υ_4) dos sulfatos (SO_4^{-2}). Nota-se também que os picos em 1100-900 cm^{-1} são devidos as vibrações de estiramento Si-O-Si na rede de sílica (Kusiorowski *et al.*, 2015). Para Iwaszko (2019), as bandas centradas em 1016 cm^{-1} e 966 cm^{-1} são características da crisotila. Ramachandran e Beaudoin (2001) descrevem que a banda localizada em 970 cm^{-1} corresponde ao C-S-H dada ao modo υ_3 (Si-O).

No espectro do RCA_T verifica-se a presença da banda em 885 cm^{-1} característica da forsterita (Mg_2SiO_4) a partir das vibrações de estiramento do SiO_4 (Jolicoeur; Duchesne, 1981). Iwaszko (2019) relata que este silicato de magnésio anidro é cristalizado a partir da completa desidroxilação da crisotila em temperatura superior a 700 °C.

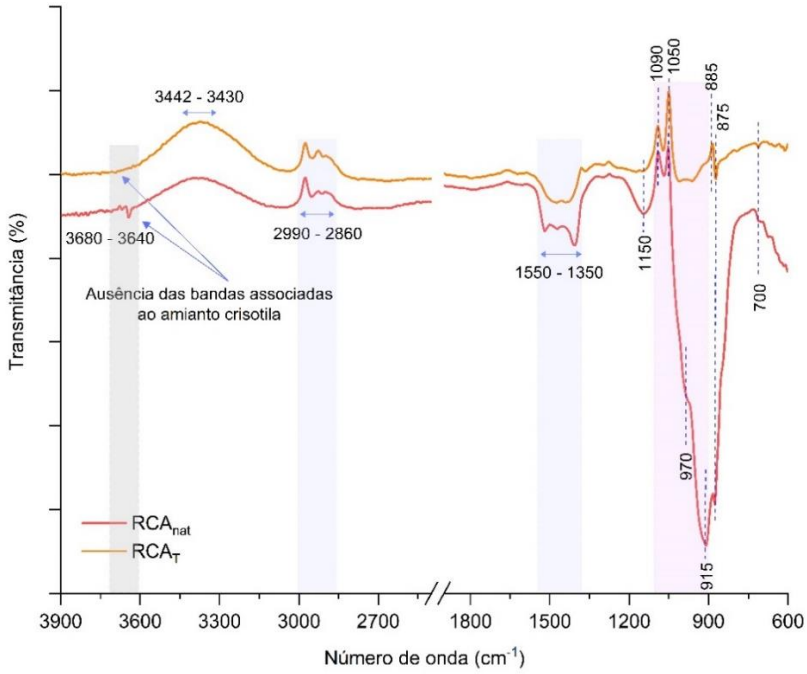


Figura 4 – Análise de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do resíduo de cimento aminto in natura (RCA_{nat}) e o resíduo tratado termicamente (RCA_T).

3.2 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DAS PASTAS

Nas curvas apresentadas na Figura 5a nota-se que o fluxo máximo de calor da mistura RT, nos instantes iniciais, atingiu valor cerca de 20 vezes superior ao comparar com a pasta REF à mesma relação A/L (água/ligante igual a 0,60). Este fenômeno nos RCA_T calcinados a 800 °C pode ser explicado pela alta

área superfícial, instabilidade dos produtos desidratados e a reação de hidratação do CaO altamente exotérmica. Este efeito pode ser observado nos cimentos reciclados termoativados (RC) por Shui et al., (2009) e Wang, Mu e Liu (2018). Para Angulo et al. (2022), em RC calcinado a 650 °C, mais de 50% do calor acumulado relaciona-se as reações envolvendo o CaO. Para a pasta REF, a taxa de calor está relacionado a molhagem das partículas, dissolução de íons e precipitação da etringita ($C_3A.3CaSO_4.32H_2O$) (Joseph et al., 2019).

Na sequência, observam-se os estágios de indução, aceleração e desaceleração nas misturas REF e RT, porém, em períodos diferentes. Segundo Juilland et al. (2010) o período de indução em misturas REF pode estar associada à liberação de íons em solução durante a reação inicial inibirem a dissolução adicional das partículas de C_3S, além dos defeitos cristalográficos, nucleação da portlandita e C-S-H. Bullard et al. (2011) relatam também a formação de barreira de difusão na superfície do C_3A pela etringita, a adsorção de íons sulfatos na superfície do C_3A e uma camada de gel formada pela fase AFm presente na superfície do grão do C_3A na ausência de sulfato de cálcio. Para Scrivener *et al.* (2023), a hipótese da dissolução do C_3S representa a explicação mais plausível para o período de indução.

Por outro lado, o longo período de indução inerente a pasta RT pode estar associado ao elevado grau de reidratação das misturas contendo o resíduo de cimento-amianto tratado termicamente . Shui *et al.* (2009) relatam na análise de reidratação de cimento, que após 1 dia de cura o grau de reidratação foi de aproximadamente 70%, devido a rápida formação por ação da água quimicamente combinado ao gel C-S-H, semelhante à obsevada em estruturas desidratadas de hidróxidos duplos lamelares (LDH) (Forano *et al.*, 2013).

Na Figura 5, nota-se o período de acerelação para o REF com a formação do C-S-H externo (na superfície do grão do cimento) e portlandita (Winter, 2012) geraram um fluxo de calor máximo igual a 3,40 mW/g. Já na mistura RT o período de indução e aceleração foram mais prolongados com um fluxo de calor de hidratação 6,6 vezes menor e a indução 5 vezes maior em relação ao REF (ou seja, ocorreu por volta das 4,5 h e somente após 12,5 h no RT).

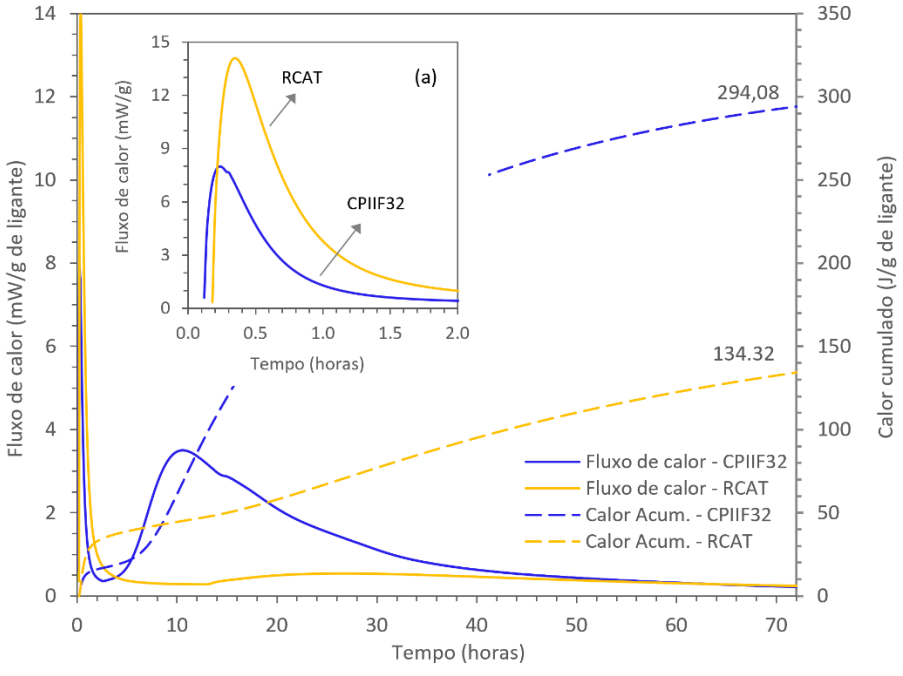


Figura 5 – Ilustração do fluxo de calor e calor acumuluado das pastas com CP II F-32 e RCA_T por 72 horas, a) pico acentuado das reações iniciais.

Alem disso, percebe-se na Figura 5 que o calor acumulado em 3 dias na mistura com REF foi 2,2 vezes maior que RT, correpondendo a ~45% do calor total do REF, em consonância com (Angulo et al., 2022). Nota-se ainda que o calor acumaldo do RT foi superior ao REF nas primeiras 9 h de hidratação, indicando o elevado grau de reidratração do RCA_T, sendo aproximadamente 9 vezes superior ao calor acumulado liberado no reidratação de cimento desenvolvido por (Bogas et al., 2022). Assim, entender este fenômeno pode ser importante à previsão de tensões de origem térmica e de patologias associadas a formação de compostos expansivos.

A Figura 6 apresenta a resistência à compressão das pastas de referância (REF) e de RCA_T (RT) com relação A/L igual a 0,60. Nota-se que as misturas REF e RT tiveram resultandos similares em 1 e 3 dias de hidratação, porém, aos 3 dias a pasta RT apresentou uma resistência 13% superior ao REF. Este efeito pode ser explicado pela despolimerização do C-S-H com a cristalização do polimorfo α'_H-C_2S de alta reatividade, ao tratar termicamente o RCA_{nat} a 800 °C, sendo responsável pelo desenvolvimento da resistência à compressão (Serpell; Zunino, 2017). Além disso, esta despolimerização do C-S-H quebras as longas cadeias de silicatos em partículas menores, refletindo no aumento da área superficial. Tais fatores contribuem à liberação de calor por meio da reidratação do C-S-H a partir do silicato α'_H-C_2S, denominado por Angulo *et al.* (2022) de efeito memoria.

Além disso, observa-se na Figura 6 a redução em 54% do calor acumulado à pasta com RCA_T aos 3 dias quando comparado como o REF, além de melhorar a resistência à compressão. Uma hipótese para este fenômeno seria a densificação da matriz a partir da melhor formação dos produtos hidratados, reduzindo os defeitos na microestrutura e aumentando a coesão intera entre as partículas. Verifica-se ainda umm forte correlação entre a resistência à compressão verus calor acumulado para as misturas REF e RT.

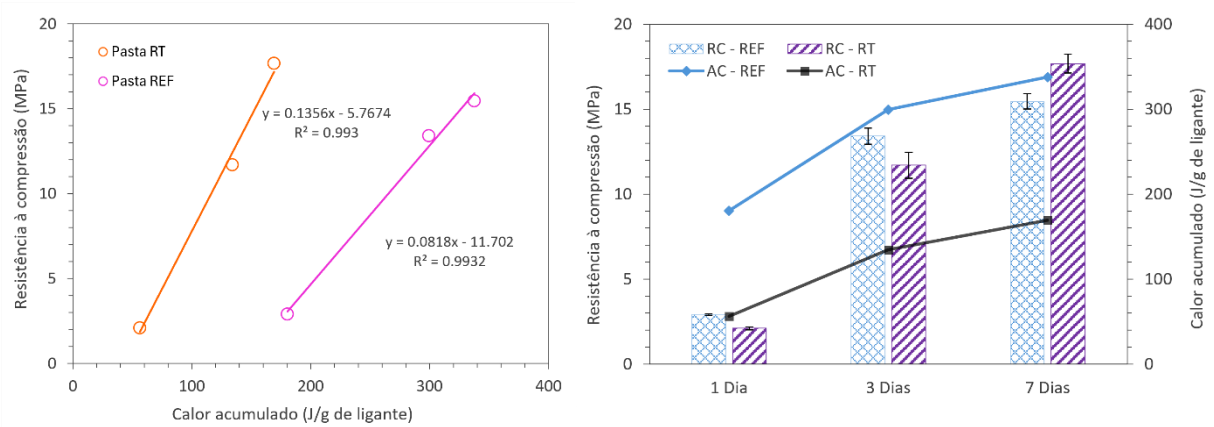


Figura 6 – Resistência à compressão das pastas com RCA_T (RT) e cimento Portland CP II-F 32 (REF).

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma análise complementar na validação do tratamento ótimo estabelecido por Carneiro et al. (2021) através de análise de FTIR e MEV do resíduo de cimento-amianto tratado termicamente (RCA_T). Além disso, foi realizado uma avaliação da cinética de reidratação do RCA_T observando seu potencial de ser utilizado como ligante alternativo. Observa-se que o tratamento a 800°C, por 1 hora e 5 kg de resíduo foi suficiente para desidroxilizar por completo a fibras de amianto presentes nos RCA_T. Nota-se que estes parâmetros possibilitaram a formação da forsterita, embora não seja identificada na análise de difração de raios-X.

Percebe-se ainda que a cinética de hidratação da mistura com RCA_T difere da pasta com CP II-F 32, com um calor acumulado 2,2 vezes menor, porém, este ligante alternativo melhorou em 20% a resistência à compressão da pasta. Tais fatores podem estar associados ao elevado percentual de α'_H-C_2S nos RCA_T, já que este representa o polimorfo mais reativo do silicato dicálcico.

Pode ser observado também que as características físico-quimicas e mineralógicas do RCA_T podem representar uma alternativa ao cimento Portland, tendo em vista suas limitações inerentes ao manejo e acessibilidade aos resíduos. Nesse sentido, faz-se necessário estudos mais aprofundados a fim de entender melhor a cinética de hidratação envolvendo os resíduos de cimento-amianto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Processo n° 309270/2022-7; Processo n° 404262/2023-6). Os autores também agradecem o Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME) da Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS

ANGULO, Sergio C. *et al.* The role of calcium silicates and quicklime on the reactivity of rehydrated cements. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127625, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO (ABREA). **Saúde ou emprego? O dilema do amianto, que fez Goiás desafiar STF**. Disponível em: https://abrea.org.br/notícias/publicações/347-saúde-ou-emprego-o-dilema-do-amianto,-que-fez-goiás-desafiar-stf-2.html. Acesso em: 13 mai. 2024.

BELARDI, G.; PIGA, L. Influence of calcium carbonate on the decomposition of asbestos contained in end-of-life products. **Thermochimica Acta**, v. 573, p. 220–228, 2013.

BOGAS, José Alexandre *et al.* Hydration and phase development of recycled cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 127, p. 104405, 2022.

BORGES, Roger *et al.* A Mechanochemical Route to Magnesium/Calcium Citrate Formation for Chrysotile/Asbestos Cement Correct Disposal as Agricultural Input. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, n. 7, p. 2389–2399, 2023.

CARNEIRO, Gessivaldo O. *et al.* One-part alkali-activated binder produced from inertized asbestos cement waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 367, p. 132966, 2022.

CARNEIRO, Gessivaldo O. *et al.* Thermal treatment optimization of asbestos cement waste (ACW) potentializing its use as alternative binder. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, p. 128801, 2021.

COLANGELO, F. *et al.* Treatment and recycling of asbestos-cement containing waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 195, p. 391–397, 2011.

DIAS, C. M. R. *et al.* Long-term aging of fiber-cement corrugated sheets – The effect of carbonation, leaching and acid rain. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 255–265, 2008.

FLANAGAN, D. M. **Asbestos. Science for a changing world**, p. 26–27, s/n, 2019.

FLANAGAN, D. M. **Asbestos. Science for a changing world**, p. 15–16, s/n, 2024.

FORANO, C. *et al.* Chapter 14.1 - Layered Double Hydroxides (LDH). *In*: BERGAYA, Faïza; LAGALY, Gerhard (org.). **Developments in Clay Science**: Handbook of Clay Science. v. 5, p. 745–782, 2013.

GLEICHMAR, Gunthersleben Gert *et al.* **Process of treatment and environment-friendly utilization of asbestos-cement products**. Depositante: United States Patent. 5.676.750. Depósito: 14 out. 1997. Concessão: jan. 1998.

GUALTIERI, Alessandro F. *et al.* Recycling of the product of thermal inertization of cement-asbestos in geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 47–51, 2012.

GUALTIERI, A. F. *et al.* The transformation sequence of cement–asbestos slates up to 1200 °C and safe recycling of the reaction product in stoneware tile mixtures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 563–570, 2008.

GUALTIERI, A. F.; BOCCALETTI, M. Recycling of the product of thermal inertization of cement–asbestos for the production of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3561–3569, 2011.

HUGHES, Trevor L; FLETCHER, Philip; HALL, Christopher. Determining Cement Composition by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. v. 2, p. 91–104, 1995.

IWASZKO, Józef. Making asbestos-cement products safe using heat treatment. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, p. e00221, 2019.

IWASZKO, Józef *et al.* Structural and microstructural aspects of asbestos-cement waste vitrification. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 195, p. 95–102, 2018.

IWASZKO, Józef; ZAWADA, Anna; LUBAS, Małgorzata. Influence of high-energy milling on structure and microstructure of asbestos-cement materials. **Journal of Molecular Structure**, v. 1155, p. 51–57, 2018.

JOLICOEUR, Carmel; DUCHESNE, Daniel. Infrared and thermogravimetric studies of the thermal degradation of chrysotile asbestos fibers: evidence for matrix effects. **Canadian Journal of Chemistry**, v. 59, n. 10, p. 1521–1526, 1981.

JUILLAND, Patrick *et al.* Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 6, p. 831–844, 2010.

KUSIOROWSKI, Robert *et al.* Structural Characterisation of End-of-Life Cement–Asbestos Materials from Lithuania. **Fibers**, v. 12, n. 4, p. 37, 2024.

KUSIOROWSKI, Robert *et al.* Utilisation of cement-asbestos wastes by thermal treatment and the potential possibility use of obtained product for the clinker bricks manufacture. **Journal of Materials Science**, v. 50, n. 20, p. 6757–6767, 2015.

KUSIOROWSKI, Robert; ZAREMBA, Teresa; PIOTROWSKI, Jerzy. Influence of the type of pre-calcined asbestos containing wastes on the properties of sintered ceramics. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 422–429, 2016.

KUSIOROWSKI, R.; ZAREMBA, T.; PIOTROWSKI, J. The potential use of cement–asbestos waste in the ceramic masses destined for sintered wall clay brick manufacture. **Ceramics International**, v. 40, n. 8, Part A, p. 11995–12002, 2014.

LIGABUE, Maria Laura *et al.* Recycling of thermally treated cement-asbestos for the production of porcelain stoneware slabs. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119084, 2020.

LINK, T. *et al.* Reactivity and phase composition of Ca2SiO4 binders made by annealing of alpha-dicalcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 131–137, 2015.

OBMIŃSKI, Andrzej; JANECZEK, Janusz. The effectiveness of asbestos stabilizers during abrasion of asbestos-cement sheets. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118767, 2020.

PAWEŁCZYK, Adam *et al.* Chemical elimination of the harmful properties of asbestos from military facilities. **Waste Management**, v. 61, p. 377–385, 2017.

RAMACHANDRAN, V.S.; BEAUDOIN, J.J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**. Park Ridge, NJ Norwich, NY: Noyes Publications William Andrew Pub, 2001.

REAL, Sofia *et al.* Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 3937, 2020.

SANTANA, Henrique A. *et al.* Asbestos-cement wastes as supplementary precursors of NaOH-activated binders. **Construction and Building Materials**, v. 364, p. 129921, 2023.

SANTOS, Tiago A.; CILLA, Marcelo S.; RIBEIRO, e Daniel V. Use of asbestos cement tile waste (ACW) as mineralizer in the production of Portland cement with low CO2 emission and lower energy consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130061, 2022.

SCRIVENER, Karen L. *et al.* Advances in hydration and thermodynamics of cementitious systems. **Cement and Concrete Research**, v. 174, p. 107332, 2023.

SERPELL, Ricardo; ZUNINO, Franco. Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of *α*'H-C2S. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 398–412, 2017.

SHUI, Zhonghe *et al.* Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 531–537, 2009.

SPASIANO, Danilo *et al.* Sustainable bio-hydrothermal sequencing treatment for asbestos-cement wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 364, p. 256–263, 2019.

SPASIANO, D.; PIROZZI, F. Treatments of asbestos containing wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 82–91, 2017.

VIANI, Alberto; GUALTIERI, Alessandro F. Preparation of magnesium phosphate cement by recycling the product of thermal transformation of asbestos containing wastes. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 56–66, 2014.

VIANI, Alberto; GUALTIERI, Alessandro F. Recycling the product of thermal transformation of cement-asbestos for the preparation of calcium sulfoaluminate clinker. **Journal of Hazardous Materials**, v. 260, p. 813–818, 2013.

WANG, Junjie; MU, Mulan; LIU, Yongliang. Recycled cement. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 1124–1132, 2018.

WITEK, Jerzy; KUSIOROWSKI, Robert. Neutralization of cement-asbestos waste by melting in an arc-resistance furnace. **Waste Management**, v. 69, p. 336–345, 2017.

YLMÉN, Rikard *et al.* Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 433–439, 2009.

YVON, Yan; SHARROCK, Patrick. Characterization of Thermochemical Inactivation of Asbestos Containing Wastes and Recycling the Mineral Residues in Cement Products. **Waste and Biomass Valorization**, v. 2, n. 2, p. 169–181, 2011.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COM ELEVADO TEOR DE FINOS EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO AGREGADO MIÚDO PARA PRODUÇÃO DE BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO

Luis Felipe dos Santos Lara[a], Laís Resende [b], Kamylla Cardozo Souza[c], Paulo Henrique Ribeiro Borges [d], Augusto Cesar da Silva Bezerra[e]

[a] Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Av. Amazonas 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte 30510-000, Brasil. E-mail: luislara@cefetmg.br

[b] VALE S.A. lais.resende@vale.com

[c] VALE S.A. kamylla.souza@vale.com

[d] Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Av. Amazonas 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte 30510-000, Brasil. E-mail: paulo.borges@cefetmg.br

[e] Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Av. Amazonas 5253 - Nova Suíça, Belo Horizonte, Belo Horizonte 30510-000, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1670-2376. E-mail: augustobezerra@cefetmg.br

RESUMO

A demanda por materiais de construção tem impulsionado a busca por alternativas inovadoras na indústria da construção civil. Nesse cenário, o rejeito de minério de ferro (RMF), um subproduto relegado a barragens e pilhas, emerge como potencial material alternativo. Este artigo investigou a utilização do RMF como agregado miúdo em substituição à areia para produção de blocos de pavimentação. Foram avaliadas as propriedades mecânicas, macroestruturais e de durabilidade, assim como os aspectos ambientais e projeção de consumo de RMF. O estudo avaliou uma matriz experimental contendo 27 misturas. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo que as variáveis de dosagem com maior impacto nas propriedades mecânicas foram o teor da umidade e o teor de pedrisco. Os resultados de lixiviação foram satisfatórios não apresentando riscos ambientais. A análise da projeção de consumo de RMF para produção de concreto indicou que a construção civil é capaz de absorver o RMF produzido. Ao alinhar-se aos princípios da economia circular, esse estudo oferece uma solução sustentável do RMF e promove a eficiência na utilização de recursos, contribuindo assim para a construção de estruturas eco eficientes, fornecendo insights para profissionais da construção civil, pesquisadores e formuladores de políticas interessados em impulsionar práticas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Economia circular, Rejeito de minério de ferro, Sustentabilidade, pavimento intertravado.

1 INTRODUÇÃO

A economia mundial tem enfrentado crescentes desafios relacionados à sustentabilidade e à gestão eficiente de resíduos (LINH; SALOMONE; NGUYEN, 2024). Estima-se que os recursos mundiais de minério de ferro bruto sejam superiores a 800 bilhões de toneladas, contendo mais de 230 bilhões de toneladas de ferro (USGS, 2023). O Brasil tem um papel de destaque no cenário da mineração possuindo cerca de 19% das reservas mundiais de minério de ferro, e sendo o segundo maior produtor (SANGINE; KRISANDA, 2023). Entretanto, a exploração de minério de ferro, apesar do impacto benéfico à economia, está associada a uma problemática ambiental resultante das extensas áreas naturais alteradas e do substancial volume de rejeitos gerados no decorrer dos processos de extração e beneficiamento (GOUVEIA et al., 2023). A geração de RMF é uma realidade desafiadora, demandando abordagens inovadoras para a utilização responsável desse subproduto (OTIENO; SHUKLA, 2023). Calcula-se que, em média, a produção de 0,4 tonelada de rejeito ocorre para cada tonelada de minério de ferro beneficiado, podendo em determinadas situações, equivaler à quantidade da substância gerada (VILLELA, 2016). Acredita-se que o beneficiamento de minério de ferro gera anualmente cerca de 1,4 bilhões de toneladas de rejeito em todo o mundo (SALDANHA et al., 2023). Os rejeitos e efluentes resultantes da mineração de ferro, durante várias décadas, vêm sendo depositados nas proximidades das jazidas na forma de barragem ou pilhas (OTIENO; SHUKLA, 2023). Estima-se que no Brasil existem mais de 900 barragens de RMF e que no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais exista aproximadamente 345 barragens de resíduo sendo que apenas 213 estão sendo monitoradas no sistema da Agência Nacional de Mineração, sendo que o estado tem um papel de destaque na indústria mineral por conter parte das reservas de ferro do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM), 2023). Pesquisas utilizando o RMF na construção civil vem sendo desenvolvidas em diversas áreas (CARMIGNANO et al., 2021; ZHAO et al., 2021). Muitos estudos foram encontrados, tal como para material cimentício suplementar (MAGALHÃES et al., 2018; LING et al., 2022; XU et al., 2023), agregado para argamassa (GONG et al., 2022; KONG et al., 2023), agregado para concreto (MA et al., 2023; ZHU et al., 2023), geopolímero (CARVALHO et al., 2023; THEJAS; HOSSINEY, 2022), telhas (CARVALHO EUGÊNIO et al., 2021; MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO et al., 2023), pavimento intertravado drenante (LI et al., 2023), ladrilho hidráulico (FONTES et al., 2021), tijolos (BEULAH et al., 2021), camadas de pavimentação (CAO et al., 2022; JING et al., 2023) e polímeros (JIANG et al., 2022). O elevado volume de RMF sem destinação, somada a alta demanda de concreto necessária para o desenvolvimento econômico e social, corrobora para estudos que minimizem os impactos causados pela produção do concreto e otimizem a utilização do RMF. Esta pesquisa realizou um estudo que explorou a viabilidade técnica e ambiental da substituição total do agregado miúdo convencional por RMF com alto teor de finos para produção de blocos de pavimentação, sendo uma abordagem que pode conferir uma destinação nobre ao RMF e oferecer uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável consolidando um passo importante para práticas construtivas mais sustentáveis e eficientes. Para avaliar o desempenho das misturas contendo RMF foi implementada uma Fábrica de Pré-Moldados na Mina do Pico, Itabirito (MG) pela empresa Vale, com capacidade anual de produção de até 3,8 milhões de unidades de pré-moldados sendo operada em sua totalidade somente por mulheres. Com o auxílio da Fábrica foi possível analisar o desempenho das misturas propostas em uma escala industrial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais empregados nesta pesquisa incluíram o Rejeito de Minério de Ferro (RMF) como agregado miúdo, pedrisco como agregado graúdo, Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-

ARI) como aglomerante e água potável. Não foram empregados plastificantes e nem adições para evitar influências externas e permitir análise da produção dos blocos em função do RMF. O RMF foi obtido em mina localizada em Itabirito, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. As amostras de RMF foram coletadas ao longo das pilhas, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 10007 (ABNT, 2004), no período entre os anos 2021 e 2022. É importante salientar que o rejeito utilizado não passou por nenhum tipo de tratamento, sendo empregado em sua forma natural.

2.2 MÉTODOS

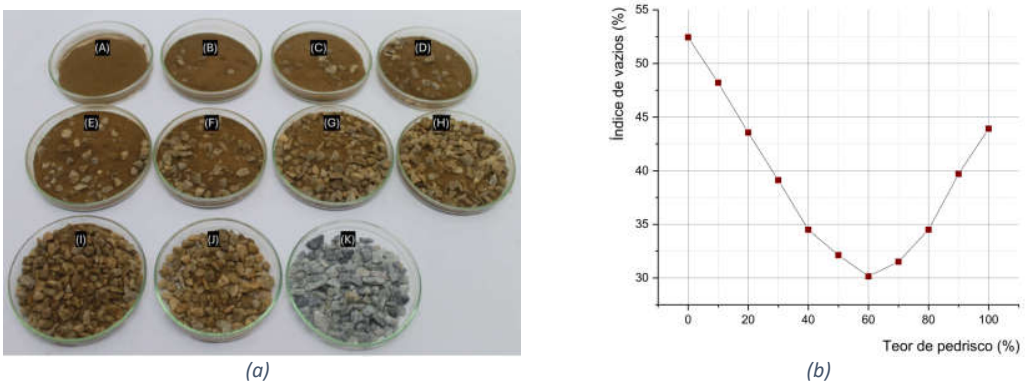
2.2.1 Métodos de caracterização do RMF

A composição química foi determinada utilizando Espectrômetro de raios X por energia dispersiva Shimadzu EDX – 720, esse ensaio foi utilizado com objetivo de determinar qualitativamente e semi-quantitativamente os elementos químicos presentes no RMF. O ensaio de perda ao fogo foi realizado no RMF de modo a se obter a perda de massa após aquecimento em forno mufla a 950°C. A amostra de rejeito foi submetida ao ensaio de área superficial especifica por adsorção no equipamento NOVA 2200 e da marca Quantachrome, sendo os cálculos realizados automaticamente pelo software Quantachrome NovaWin através do método Brunauer, Emmett e Teller (BET). As amostras foram tratadas termicamente durante 24 horas a 150°C e o gás utilizado como adsorbato foi o nitrogênio. As fases cristalinas foram identificadas por difração de raios X (DRX) a partir da conferência e comparação com as difrações padrões. As amostras de RMF foram maceradas até a forma de pó (<75 µm). Utilizou-se o equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000 com tubo de raios X de cobre (Cu), tensão de 40,0 kV, corrente elétrica de 30,0 mA e varredura por passo de 0,020 θ variando de 5 a 90° com tempo de leitura de 5 s/passo. A distribuição granulométrica do RMF foi determinada por peneiramento nas peneiras de abertura 4,75 mm, 2,36 mm,1,18 mm, 600 m, 300 µm, 150 µm e 75 µm. A distribuição do tamanho de partículas da fração fina (passante na abertura de 75 µm) foi obtida pela técnica de difração de laser utilizado ultrassom durante 240 segundos para dispersar a amostra e grau de obscuração de 15%, utilizou-se o equipamento da marca Cilas, modelo 1090.

2.2.2 Planejamento experimental

Os blocos foram produzidos com substituição total do agregado miúdo pelo RMF. A norma brasileira de peças de concreto para pavimentação descreve como requisito resistência característica à compressão (f*p*k) superior a 35 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha, e superior a 50 MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados NBR 9781 (ABNT, 2013). Para compreender o arranjo entre o agregado miúdo e o graúdo e estabelecer uma proporção ideal na mistura, empregou-se o método do menor volume de vazios. Esse método envolve a comparação das massas compactadas de misturas de RMF e pedrisco que se encaixam em um recipiente padronizado, com volume conhecido visando encontrar a proporção com menor volume de vazios (ABCP, 1995). Para tanto foi realizado onze misturas contendo variações de 0 a 100% de RMF e pedrisco, conforme apresentado na Figura 1 (a), sendo (A) 100% RMF/ 0% Pedrisco, (B) 90% RMF/ 10% Pedrisco, (C) 80% RMF/ 20% Pedrisco, (D) 70% RMF/ 30% Pedrisco, (E) 60% RMF/ 40% Pedrisco, (F) 50% RMF/ 50% Pedrisco, (G) 40% RMF/ 60% Pedrisco, (H) 30% RMF/ 70% Pedrisco, (I) 20% RMF/ 80% Pedrisco, (J) 90% RMF/ 10% Pedrisco, (K) 0% RMF/ 100% Pedrisco. Foram calculados os índices de vazios para onze combinações de RMF e pedrisco, conforme apresentado na Figura 1 (b). Observa-se que a mistura mais compacta, ou seja, com menor volume de vazios ocorreu com 40% de RMF e 60% de pedrisco. Com objetivo de entender melhor o impacto das variáveis de dosagem foi realizado um programa experimental contendo 27 traços. Destes 27 traços, o teor de

umidade da mistura variou em 6, 7 e 8%, a relação de agregados/cimento (m) variou em 3, 4 e 5 e o teor de pedrisco da mistura variou em 50, 60 e 70%.



(a) *(b)*

Figura 1 - Misturas de RMF e pedrisco em diferentes proporções(a), Teor de pedrisco x índice de vazios (b)

2.2.3 Produção das peças

O fluxo do processo, da produção à instalação, é apresentado na Figura 2. Os blocos foram produzidos em uma planta industrial de artefatos de concreto com elevada grau de automatização, onde destaca-se a estrutura: área de estoque de insumos (1), laboratório para controle tecnológico dos insumos (2), sistema de balanças para dosagem do concreto (3), misturador planetário (4), vibroprensagem (5), estantes para armazenamento e cura das peças (6), laboratório para controle tecnológico das peças produzidas (7), pátio para estocagem da produção (8) e, por fim, a instalação do produto (9).

Figura 2 - Fluxograma da produção do pavimento intertravado de 16 faces com RMF

2.2.4 Métodos de ensaio dos pavimentos intertravados produzidos com substituição total da areia convencional por RMF

O ensaio visual foi adotado visando a abordagem mais simples dentre os métodos não destrutivos aplicáveis a uma amostra. Por meio desse procedimento foi possível avaliar a macroestrutura e

coloração dos pavimentos intertravados produzidos com todos os traços. As imagens foram capturadas utilizando uma câmera fotográfica Canon do modelo EOS REBEL T3. A configuração da câmera foi ajustada para obter a melhor qualidade de imagem, com o uso do flash automático luminoso. Para a determinação da resistência à compressão dos blocos com substituição total de areia por RMF, os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias. Para execução utilizou-se o Equipamento Universal de Ensaios da marca EMIC e os softwares TESC e Vmaq com velocidade de carregamento equivalente a (550 ± 200) KPa/s até a ruptura da peça. Foi adotado o maior resultado de resistência à compressão para cada traço ensaiado aos 28 dias em MPa dos 10 corpos de prova ensaiados para cada um dos 27 traços segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Para realização do ensaio de resistência ao ataque ácido e de lixiviação foram selecionados dois traços para realização do ensaio, sendo o traço que apresentou a menor resistência à compressão com teor de pedrisco de 0,5; relação agregado/cimento igual a 3 e o teor de umidade da mistura igual a 6% e o traço que apresentou a maior resistência à compressão com teor de pedrisco de 0,7; relação agregado/cimento igual a 5 e o teor de umidade da mistura igual a 8%. Para avaliar a resistência ao ataque ácido, após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova foram secos em estufa, pesados e submersos em solução de ácido sulfúrico a 5% (v/v) em recipientes separados. Após 7 dias, as amostras foram lavadas, escovadas e secas em estufa e novamente pesadas para determinação da perda de massa. O ensaio de lixiviação avaliou a liberação de substâncias solúveis a partir do material dos blocos produzidos. Essas substâncias podem incluir íons, como os provenientes do cimento, do RMF ou outros componentes presentes no concreto. A espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) foi utilizado para detectar as substâncias tóxicas. O resultado do ensaio de lixiviação foi importante para determinar a adequação do concreto em relação aos limites máximos presentes nas normas ambientais e à segurança ambiental, especialmente em estruturas que possam entrar em contato com água, solo ou outros meios suscetíveis à lixiviação de substâncias NBR 10005 (ABNT, 2004).

2.2.5 Projeção de consumo do RMF com alto teor de finos

Com o intuito de aprofundar a compreensão acerca dos benefícios decorrentes da aplicação do (RMF) como agregado miúdo para fabricação de concreto, com foco particular na produção de pavimento intertravado, realizou-se uma análise com duas projeções. A primeira projeção relaciona a geração mundial de RMF (%) com a projeção da produção de concreto (milhões de m³), com vistas a contribuir com dados que apresentem qual seria a produção total de concreto necessária para consumir anualmente todo o volume de RMF produzido. A segunda projeção relaciona a geração mundial de RMF (%) com a projeção em extensão de rodovia pavimentada com pavimento intertravado (Km). Para esse estudo foi considerado uma largura de 7 metros para pisa de rolamento e faixa de acostamento de 2,5 metros. Nesse contexto, foi selecionado o traço que obteve a maior resistência à compressão neste estudo (41,82 MPa) para calcular a produção do concreto. Esse traço apresenta o teor de pedrisco de 0,7, a relação de agregados/ cimento igual a 5 e o teor de umidade da mistura igual a 8%. A umidade do RMF não foi considerada, sendo adotada a quantidade de RMF obtida na literatura. A retirada da umidade pode melhorar os dados e otimizar a projeção da utilização do RMF.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO RMF

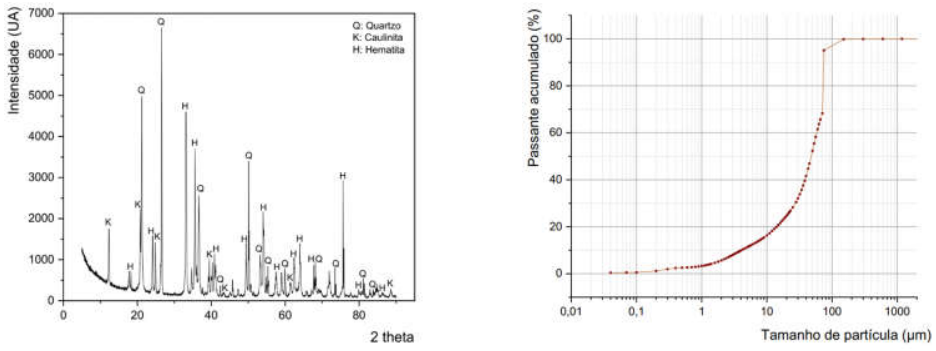
A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas e químicas do RMF. A densidade foi de 3723 Kg/m³, esse valor alto pode ser justificado pelo alto teor de ferro na forma de óxidos (42,92%) observado no FRX. Estudos similares apresentaram densidades próximas ao resultado encontrado, 3426 Kg/m³ (GONG et al., 2022) e 3490 Kg/m³(ALMADA et al., 2023). O módulo de finura foi de 0,09, o que corresponde a

granulometria mais fina do RMF. A massa unitária apresentada foi de 1950 Kg/m³ e área superficial foi de 9,248m²/g, estudos similares utilizando RMF brasileiro apresentaram resultados similares 8,750 m²/g (ALMEIDA et al., 2023). Os resultados da composição química indicam que o rejeito possui como principais componentes o ferro e o silício, o teor de ferro na forma de Fe_2O_3 é de 42,92% e o teor de óxido de silício SiO_2 é de 50,58%. Comparando o RMF desta pesquisa com outros estudos brasileiros, observa-se que a composição é similar, com teores de óxidos de ferro superiores a 40% (ALMADA et al., 2023; CASTRO MENDES et al., 2020; VESCOVI; BEZERRA; POGGIALI, 2023). Para RMF chineses são encontrados teores de ferro menores que 20% (JING et al., 2023; LI et al., 2022; ZHANG et al., 2023a).

Tabela 1 - Propriedades físicas e composição química do RMF

Propriedades físicas	Valores	Composição química	Percentuais (%)
Densidade (Kg/m³)	3723	SiO_2	50,58
Massa unitária (Kg/m³)	1950	Fe_2O_3	42,92
Módulo de finura	0,09	Al_2O_3	3,65
Área superficial específica (m²/g)	9,248	MnO	0,09
		SO_3	0,24
		CaO	0,08
		Perda ao fogo	2,41

A composição mineralógica do RMF verificada no DRX (Figura 3 (a)) demonstrou que o material possui uma elevada cristalinidade, o que sugere um baixo grau de reatividade, assim como apresentado por outras pesquisas na literatura (LIU et al., 2023; MAGALHÃES et al., 2020). As principais fases cristalinas identificadas foram o quartzo, caulinita e hematita. Pesquisas anteriores com RMF encontraram fases cristalinas semelhantes (ALMADA et al., 2023; ALMEIDA et al., 2023; MA et al., 2023). A Figura 3 *(b)* exibe a distribuição granulométrica do RMF, revelando que cerca de 65,83% das partículas possuem dimensões inferiores a 75 µm. Estudos similares apresentaram o D90 (µm) inferior a 75 µm (MAGALHÃES et al., 2020; VESCOVI; BEZERRA; POGGIALI, 2023; WEI et al., 2022; ZHANG et al., 2023b). Conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2022), o uso de material fino que passa pela peneira de 75 µm, não deve exceder 5% para utilização de agregado em concreto. Essa restrição representa um desafio para a incorporação do RMF como agregado em estudos sobre concreto.



(a) (b)

Figura 3 - Fases cristalinas identificadas e distribuição granulométrica do RMF

3.2 ANÁLISE VISUAL DO PAVIMENTO INTERTRAVADO

Os blocos de pavimento intertravado apresentaram uma superfície regular, sem a presença de fissuras nas faces inferior e superior assim como nas paredes laterais. Observam-se arestas regulares com a presença de pequenas rebarbas. Vale a pena ressaltar que esse pavimento intertravado foi produzido utilizando 100% de rejeito em substituição ao agregado miúdo e que não foi utilizado nenhum tipo de aditivo no processo de produção. A cor da peça é marrom escuro, devido a presença do RMF. Pesquisas disponíveis na literatura indicam tons de marrom semelhantes ao encontrado (MAGALHÃES et al., 2020; MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO et al., 2023). Na Figura 4 é apresentado uma foto da peça de pavimento intertravado em duas posições destacando a face superior e laterais, incluindo uma escala de 1 cm para inferir o tamanho da peça.

Figura 4 - Peça de pavimento intertravado separada aleatoriamente para análise visual

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

A resistência à compressão aos 28 dias dos 27 traços é apresentada na Figura 5. Foi observado que o traço do concreto em estudo foi sensível às alterações no teor de umidade da mistura, no teor de pedrisco e na relação agregados/cimento. De modo geral, a resistência à compressão cresceu com o aumento do teor de umidade, com o aumento da relação agregados/cimento e com o aumento do teor de pedrisco. Nota-se que o teor de umidade de 8% apresentou os melhores resultados de resistência à compressão para produção dos blocos vibroprensados indicando que essa umidade possibilitou uma melhor mistura e hidratação do aglomerante. Teores de umidade da mistura superiores a 8% geram excesso de água na mistura e ocasionam problemas no processo de vibro-prensagem das peças. Pesquisas apontam que o concreto produzido com RMF apresenta uma sensibilidade quanto ao teor de umidade da mistura, constatando que um aumento apropriado no fator água/cimento pode melhorar a resistência à compressão, mas proporções excessivamente altas ou baixas podem ter efeitos deletérios (ZHANG et al., 2023b). Os melhores resultados de resistência à compressão foram para os traços que continham a umidade de 8%, a relação agregados/cimento de 4 e 5, e o teor de pedrisco de 60% e 70% sendo respetivamente de 40,63 MPa e 41,82 MPa.

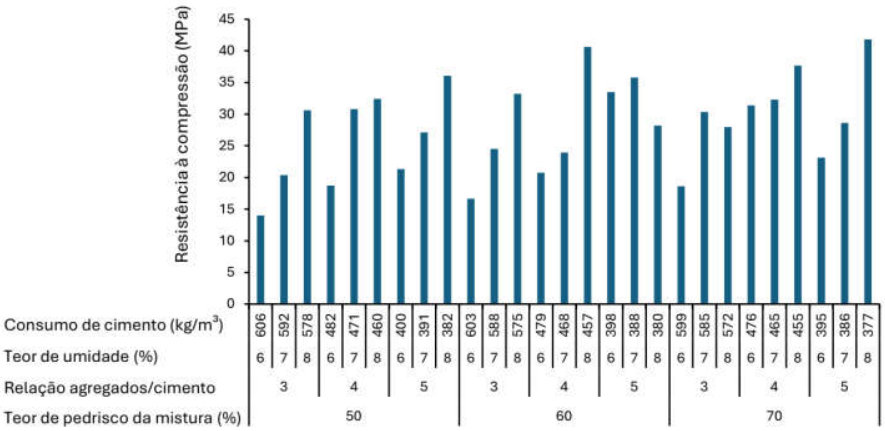


Figura 5 - Resistência à compressão aos 28 dias

3.4 ATAQUE ÁCIDO

Os corpos de prova submetidos ao ataque ácido se mantiveram íntegros e manifestaram um desgaste superficial proveniente da deterioração da argamassa de cobrimento com a exposição dos pedriscos, tornando a superfície irregular. Este fenômeno é característico da corrosão ácida, onde a ação química do ácido provoca a dissolução dos componentes da argamassa, deixando os agregados expostos e resultando em uma textura superficial não uniforme. Na Figura 11 é apresentado o gráfico contendo a perda de massa dos corpos de prova submetidos ao ataque ácido.

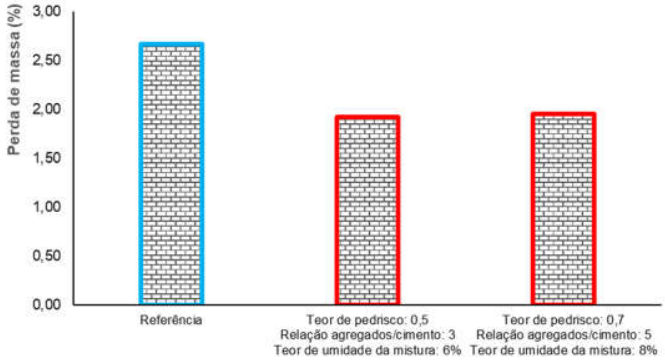


Figura 6 - Perda de massa após ataque ácido

Os corpos contendo RMF apresentaram uma resistência maior ao ataque ácido. Entre os dois traços contendo RMF o resultado foi próximo, demonstrando que a resistência ao ataque ácido não está diretamente ligada à resistência à compressão. Estudos indicam que a adição de RMF aumentou a impermeabilidade das argamassas, melhorando sua durabilidade (ZHANG et al., 2020). Pesquisas utilizando um sistema ternário com RMF, cinza volante e escória de lítio em substituição de até 20% do cimento (0,12%) demonstraram redução significativa na perda de massa se comparado com o concreto referência (2,49%) quando submetidos ao ataque ácido (ZHANG et al., 2023a). De forma contrária, estudo apontou a tendência em aumentar a perda de massa com o aumento da substituição de RMF em comparação ao concreto referência, sendo a perda de massa do concreto de referência de 2,46% e do concreto com 50% de substituição de 4,82% (JAYASIMHA; SUJINI; ANNAPURNA, 2022).

3.5 LIXIVIAÇÃO

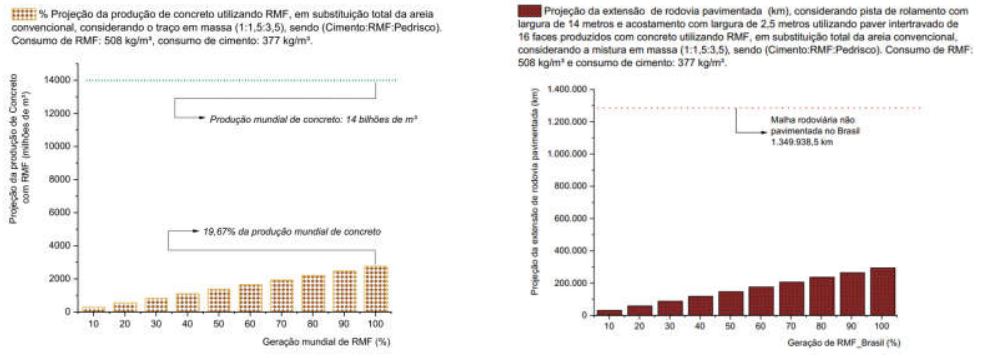
Os dois traços produzidos com RMF em substituição total do agregado miúdo, apresentaram resultados de concentração inferiores ao valor máximo permitido (VPM) NBR 10004 (ABNT, 2004), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Lixiviação de substâncias tóxicas das amostras de pavimento intertravado contendo substituição de 100% de RMF

Parâmetro	Unidade	VMP	Teor de pedrisco:0,5 Relação agregados/cimento: 3 Teor de umidade da mistura: 6%	Teor de pedrisco:0,7 Relação agregados/cimento: 5 Teor de umidade da mistura: 8%
Arsênio Total	mg/L	1,0	<0,001	0,003
Bário Total	mg Ba/L	70,0	0,150	0,220
Cádmio Total	mg Cd/L	0,5	<0,001	<0,001
Chumbo Total	mg Pb/L	1,0	<0,010	<0,010
Cromo Total	mg Cr/L	5,0	0,100	0,110
Fluoreto	mg F-/L	150,0	1,450	2,260
Mercúrio Total	mg/L	0,1	<0,0002	<0,0002
Prata Total	mg Ag/L	5,0	<0,005	0,010
Selênio Total	mg/L	1,0	<0,001	0,001

3.6 PROJEÇÃO DO CONSUMO DE RMF

Na Figura 7 (a) é apresentado a projeção da produção de concreto (milhões de m³) em função da geração mundial de RMF, de 10% a 100%. Pode ser observado que se 100% da geração de RMF fosse utilizada como agregado miúdo para produção de concreto, seriam necessários que apenas 19,67% da produção mundial de concreto utilizassem o RMF. Essa informação evidencia a possibilidade da indústria do concreto utilizar todo o volume de RMF gerado, reduzindo o passivo ambiental existente, reduzindo a extração de recursos naturais não renováveis e por fim corroborando para o desenvolvimento sustentável mundial. Estima-se que no Brasil existam cerca de 1,4 milhões de quilômetros de malha rodoviária não pavimentadas (CNT, 2022). Na Figura 7(b), é apresentado um gráfico que demonstra a relação entre a extensão de rodovias pavimentadas (Km) e a geração de RMF na mineração Brasileira (%). A produção anual de RMF brasileiro é capaz de fornecer material para produção de pavimento intertravado, reduzindo o déficit da malha rodoviária nacional em 21,79%, sendo necessários 4,5 anos de produção de RMF para gerar todo o concreto necessário para pavimentar as estradas não pavimentadas do país. Embora o pavimento intertravado estudado não tenha atingido a resistência característica à compressão (f*p*k) superior a 50 MPa para tráfego de veículos em rodovias, os resultados obtidos demonstram resistência à compressão na ordem de 41,82 MPa, os quais podem ser melhorados com a utilização de aditivos, adições e cura úmida.



(a) (b)

Figura 7 – (a) Projeção da produção de concreto (milhões de m³) x Geração mundial de RMF (%) e (b) Projeção da extensão de rodovia pavimentada (Km) x Geração Brasileira de RMF (%)

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões são: (1) A resistência mecânica indica que a substituição total do agregado miúdo por RMF pode ser uma alternativa viável e sustentável. Os blocos produzidos apresentaram superfície regular, sem fissuras e rebarbas. (2) A resistência à compressão cresceu com o aumento do teor de umidade, da relação agregados/cimento e do teor de pedrisco. Porém, o teor de umidade da mistura, relação agregados/cimento e o teor de pedrisco na mistura superiores a 8%, 5 e 0,7, respectivamente, afetam negativamente o acabamento superficial da peça. (3) A presença do RMF contribuiu para melhoraria da resistência do bloco de pavimento intertravado de concreto ao ataque ácido. (4) Os blocos produzidos apresentaram concentração dos elementos químicos inferiores aos limites estabelecidos, indicando o baixo risco de contaminação ambiental. (5) A projeção de consumo de RMF foi interessante para o desenvolvimento sustentável indicando que 19,67% da produção mundial de concreto seria capaz de absorver todo o RMF produzido. (6) A projeção de consumo de RMF aponta que a pavimentação das estradas brasileiras não pavimentadas absorveria 4,5 anos de geração de RMF brasileiro. O estudo indica que o uso de RMF na construção civil pode reduzir o impacto ambiental associado à sua disposição, além de contribuir com a redução das emissões de CO_2 e a exploração de recursos naturais não renováveis, contribuindo com o avanço da economia circular e promoção do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

(ABCP) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim técnico - Fabricação de Blocos Pré-moldados de concreto para pavimentação. p. 17, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Report mensal Barragens de Mineração**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens>.

ALMADA, B. S. et al. Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal of Building Engineering**, v. 63, n. October 2022, p. 1–17, 2023.

ALMEIDA, V. O. et al. Application of leached iron ore tailings to produce sustainable cements. **Construction and Building Materials**, v. 377, n. December 2022, p. 131095, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos, Rio de Janeiro**, p. 16, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro**, p. 16, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 10004. **Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro**, p. 71, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781. **Peças de concreto para pavimentação - Especificações e métodos de ensaio, Rio de Janeiro**, p. 21, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro**, p. 9, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, p9, 2018.

BEULAH, M. et al. Mine Waste-Based Next Generation Bricks: A Case Study of Iron Ore Tailings, Red Mudand GGBS Utilization in Bricks. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 2021.

CAO, L. et al. Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: A sustainable and eco-friendly solution for mining waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, n. May, p. 134126, 2022.

CARMIGNANO, O. et al. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, p. 1895–1911, 2021.

CARVALHO, A. R. DE et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, v. 403, n. August, 2023.

CARVALHO EUGÊNIO, T. M. et al. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, 2021.

CASTRO MENDES, J. et al. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 1569–1586, 2020.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário do Transporte**. , 2022.

DE MAGALHÃES, L. F. et al. Iron ore tailing as addition to partial replacement of portland cement. **Materials Science Forum**, v. 930 MSF, p. 125–130, 2018.

FONTES, W. C. et al. Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, n. 1, p. 151–165, 2021.

GONG, L. et al. Experimental Study and Microscopic Analysis on Frost Resistance of Iron Ore Tailings Recycled Aggregate Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, 2022.

GOUVEIA, R. et al. Scenarios of environmental deterioration in the Paraopeba River , in the three years after the breach of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 891, n. May, 2023.

JAYASIMHA, N.; SUJINI, B.; ANNAPURNA, B. P. A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1922–1929, 2022.

JIANG, P. et al. Study on Compressive Properties and Dynamic Characteristics of Polypropylene-Fiber-and-Cement-Modified Iron-Ore Tailing under Traffic Load. **Polymers**, v. 14, n. 10, 2022.

JING, C. et al. Experimental study on iron ore tailings sand and municipal solid waste incineration fly ash used in semi-rigid base of asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 393, n. November 2022, p. 131981, 2023.

KONG, L. et al. Effect of Iron Tailings as Fine Aggregate and Mineral Admixture on Strength and Microstructure of Cement Mortar. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 17, n. 1, 2023.

LI, X. et al. Effect of Fe2+/Fe3+ on high-strength ceramsite prepared by sintering geopolymers using iron ore tailings. **Ceramics International**, v. 48, n. 4, p. 5681–5688, 2022.

LI, Y. et al. Effect of a novel spherical tailings aggregate on the macro- and mesoscopic properties of pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 144, n. May, 2023.

LING, J. et al. Pr ep rin t n ot pe er re v iew Abstract : Pr ep rin t n ot pe er v ed. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 1, p. 1–17, 2022.

LINH, D.; SALOMONE, R.; NGUYEN, Q. T. Sustainability assessment methods for circular bio-based building materials : A literature review. **Journal of Environmental Management**, v. 352, n. September 2023, p. 120137, 2024.

LIU, J. et al. Experimental study on the preparation of cementitious materials from iron ore tailings by activation. **Construction and Building Materials**, v. 385, n. February, p. 131409, 2023.

MA, X. et al. Experimental studies and analyses on axial compressive properties of full iron tailings concrete columns. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, n. January, p. e01881, 2023.

MAGALHÃES, L. F. DE et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020.

MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO, T. et al. Study on the feasibility of partial replacement of cement with IOT in extruded concrete roof tiles production. **Construction and Building Materials**, v. 393, n. May, 2023.

OTIENO, F.; SHUKLA, S. K. An insight into failure of iron ore mine tailings dams. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 37, n. 2, p. 127–147, 7 fev. 2023.

SALDANHA, R. B. et al. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, n. November 2022, 2023.

SANGINE, E.; KRISANDA, J. M. U.S. production of selected mineral commodities in the third quarter 2022. n. January, 2023.

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, N. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. December 2021, p. e00973, 2022.

USGS. Annual Mineral Commodity Summary - January 2023 - Iron Ore. v. 1, n. November 2021, p. 2022–2023, 2023.

VESCOVI, P. H. T.; BEZERRA, A. C. DA S.; POGGIALI, F. S. J. Iron ore tailing (IOT) chemical composition and content impact on the physical, mechanical, and durability properties of blended cement. **Journal of Building Engineering**, v. 80, n. November, p. 108119, dez. 2023.

VILLELA, M. Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras. **IPT (Disponível em:http://www.ipt.br/noticias). Acessado em 10/01/2024**, p. 8–11, 2016.

WEI, Z. et al. Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, n. 200, p. 130318, 2022.

XU, X. et al. Effect of Particle Size and Morphology of Siliceous Supplementary Cementitious Material on the Hydration and Autogenous Shrinkage of Blended Cement. **Materials**, v. 16, n. 4, 2023.

ZHANG, B. et al. Effect of Iron Tailing Powder-Based Ternary Admixture on Acid Corrosion Resistance of Concrete. **Materials**, v. 16, n. 10, 2023a.

ZHANG, W. et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, 10 nov. 2020.

ZHANG, Y. et al. Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 72, n. December 2022, p. 106585, 2023b.

ZHAO, J. et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122968, 7 jun. 2021.

ZHU, Q. et al. Bond performance between deformed bars and concrete containing iron tailing sand exposed to high temperature. **Structures**, v. 56, n. July, p. 104940, 2023.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO PRELIMINAR SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ARGILAS CALCINADAS DO ALGARVE COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Miguel José Oliveira[a]; António Bettencourt Ribeiro[b]; António Santos Silva[c]; Fernando G. Branco[d]

[a]Universidade do Algarve, CERIS Coimbra, Campus da Penha, 8005-139 Faro, mjolivei@ualg.pt

[b]Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, bribeiro@lnec.pt

[c]Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, ssilva@lnec.pt

[d]Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, fjbranco@dec.uc.pt

RESUMO

O betão é atualmente, em massa, o produto mais produzido no mundo e a segunda substância mais utilizada depois da água. As previsões mundiais de crescimento do consumo de cimento, o principal ligante do betão, apontam para um aumento insustentável das emissões de CO2. Para mitigar essas emissões, tendo em conta que o fator mais relevante para o ambiente é a produção de clínquer, é possível aumentar o teor de materiais cimentícios suplementares no betão, cuja produção envolve baixa emissão de CO_2. Face aos volumes de materiais disponíveis e às necessidades a nível mundial, prevê-se no futuro uma utilização mais alargada de outros materiais, vendo-se com grande potencial neste âmbito as argilas calcinadas, dado o volume e a localização das reservas existentes das respetivas matérias-primas.

Neste artigo apresenta-se um estudo preliminar relativo à substituição parcial de cimento Portland por duas argilas calcinadas, testadas em argamassas de cimento. As duas argilas foram obtidas no Algarve, na Serra de Santa Catarina e na Serra de São Brás de Alportel. Ambas foram calcinadas e moídas em condições padronizadas. Foram testadas percentagens de substituição de 30% e os resultados obtidos na resistência à compressão aos 28 e 90 dias evidenciam potencial para o seu uso como material cimentício suplementar, particularmente na zona do Algarve.

Palavras-chave: Argilas calcinadas; Materiais cimentícios suplementares; Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

O betão é atualmente, em massa, o produto mais produzido no mundo e a segunda substância mais utilizada depois da água. Admitindo uma evolução a nível mundial no cumprimento dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) e na ambição de um mundo mais equitativo e sustentável ocorrerá uma significativa expansão do ambiente construído, o que, por sua vez, aumentará a procura de materiais à base de cimento. Uma utilização das práticas normais de produção de cimento implicará um aumento inaceitável das emissões de CO_2. Para mitigar essas emissões, tendo em conta que o fator mais relevante para o ambiente é a produção de clínquer, existem duas áreas principais que podem proporcionar reduções significativas nas emissões globais de CO_2 devidas ao fabrico e utilização de cimento:

1. Aumento do teor de materiais cimentícios suplementares no betão, cuja produção envolve baixa emissão de CO_2, ou incremento da incorporação destes materiais como constituintes do cimento, reduzindo o consumo de cimento Portland.

2. Utilização mais eficiente do cimento Portland nas argamassas e nos betões, por menor teor de clínquer por unidade de volume produzido ou por menor volume de material com clínquer consumido.

A primeira opção, que implica a substituição de parte do clínquer Portland por outros materiais com propriedades pozolânicas, traduz uma prática já amplamente utilizada, para fins específicos, poucas vezes diretamente associados à preservação do ambiente (Berra et al., 2015); Birick et al., 1999; Wang et al., 2008; Cheah et al., 2011; Sata et al., 2007; Teixeira et al., 2016). Exemplos típicos de materiais substitutos do clínquer Portland são alguns subprodutos industriais, como as cinzas volantes, a escória de alto-forno, as cinzas de biomassa e a sílica de fumo, entre outros (Teixeira et al, 2016, Ferreira et al., 2015; Oliveira et al., 2017). Estes materiais podem ser utilizados individualmente ou em diferentes combinações com o cimento Portland (Fonseca et al., 2022). Podem ser adicionados ao betão ou a argamassas para tornar as misturas mais económicas e/ou influenciar propriedades das misturas.

No entanto, as crescentes necessidades de betão a nível mundial, associadas à pressão mundial para a desativação de centrais térmicas a carvão, levam a que a disponibilidade dos materiais tradicionais com propriedades pozolânicas (como por exemplo as cinzas volantes e escórias) não seja suficiente para suprir as necessidades da indústria de cimento num futuro próximo (Ruan et al., 2022).

A incorporação de pó de pedra proveniente de resíduos de corte de pedra no fabrico de novos materiais tem também vindo a ser estudada (Sua-Iam et al., 2013; Branco et al., 2023a). Os resíduos de pedra de menor granulometria (fíler) são já correntemente utilizados na produção de betões, nomeadamente betões autocompactáveis (Silva et al., 2015). O efeito sinergético da interação de fíler calcário e cinzas volantes na melhoria de propriedades mecânicas em materiais cimentícios encontra-se documentado (Weerdt et al., 2011). O desempenho de argamassas e betões contendo substituição parcial de cimento por subprodutos de corte de pedra face a diversos tipos de parâmetros tem vindo a ser objeto de estudo (Branco et al., 2023a; Branco et al., 2023b). Têm vindo igualmente a ser feitos estudos com o objetivo de integrar fíller calcário em cimentos alternativos ao clínquer Portland (Carrasco et al., 2005).

Como forma de contrariar a insuficiente disponibilidade de subprodutos pozolânicos no mercado para suprir a necessidade de alternativas ao cimento Portland, aprofunda-se a investigação no sentido de combinar argilas calcinadas e filler calcário no sentido de obter materiais cimentícios sustentáveis (Zang et al., 2020; Muzenda et al., 2020; Du et al., 2020; Scrivener et al., 2018). Em Portugal, as consideráveis reservas existentes de calcário e de argila justificam a exploração desta possibilidade como alternativa ao cimento Portland tradicional.

A presente comunicação apresenta os resultados de um estudo preliminar no qual se procura avaliar o desempenho de misturas cimentícias em que se procedeu à substituição parcial de cimento Portland por duas argilas calcinadas. As duas argilas foram obtidas no Algarve, na Serra de Santa Catarina e na Serra de São Brás de Alportel, em zonas onde existe atualmente extração para produção de tijoleiras. Procedeu-se à calcinação e moagem destes materiais em condições padronizadas. Produziram-se argamassas com percentagens de substituição do cimento de 30% (em massa), e avaliou-se a resistência à compressão aos 28 e 90 dias. Os resultados obtidos evidenciam potencial para o uso destas argilas como material cimentício suplementar.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente seção, descrevem-se os procedimentos seguidos na caraterização dos materiais utilizados, bem como os métodos de ensaio seguidos.

2.1 MATERIAIS

As argilas utilizadas neste estudo foram obtidas no Algarve, na serra de Santa Catarina (Tavira) e na Serra de São Brás de Alportel. Foram calcinadas durante 5 horas a 750 °C e posteriormente moídas no moinho de esferas presente na Figura 1.

Figura 1 – Moinho de esferas.

As finuras obtidas (BLAINE) foram de 11.380 cm^2/g e 7.740 cm^2/g respetivamente para as argilas de Tavira e de São Brás. Em termos de massa volúmica, pela mesma ordem, os valores obtidos foram de 2,68 g/cm^3 e 2,77 g/cm^3.

Na Figura 2 apresentam-se os registos difratométricos das duas amostras de argila. Como se pode constatar, têm composição mineralógica muito semelhante, sendo constituídas essencialmente por quartzo, mica (tipo ilite) e dolomite, e ainda, em menor proporção ou como vestígios, feldspatos, caulinite e hematite. A principal diferença a registar é a presença de vestígios de gesso na amostra de São Brás.

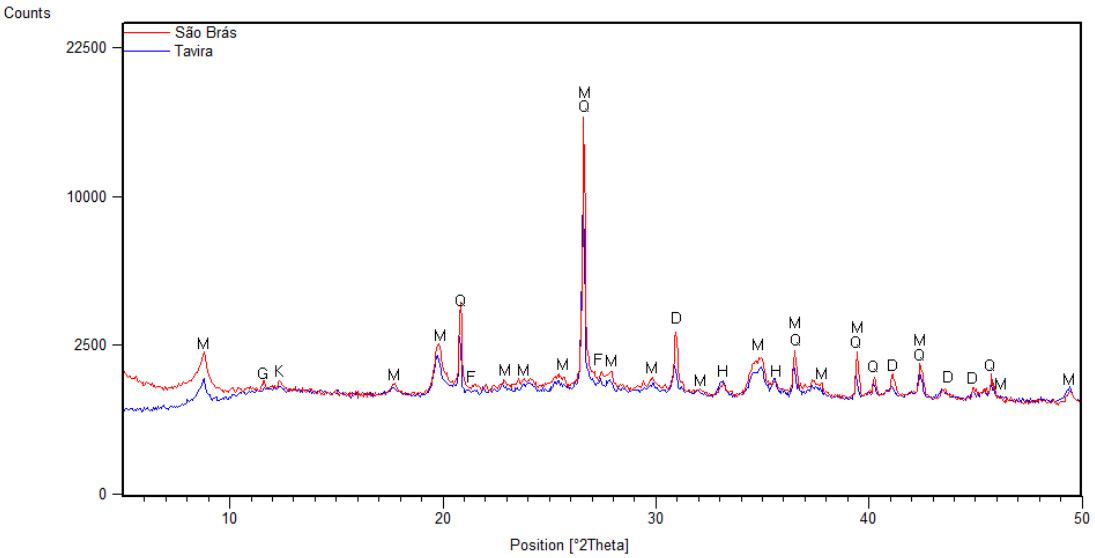


Figura 2 – Registos DRX das amostras de argila de São Brás (vermelho) e Tavira (azul). Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; K – Caulinite; F – Feldspatos; Q – Quartzo; D – Dolomite; H – Hematite

Na Figura 3 apresentam-se as curvas ATG/DTG obtidas para as duas amostras.

Como é dado ver, confirma-se que as duas amostras têm composição mineralógica muito semelhante, com as principais perdas de massa (

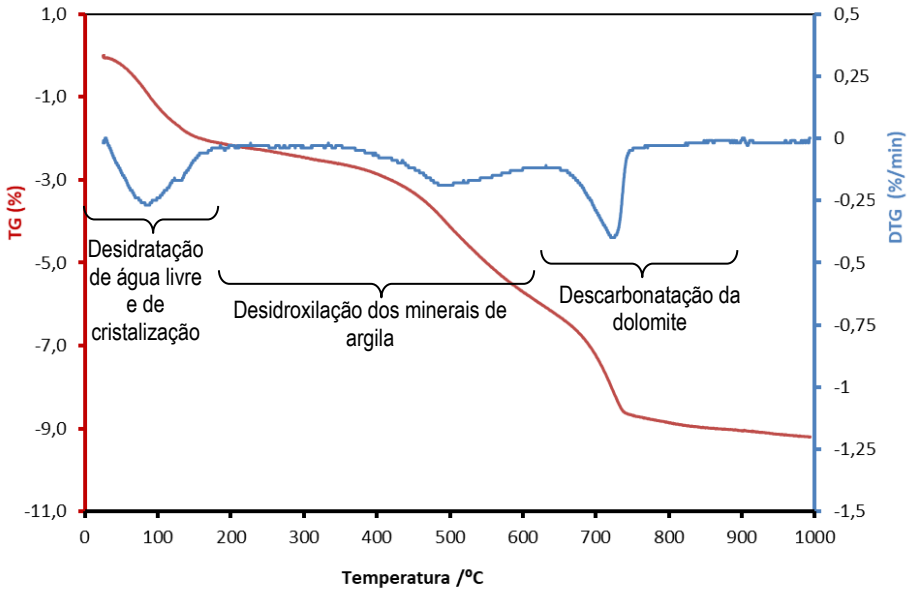
Quadro 1) atribuíveis à desidroxilação da mica e à descarbonatação da dolomite:

- 25 a 200 °C – zona de perda devida à desidratação de água livre e de cristalização do gesso;
- 200 a 650 °C – zona de perda devida à desidroxilação dos minerais de argila;
- 650 a 900 °C – zona de perda devida à descarbonatação dos carbonatos.

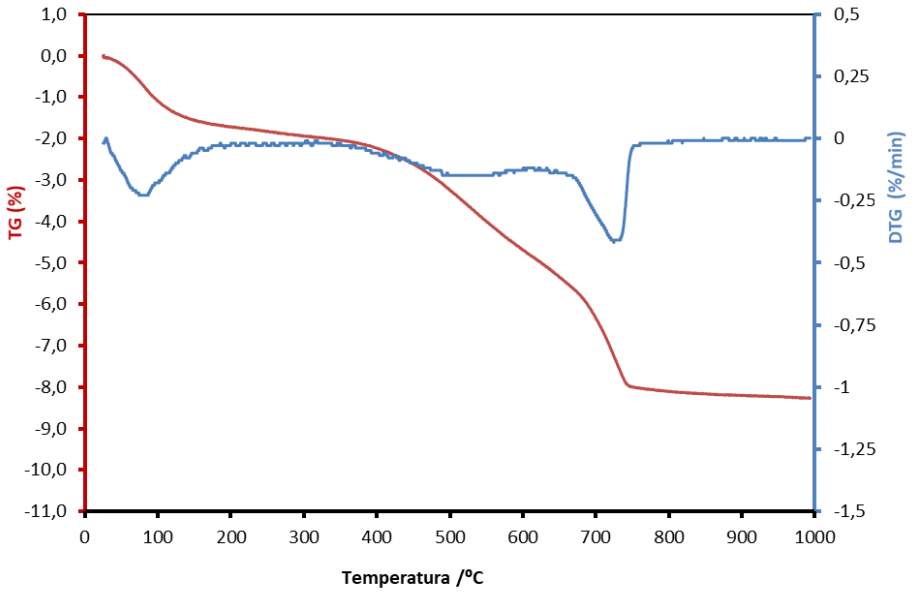
Quadro 1 – Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura das amostras

Identificação das amostras	Gamas de Temperatura (°C)			Perda ao Rubro‡
	25-200	200-650	650-900	
São Brás	2,17	4,14	2,76	9,21
Tavira	1,72	3,62	2,88	8,26

‡ - Valor da perda de massa entre 25 e 1000 °C



a)



b)

Figura 3 – Registos ATG/DTG das amostras de argila de São Brás (a) e Tavira (b)

No âmbito da avaliação da atividade das argilas calcinadas, efetuada através da quantificação da resistência à compressão de argamassas, foi utilizada uma areia normalizada em conformidade com a NP EN 196-1 (IPQ, 2017). O cimento utilizado foi o CEM I 42,5, sendo a água potável, obtida da rede de distribuição de Lisboa, no LNEC.

Foi ainda utilizado um superplastificante com a designação comercial de Glenium ACE 426.

2.2 PREPARAÇÃO DE PROVETES E ENSAIOS

A preparação das argamassas seguiu, no aplicável, o procedimento indicado na NP EN 196-1. Nas misturas com argila calcinada, o procedimento que se aplica ao cimento foi aplicado à mistura de cimento e argila calcinada. A introdução de superplastificante, quando aplicável, foi efetuada após a introdução dos outros constituintes.

Foram ensaiadas 6 misturas cuja composição é apresentada no Quadro 2. Num primeiro conjunto de 3 misturas (SET 1) manteve-se a razão água/ligante = 0,50, como referido na norma NP EN 196-1 (IPQ,2017), considerando a massa do ligante como cimento+argila calcinada, e a razão agregado/ligante = 3, também como referido na norma. No segundo conjunto de 3 misturas (SET 2), recorreu-se à utilização de um superplastificante para reduzir a razão água/ligante para 0,31, reduzindo também a razão agregado/ligante para 2. Em cada um dos conjuntos, foi preparada uma mistura constituída apenas por cimento (Ref) e duas misturas preparadas com mistura de cimento e argila calcinada, em que o teor de argila calcinada foi de 30 % da massa total do ligante.

Enquanto no primeiro conjunto (SET 1) se pretendeu avaliar o desempenho relativo do ligante de acordo com o método utilizado para classificar a resistência dos cimentos, no segundo conjunto (SET 2) pretendeu-se avaliar o desempenho relativo do ligante numa mistura de maior resistência (menor razão água/ligante), considerando também a influência de um adjuvante capaz de dispersar as partículas do ligante, e assim, eventualmente, tirar melhor partido da argila calcinada.

A consistência das argamassas foi avaliada através do valor do espalhamento, obtido de acordo com a norma ASTM C1437-07 (ASTM, 2007), a qual variou de 214 a 248 mm (Quadro 2). Foram preparados 3 prismas (40 x 40 x 160 mm^3) por mistura. Os provetes foram conservados nos moldes a 20 ± 1 °C, cobertos para evitar a perda prematura de água em ambiente com humidade relativa superior a 95 %, tendo sido desmoldados passadas 24 horas e conservados imersos em água até ao momento do ensaio.

Quadro 2 – Composições e trabalhabilidade das misturas ensaiadas

Mistura	**SET 1: ag/l = 0,50; ar/l=3**			**SET 2: ag/l = 0,31; ar/l=2**		
	Ref	**T30**	**SB30**	**Ref SP**	**T30 SP**	**SB30 SP**
CEM (g)	450	315	315	675	472,5	472,5
Areia normalizada (g)	1350	1350	1350	1380	1380	1380
Argila Calcinada Tavira (g)	0	135	0	0	202,5	0
Argila Calcinada S. Brás (g)	0	0	135	0	0	202,5
Água (g)	234	234	234	209,8	209,8	209,8
Superplastificante (g)	0	0	0	6,8	8,0	7,7
Espalhamento (mm)	216	214	220	216	224	248

Os provetes foram ensaiados à flexão e compressão de acordo com o procedimento da NP EN 196-1 aos 1, 28 e 90 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no ensaio de determinação das resistências mecânicas apresentam-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Resistência à flexão e à compressão das misturas ensaiadas

Mistura	**Resistência média à tração por flexão (MPa)**			**Resistência média à compressão (MPa)**		
	1 d	28 d	90 d	1 d	28 d	90 d
	SET 1					
Ref	4,8	7,6	8,3	22,0	54,9	62,1
T30	2,9	6,9	6,8	12,0	41,2	44,8
SB 30	2,9	6,4	7,3	11,8	42,4	46,4
	SET 2					
Ref SP	7,2	12,4	11,2	51,7	87,6	98,7
T30 SP	6,1	9,5	9,8	34,8	71,7	79,7
SB 30 SP	5,6	9,3	10,0	32,7	75,3	82,8

Considerando um índice de atividade (IA) como o resultado da equação

$$IA\ (\%) = \frac{R_{i,t}}{R_{ref,t}} \times 100$$

onde $R_{i,t}$ representa a resistência à compressão da mistura *i*, em MPa, na idade *t*, e R_{ref} a resistência à compressão da mistura de referência (do conjunto em que se insere a mistura *i*), em MPa, na idade *t*, chega-se aos valores apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Índice de atividade das misturas ensaiadas

Mistura	**IA (%)**		
	1 d	28 d	90 d
	SET 1		
Ref	100	100	100
T30	55	**75**	72
SB 30	54	**77**	75
	SET 2		
Ref SP	100	100	100
T30 SP	67	**82**	81
SB 30 SP	63	**86**	84

Os valores de IA aos 28 dias evidenciam que as argilas calcinadas apresentam potencial para serem utilizadas em misturas cimentícias, tendo em conta que a substituição de 30 % de cimento por argila calcinada conduziu a reduções na resistência à compressão inferiores a 30 %.

Considerando os valores de IA das misturas com superplastificante com as correspondentes sem superplastificante verifica-se que uma ou mais das alterações efetuadas na mistura permitiram aumentar o contributo das argilas calcinadas para a resistência. Aos 28 dias de idade, na mistura SB 30 SP, a resistência à compressão apenas reduziu 14 % da resistência, apesar de se ter diminuído 30 % no teor de cimento, indicando um elevado potencial da argila calcinada S. Brás poder ser utilizada no fabrico de betões, com vantagens para as emissões de CO2 do respetivo ligante.

4 CONCLUSÕES

O estudo efetuado permitiu constatar que existe no Algarve matéria-prima com qualidade suficiente para produzir argila calcinada com características adequadas para a produção de materiais cimentícios. A utilização deste tipo de argilas permite reduzir o teor de clínquer Portland nos ligantes dos materiais cimentícios, constituindo uma via para contribuir no processo de descarbonização da indústria da construção que utiliza materiais cimentícios.

Apesar dos resultados do estudo serem muito animadores, o potencial efetivo da utilização do tipo de argilas requer caracterizações adicionais que incluam o fabrico de betões, com avaliações complementares, como as relativas à durabilidade, para as quais se prevê obter também vantagens comparativas com os betões fabricados apenas com clínquer Portland. As desvantagens inerentes à utilização de argilas calcinadas, como as associadas à redução das resistências nas primeiras idades, devem ser também consideradas, para que a indústria possa considerar os ligantes com argilas calcinadas uma opção segura a implementar.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, sob a referência LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

ASTM (2007). ASTM C1437-07 - Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

Berra, M.; Mangialardi, T.; Paolini, A.E. (2015) Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. Construction and Building Materials, Vol. 76, pp. 286 – 296. https://10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052.

Biricik, H.; Aköz, F.; Berktay, I.; Tulgar, A.N. (1999) Study of pozzolanic properties of wheat straw ash, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 637 – 643. https://10.1016/S0008-8846(98)00249-X.

Branco, F.G.; Correira, A.; Cerejeira, A.; Aniceto, M.; Morais, P.; Chung, A.; Peixoto, M.; Rodrigues, J.; Matias, G. ; Torres, I.; Vieira, J. (2023a) - Mechanical performance of mortars with incorporation of

stone cutting sludge, CEES 2023 - 2nd International Conference on Construction, Energy, Environment & Sustainability 27-30 June 2023, Funchal – Portugal, ISBN: 978-989-54499-3-4.

Branco, F.G.; Ortega, J.M.; Marques, L. Pereira, L. (2023b) - Partial Replacement of Portland Cement by Stone Cutting Sludge in Mortars – Hygrometric Performance. INCREaSE 2023: Proceedings of the 3rd INternational CongRess on Engineering and Sustainability in the 21st Century, 5-7 july 2023, Faro, Portugal. J. F. L. C. Semião et al. (Eds.): INCREaSE 2023, ASST, pp. 289–299, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44006-9_22

Carrasco, M.F.; Menéndez, G.; Bonavetti, V.; Irassar, E.F. (2005) Strength optimization of tailor-made cement with limestone filler and blast furnace slag, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1324 – 1331. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.023.

Cheah, C.B., Ramli, M. (2011) - The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview. Resour. Conserv. Recycl. 55, 669‑685.

Du, H., Dai Pang, S. (2020). High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute. Construction and Building Materials, 264, 120152. 10.1016/j.conbuildmat.2020.120152

Ferreira, C. R., Tavares, S. S., Ferreira, B. H. M., Fernandes, A. M., Fonseca, S. J. G., Oliveira, C. A. D. S., ... & Gouveia, L. L. D. A. (2017). Comparative study about mechanical properties of strutural standard concrete and concrete with addition of vegetable fibers. Materials Research, 20, 102-107. https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0905

Fonseca, T.; Anjos, M.; Ferreira, R.; Branco, F.G.; Pereira, L. (2022) Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime, Construction and Building Materials, Volume 320, 126235, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126235.

IPQ - Instituto Português da Qualidade. (2017). NP EN 196-1:2017 - Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

Muzenda, T. R., Hou, P., Kawashima, S., Sui, T., & Cheng, X. (2020). The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. Cement and Concrete Composites, 107, 103516. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2020.103516

Oliveira, M., Ribeiro, A., Branco, F.G. (2017) Shrinkage of self-compacting concrete. A comparative analysis. J. Build. Eng. 9, 117–124. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.12.002

Ruan, Y., Jamil, T., Hu, C., Gautam, B. P., & Yu, J. (2022). Microstructure and mechanical properties of sustainable cementitious materials with ultra-high substitution level of calcined clay and limestone powder. Construction and Building Materials, 314, 125416. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125416.

Sata, V., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. (2007) Influence of Pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. Constr. Build. Mater. 21, 1589‑1598.

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and concrete Research, 114, 2-26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017.

Silva, P.; Brito, J. (2015) Experimental study of the porosity and microstructure of selfcompacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler, Construction and Building Materials, Vol. 86, pp. 101 – 112. https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110.

Sua-Iam, G., Makul, N. (2013). Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate. Construction and Building Materials, 38, 455-464. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.016.

Teixeira, E.; Mateus, R.; Camões, A.; Bragança,L.; Branco, F.G. (2016) Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. Journal of Cleaner Production. Vol. 112 (4), pp. 2221–2230. https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124.

Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., Baxter, L. (2008) Biomass fly ash in concrete: mixture proportioning and mechanical properties. Fuel 87, 365‑371.

Weerdt, K.; Kjellsenb, K.O.; Sellevolda, E.; Justnesa, H. (2011) Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. Cement and Concrete Composites, Vol. 33, Issue 1, pp. 30 - 38. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.006.

Zhang, Duo, Beata Jaworska, He Zhu, Kensey Dahlquist, and Victor C. Li. (2020) "Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3)." Cement and Concrete Composites 114: 103766.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO SULFÍDRICOS COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Guilherme Ascensão[a]; Oscar Naranjo[a]; Manuel Caraballo[b,c]; Victor M. Ferreira[a]

[a]RISCO - Research Center for Risks and Sustainability in Construction, University of Aveiro (UA), Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, guilhermeascensao@ua.pt; oscar.naranjo@ua.pt; victorf@ua.pt

[b]Department of Mining, Mechanic, Energetic and Construction Engineering, Higher Technical School of Engineering, University of Huelva, Huelva, Spain, mcaraballo@dimme.uhu.es

[c]Department of Water, Mining and Environment, Scientific and Technological Center of Huelva, University of Huelva, Huelva, Spain

RESUMO

As distintas fases de extração e processamento de minérios geram quantidades significativas de resíduos de mineração, estimando-se a existência na União Europeia de mais de 4700 milhões de toneladas destes resíduos. Entre os resíduos de mineração, são particularmente preocupantes do ponto de vista ambiental os resíduos sulfídricos devido ao risco de contaminação dos solos e lençóis freáticos por drenagem ácida e lixiviação de metais pesados. Desenvolver novas estratégias de valorização para resíduos de mineração sulfídricos é vital para reduzir a deposição desses resíduos em aterros ou lagoas ácidas e mitigar os impactos ambientais da exploração mineira. Também no setor da construção existe uma consciencialização crescente para a necessidade de reduzir os impactos ambientais do sector. O cimento Portland é o ligante mais utilizado à escala global, e apesar dos esforços para reduzir os impactos ambientais associados à sua produção, mais de 60% das emissões de CO_2 provêm da decomposição térmica do calcário, sendo inerentes à produção de clínquer. Por este motivo, um dos focos da indústria cimenteira tem sido a redução do teor de clínquer e o aumento do uso de materiais cimentícios suplementares, tanto convencionais quanto alternativos. Nesse contexto, este trabalho investiga a viabilidade de utilizar resíduos de mineração sulfídricos como materiais cimentícios suplementares. Amostras de resíduos com diferentes teores de enxofre foram caracterizadas em termos de composição química, mineralógica e de distribuição granulométrica. Processos de pré-tratamento mecânicos e térmicos foram aplicados aos resíduos para avaliar possíveis alterações na sua reatividade. Pastas cimentícias foram produzidas com um nível de substituição de cimento de 20% e com relação água-ligante de 0,40. A viabilidade dos resíduos de mineração sulfídricos enquanto materiais cimenticios suplementares com pré-tratamento, foi avaliada através de ensaios de determinação de reatividade, calorimetria e pelo desenvolvimento de resistência mecânica das pastas cimentícias. Os resultados foram comparados com pastas cimentícias produzidas com materiais cimentícios suplementares convencionais, tendo evidenciado a efetividade e o potencial dos resíduos de mineração sulfídricos como materiais cimentícios suplementares alternativos.

PALAVRAS-CHAVE

Resíduos de Mineração Sulfídricos; Materiais Cimentícios Suplementares; Construção Sustentável

1. INTRODUÇÃO

A extração de metais de depósitos naturais envolve uma série de processos metalúrgicos com o objetivo de separar fisicamente o minério do metal extraído, gerando quantidades significativas de resíduos. As etapas de processamento incluem a britagem, moagem, separação gravítica, magnética ou eletrostática e flotação. Nas operações de mineração modernas, o teor médio de cobre extraído não excede 2%, o que significa que para obter 2 toneladas de cobre são necessárias 100 toneladas de material extraído e processado. Além disso, os processos de separação metalúrgicas envolvem frequentemente a utilização de elementos tóxicos como mercúrio, cianeto e chumbo, entre outros. Os resíduos gerados por estes processos de separação são denominados de rejeitos de mineração (*mine tailings* - MT), sendo geralmente depositados em barragens específicas próximas das instalações mineiras. A nível global, estima-se que a produção anual de resíduos varie entre 5 a 10 biliões de toneladas, segundo Edraki et al (2014). Barcelo et al (2020) estimam que na União Europeia existam aproximadamente 4.700 milhões de toneladas de resíduos de mineração, com 1.200 milhões de toneladas correspondentes a rejeitos de mineração (MT), antecipando-se que com o aumento contínuo do consumo de minerais a nível mundial, a quantidade de resíduos de mineração aumente ainda mais no futuro. As quantidades e características dos rejeitos variam significativamente dependendo das propriedades do minério extraído e das metodologias empregues na extração e separação. Neste contexto, os resíduos de mineração sulfídricos são particularmente preocupantes devido aos seus elevados impactos ambientais, como o surgimento de drenagens ácidas, a lixiviação de metais pesados que comprometem a qualidade das águas subterrâneas, a biodiversidade da região e a saúde ambiental das comunidades próximas (Rimstidt et al. 2003, Hansen et al. 2020). Atualmente, o principal método de gestão destes resíduos é a deposição em barragens, devido à sua mais rápida implementação e com menor custo (Xenidis et al 2002). Contudo, as dimensões substanciais destas barragens acarretam o risco de falhas catastróficas, representando uma ameaças significativa às vidas humanas, ao meio ambiente e às atividades económicas situadas nas imediações. Fourie (2009) refere que desde 1960, ocorreram mais de 120 casos de falhas em barragens de residuos de mineração, resultando na libertação descontrolada de biliões de toneladas de resíduos para o meio ambiente.

Alguns métodos alternativos para a gestão dos resíduos de mineração foram desenvolvidos pela indústria mineira, tais como técnicas de disposição em pasta na superfície pela desidratação dos resíduos (Yilmaz et al. 2014). No entanto, estas técnicas são incapazes de mitigar os riscos ambientais de longo prazo devido por exemplo à lixiviação (Moreno et al. (2006). Outra técnica de gestão é o uso destes resíduos em pastas cimentícias de enchimento (CPB), onde ligantes hidráulicos são misturados com os resíduos em concentrações entre 10% a 20% para preencher as galerias geradas pela mineração (Qi e Fourie 2019), mas podem surgir problemas de instabilidade do enchimento gerados pela oxidação dos sulfetos nos rejeitos, segundo Guirian et al. (2016). Também a exploração de resíduos de mineração como fontes potenciais de CaO, SiO_2, Al_2O_3, and Fe_2O_3 para a fabricação de clínquer tem sido estudada recentemente (Gou et al. (2019)), sugerindo que grande parte dos rejeitos têm uma composição química similar e compatível com formulações típicas de matérias-primas para clínqueres de menor emissão de CO_2, como o sulfoaluminato de cálcio (CSA). Outra aplicação é o seu uso como matéria-prima em cerâmica convencional, em formulações de produtos como telhas, pavimentos e tijolos de alvenaria ou revestimento. No entanto, surgem complicações não apenas devido à liberação de óxidos de enxofre (SOx) durante o processo de queima, mas também porque pode induzir efeitos indesejáveis de inchamento no produto final (Belmonte et al., 2018). Consequentemente, é necessário procurar soluções inovadoras para a valorização destes resiudos de

mineração para contribuir para a redução ou mitigação de poluentes e garantir um ambiente saudável para a população.

Este trabalho, desenvolvido no âmbito de um projeto ERAMIN-3 em curso, tem como objetivo analisar a viabilidade do uso de resíduos de mineração (MT) sulfídricos como materiais cimentícios suplementares (SCM). Globalmente, aproximadamente 650 milhões de toneladas de SCMs são utilizados anualmente (Snellings et al., 2016). A incorporação desses materiais resulta numa diminuição substancial nas emissões de gases de efeito de estufa como o CO_2, que decorre principalmente da diminuição da proporção de clínquer usado na produção de cimento. Os SCMs geralmente empregues são cinzas volantes derivadas da combustão de carvão, escória de alto-forno, pozolanas naturais, argilas calcinadas, calcário ou sílica de fumo. A sua incorporação tem benefícios tanto químicos como físicos (Hamidi et al. 2013). Tratamentos térmicos e a redução do tamanho das partículas podem ser utilizados para melhorar ainda mais a sua capacidade reativa (Vargas et al. 2018) Ramanathan et al. (2021). dos SCMs.

Para analisar a capacidade dos rejeitos de mineração principais como SCMs (materiais cimentícios suplementares), identificou-se um protocolo denominado de teste R3 (Li et al., 2018). Este método tem como objetivo simular as condições que ocorrem num cimento, pela adição de pequenas quantidades de rejeitos a uma mistura de portlandite. Este protocolo engloba ensaios mecânicos aos 7 e 28 dias, testes calorimétricos e ainda um teste de reatividade pozolânica (Chapelle). Aplicou-se este protocolo no presente estudo para analisar o comportamento de quatro rejeitos (MT) de diferentes origens, geologia e processamento mineiro, com o intuito de compreender o comportamento mecânico e químico como SCMs em função da composição química desses rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As matérias-primas base utilizadas neste estudo envolveram dois tipos de argilas e quatro resíduos de mineração (MT). Os dois tipos de argilas foram fornecidos por parceiros industriais do projeto, denominadas como argila vermelha (RC) e argila amarela (YC). Os quatro resíduos de mineração em estudo, com diferentes composições e origens, foram os seguintes:

- **ATA** - Rejeitos produzidos pela empresa mineradora Rio Tinto, localizada na Faixa Pirítica Ibérica, na província de Huelva, uma das maiores concentrações de sulfetos maciços do mundo. Na mina são extraídos sulfetos de cobre ricos em silicato. Os rejeitos resultantes são processados principalmente por moagem e flotação e são depositados em barragens de rejeitos em áreas próximas à mina.
- **FILL e LIX -** Ambos os rejeitos vêm da mina de Cobre Las Cruves, localizada na extremidade leste da Faixa Piritíca Ibérica, que atravessa o sul de Portugal até às províncias espanholas de Badajoz, Huelva e Sevilha, e de onde extraem sulfetos de cobre ricos em silicato de formações maciças. O rejeito LIX é gerado principalmente a partir de moagem e lixiviação enquanto o rejeito FILL é provém do pós-tratamento do rejeito LIX, com o objetivo de extrair minerais remanescentes. Ambos são depositados em diferentes barragens de rejeitos em áreas próximas à mina.
- **PALA -** Corresponde a um rejeito produzido pela Mina Palabora, na África do Sul. O corpo principal do minério de cobre encontra-se numa tubulação de carbonatito, e o minério é extraído por flotação e lixiviação. Os rejeitos são também armazenados em barragens de rejeitos próximas à mina.

A primeira etapa de processamento neste estudo envolveu a moagem manual e secagem dos materiais em bruto. Devido à sua condição inicial, relativo ao tamanho de partícula elevado, foi realizado um segundo processo de moagem. A composição química e mineralógica dos materiais iniciais foi analisada através de Difração de Raios-X (XRD) e Fluorescência de Raios-X (XRF).

O Quadro 1 inclui as composições das matérias-primas principais deste estudo obtidas por XRF. Por um lado, há elementos importantes na composição química destes materiais, como a SiO_2, Al_2O_3, CaO e Fe_2O_3. No entanto, existem elementos prejudiciais que podem vir a causar problemas no processamento cerâmico, como o Cl nas chaminés de fornos, ou contaminantes como o As e Pb. Além disso, é também importante conhecer os teores de Cu remanescente para um possível pós-tratamento. Um aspeto principal a destacar desta análise são as concentrações de SO_3. É possível detetar que tanto o rejeito FILL quanto o LIX têm altas concentrações de SO_3, o que faz sentido, pois vêm do mesmo depósito e mineralogia. Este aspeto permitiu definir que a produção de cerâmicos será feita apenas com rejeitos de baixo teor em enxofre (ATA e PALA). Nesta análise destaca-se também que a maior concentração de SiO_2 e Al_2O_3 em ATA faz sentido pois deriva de um depósito rico em silicatos. É importante realçar que elementos contaminantes como o Cl, As e Pb, têm baixas concentrações nestes rejeitos, e uma vez diluídos nas pastas cerâmicas, a sua proporção será ainda menor, eliminando possíveis efeitos negativos para o processamento industrial cerâmico.

Quadro 1 –Composição química das matérias-primas (XRF)

	SO_3 (%)	**SiO_2 (%)**	**Al_2O_3 (%)**	**CaO (%)**	**Fe_2O_3 (%)**	**MgO (%)**	**Cl (%)**	**As (%)**	**Pb (%)**	**Cu (%)**
ATA	3.52	53.79	11.01	0.53	19.11	5.50	0.01	0.010	0.008	0.058
FILL	40.45	0.55	0.33	27.26	21.31	0.56	0.42	0.510	0.015	0.338
LIX	38.91	4.84	0.34	3.38	17.45	0.16	0.01	0.136	0.443	2.863
PALA	0.48	8.74	1.59	33.65	15.28	11.07	0.04	0.002	0.003	0.167
YC	0.15	56.99	23.92	0.12	5.54	0.02	0.01	0.001	0.007	0.011
RD	0.05	61.37	20.60	0.34	7.14	0.30	0.07	0.001	0.006	0.008

Os rejeitos MT foram também sujeitos a pré-tratamentos envolvendo uma moagem, seguida de uma calcinação a 500 °C (1 °C/min) e depois peneirados abaixo de 125 µm, pois alguns estudos têm utilizado protocolos semelhantes no sentido de aumentar a reatividade do SCM. O Quadro 2 apresenta as composições químicas dos MT calcinados.

Quadro 2 – Composição química das matérias-primas pré-tratadas (XRF)

	SO_3 (%)	**SiO_2 (%)**	**Al_2O_3 (%)**	**CaO (%)**	**Fe_2O_3 (%)**	**MgO (%)**	**Cl (%)**	**As (%)**	**Pb (%)**	**Cu (%)**
ATA	10.07	48.81	9.16	0.55	17.95	4.70	nd	0.010	0.008	0.064
FILL	41.69	2.15	0.75	26.39	19.72	0.53	0.21	0.485	0.013	0.293
LIX	26.34	5.65	0.56	2.83	36.81	Nd	nd	0.284	0.846	1.758
PALA	5.21	7.28	1.20	35.43	13.17	9.15	0.04	0.001	0.001	0.184

O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos pela difração de raios-X (XRD) aplicada aos 4 MT. É possível observar que o rejeito ATA é principalmente composto por filossilicatos (chamosita e clinochlore), quartzo e uma quantidade muito pequena de pirita. LIX é principalmente composto por gesso, com uma quantidade considerável de pirita e menos quartzo. No caso de FILL, o gesso predomina com pequenas quantidades de quartzo, o que faz sentido já que FILL é o rejeito reprocessado de LIX e, portanto, não contém mais pirita. Finalmente, o rejeito PALA é composto principalmente por carbonatos (calcite e dolomite), uma quantidade significativa de filossilicatos onde predominam a flogopita e a biotita, e uma pequena quantidade de fosfato também está presente.

Quadro 3 – Composição mineralógica de MT (XRD)

	Phyllosilicates	Quartz	Piryte	Gypsium	Carbonates	Phosphates
ATA	91	8	1	0	0	0
FILL	0	7	0	93	0	0
LIX	0	20	10	70	0	0
PALA	16	0	0	0	80	4

A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica dos 4 MT, sendo possível observar que são bastante semelhantes, situando-se os valores médios entre os 10-20 µm, não se evidenciando uma diferença significativa no tamanho do grão.

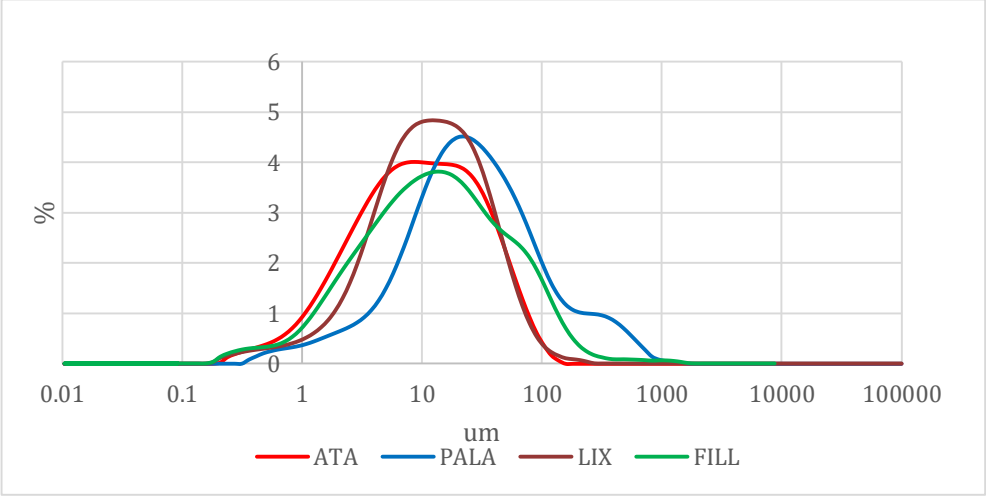


Figura 1 – Distribuição granulométrica dos MT

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado anteriormente, o protocolo R3 foi empregue para investigar e caracterizar o desempenho das diversas matérias-primas sob análise, permitindo uma avaliação criteriosa das propriedades mecânicas e químicas dos materiais em estudo. Entre os principais materiais cimentícios suplementares (SCM) utilizados pela indústria estão a sílica de fumo (SF) e o metacaulino (MK) e, portanto, com o objetivo de compreender as propriedades cimentícias do uso de rejeitos como SCMs, este trabalho de pesquisa envolveu a preparação de 7 pastas cimentícias e a análise de indicadores-chave de desempenho. Três delas são destinadas a servir como ponto de comparação, devido ao seu

uso quotidiano na indústria do cimento, uma contém apenas cimento denominada de referência (REF) e as outras duas contendo SF e MK. Por fim, as outras quatro preparações são feitas com os rejeitos em estudo (ATA, PALA, LIX, FIL). Estes rejeitos de mineração (MT) foram pré-tratados como referido.

De acordo com o protocolo, a primeira avaliação foi realizada com amostras curadas por apenas 7 dias. Essas misturas incorporaram 20% de MT em substituição do teor de cimento, relativamente à pasta de referência (REF) que continha só cimento. A estas misturas foram adicionados ainda o mesmo teor de água e vertidos em pequenos cilindros para ensaios posteriores. Este lote inicial foi submetido a ensaios mecânicos à compressão. Um lote subsequente foi preparado (Figura 2), agora com um tempo de cura de 28 dias seguindo a mesma metodologia, para então ser submetido novamente aos mesmos testes de resistência à compressão.

Figura 2 – Amostras de SCMs para ensaio de compressão

Realizou-se também uma análise calorimétrica para compreender a diferença na dissipação de calor associada às diferentes composições. Novas misturas foram preparadas mantendo as proporções utilizadas para os ensaios mecânicos, mas desta vez com o dobro do volume, para passarem por testes calorimétricos com duração de aproximadamente dois dias. Para realizar uma análise calorimétrica representativa, estas amostras foram preparadas e depositadas em frascos que foram isolados através de uma estrutura de placas de espuma (Figura 3).

Figura 3 – Amostras de SCMs para ensaio calorimetrico

Finalmente, para realizar o ensaio de reatividade pozolânica (método de Chapelle modificado), foram preparadas misturas de 1 grama de MT com 2 gramas de CaO (previamente calcinado durante 30 minutos a 1000°C) e 250 ml de água destilada. Esta preparação, colocada sobre uma placa de aquecimento é deixada em agitação por 16 horas a 85°C. Após o período de 16 horas, o sistema foi rapidamente arrefecido e agitado por 15 minutos com uma solução açucarada previamente preparada (60 gramas de açúcar em 250 ml de água destilada). Por fim, 25 ml desta solução foram titulados com HCl a 0,1 N na presença de indicador de fenolftaleína até a mudança de cor (rosa para incolor).

Ensaios de resistência à compressão

Estes ensaios foram realizados em duas séries, estando os resultados obtidos representados na Figura 4 para o período de cura de 7 dias e na Figura 5 para a cura de 28 dias. Estas figuras exibem os efeitos dos MT como SCMs no desempenho mecânico das misturas cimentícias.

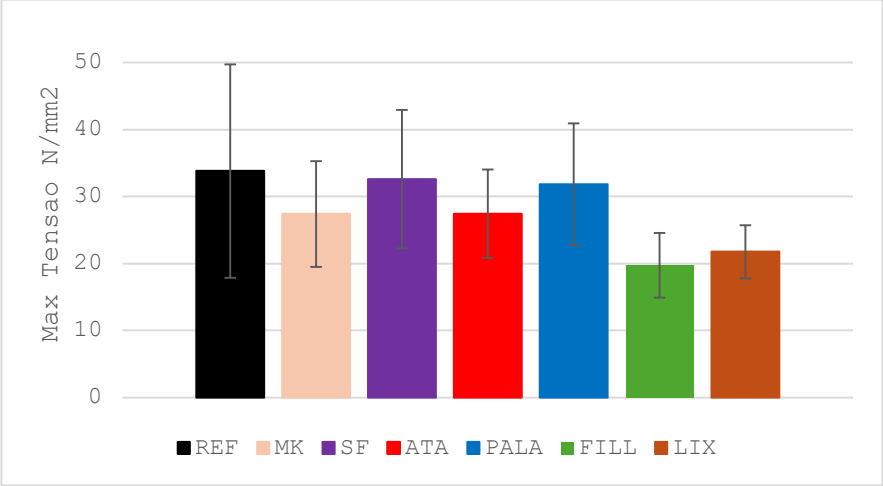


Figura 4 – Teste de compressão para as composições com 7 dias de cura.

Os resultados do período de cura de 7 dias (Figura 4) indicam um desempenho promissor de PALA e ATA como SCM relativamente aos outros MT (FILL e LIX), apresentando resistências à compressão comparáveis com as misturas SCM convencionais (com SF ou MK).

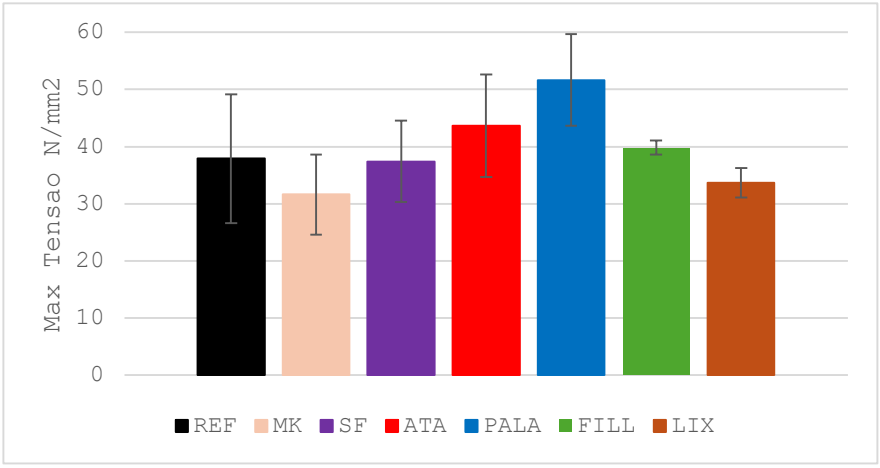


Figura 5 – Teste de compressão para as composições com 28 dias de cura.

Ao fim de 28 dias, as MT PALA e ATA, inicialmente candidatos promissores, apresentaram resistências à compressão superiores do que a mistura REF e das SCM convencionais como SF ou MK, chegando a ser 35% superior à REF. A MT FILL também apresenta resultados favoráveis em períodos de cura prolongados, devido à sua composição comparada com a MT LIX. Destaca-se o potencial de PALA e ATA como SCMs, exibindo propriedades mecânicas melhoradas em comparação com SCMs tradicionais, o que sugere que composições mineralógicas carbonatadas e filossilicatadas, ou seja, rejeitos provenientes de depósitos silicatados ou depósitos localizados em corpos carbonatados podem ser uma fonte importante de SCMs.

Ensaios de Calorimetria

Os testes calorimétricos realizados mediram a variação de temperatura durante o primeiro dia do período de cura para todas as composições (Figura 6). Os resultados permitem avaliar os perfis de libertação de calor nas diferentes misturas, fornecendo informação útil sobre o comportamento de hidratação em idades precoces e possíveis implicações para a cura e desempenho das misturas.

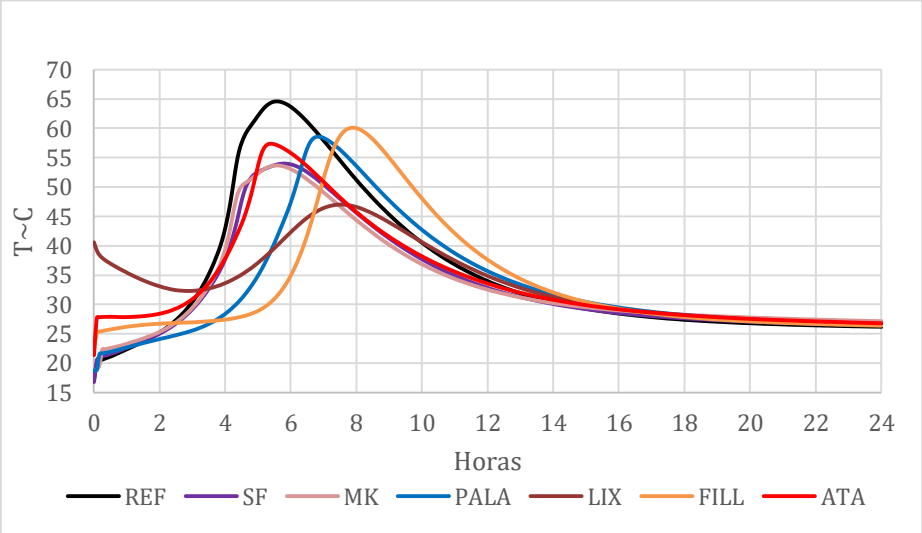


Figura 6 – Teste calorimétrico para as composições com e sem MT.

A partir destes resultados, é evidente que PALA e FILL apresentam uma libertação de calor retardada em cerca de duas horas aproximadamente e um pico de libertação de calor ligeiramente mais baixo, uma tendência que se alinha com os testes de resistência à compressão em que o desenvolvimento da resistência coincide nestes 2 MT serem menores. De facto, os MT PALA, ATA e FILL demonstram um aumento significativo na resistência à compressão após um período de cura de 28 dias, comparativamente aos seus resultados aos 7 dias de cura. Por outro lado, LIX mostra um perfil de libertação de calor menos pronunciado, mas prolongado, talvez relacionado com o seu elevado teor em pirita que se revela no seu elevado teor de Fe_2O_3. Na verdade, o fim do primeiro pico de calor pode ser observado logo após o processo de mistura de cimento com LIX ter sido concluído. Estas informações sugerem cinéticas de hidratação diferentes com implicações no desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo para as diferentes misturas estudadas. O amplo intervalo de libertação de calor para os 4 MT indica que existe mais tempo para as reações químicas ocorrerem,

com maior participação de volume de material pozolânico a reagir, refletindo-se nos testes de compressão, onde todos apresentam resultados relativamente favoráveis quando comparados com os SCMs comuns usados atualmente. A Figura 7 apresenta a temperatura acumulada, que nos dá uma ideia da liberação de calor dos SCM.

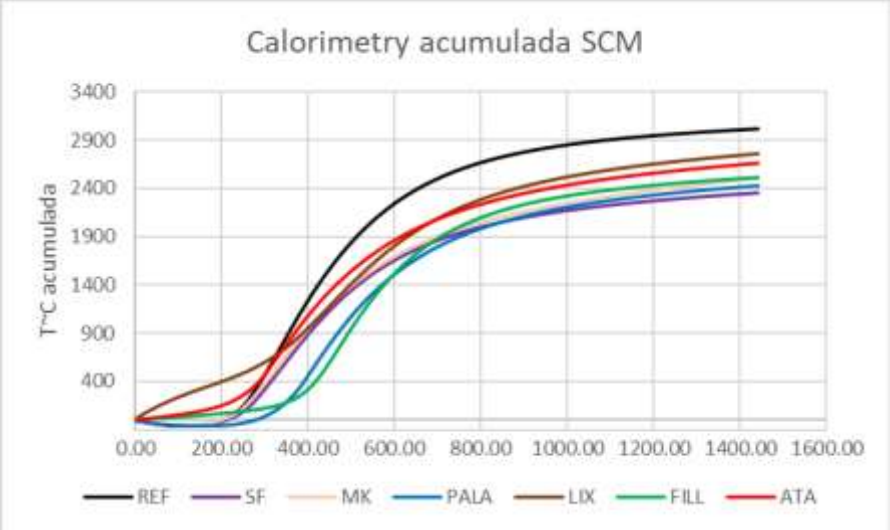


Figura 7 - Teste calorimétrico – curva cumulativa das composições ensaiadas (com e sem MT)

É possível inferir a partir da Figura 7 que a libertação de calor é reduzida quando se adicionam MT, no entanto, a diferença não ultrapassa os 15-20%. Novamente, o MT PALA apresenta menor libertação de calor no início, destacando-se, contudo, como o melhor candidato para tempos mais prolongados. É importante destacar que o FILL é o MT que teve a sua liberação de temperatura mais retardada, o que pode ser associado ao seu teor piritoso e ao seu alto teor de SO_3.

Ensaios de reatividade pozolânica

Complementarmente, foram realizados ensaios a 3 amostras de cada SCM para avaliar a reatividade pozolânica pelo teste de Chapelle modificado para todos os SCM neste trabalho. A Figura 8 apresenta o consumo de portlandite ($Ca(OH)_2$) para cada SCM em estudo.

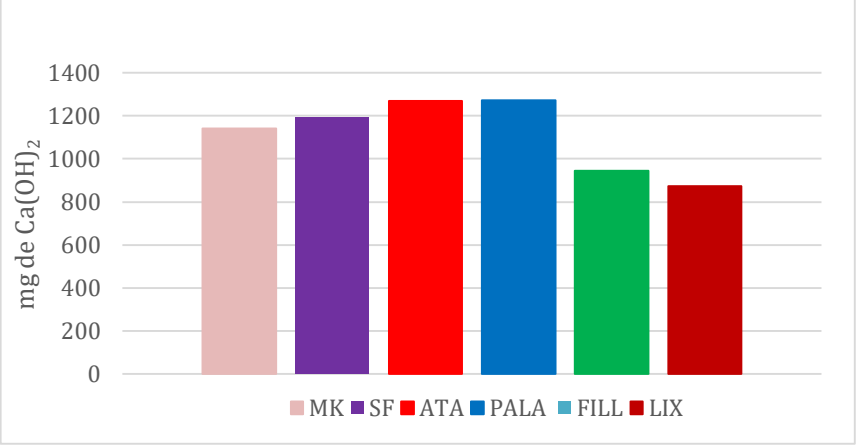


Figura 8 – Reatividade pozolânica pelo teste de Chapelle modificado

É possível observar que os valores mais altos correspondem aos MT ATA e PALA, sendo que a reatividade pozolânica é cerca de 15% maior do que no caso das pozolanas convencionais (SF e MK). Seguramente, esse aumento se deve ao fato de serem rejeitos compostos principalmente por silicatos e carbonatos, com menor teor de SO_3. Uma menor reatividade é observada para o caso de FILL e LIX, onde os maiores valores de SO_3 limitam a reatividade pozolânica. É possível observar que o padrão de reatividade pozolânica segue a mesma lógica que os resultados obtidos nos ensaios mecânicos à compressão, pelo que este ensaio de Chapelle modificado foi relevante para complementar e sustentar os resultados do desempenho dos MT como SCMs.

4. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que os quatro MTs apresentam resultados positivos quando utilizados como Materiais Cimentícios Suplementares (SCMs). Foram observados aumentos significativos na resistência à compressão nas amostras curadas a 28 dias para todos os quatro MTs, em comparação com SCMs convencionais e a mistura REF. Este facto indica o potencial destes MTs para melhorar o desempenho mecânico de materiais com base em cimento.

Foram encontrados valores elevados de resistência para os MT PALA e ATA nos ensaios de compressão, os quais são reforçados pelos resultados de reatividade pozolânica pelo teste de Chapelle modificado. No entanto, as MT FILL e LIX não mostram resultados desanimadores, pois embora sejam inferiores aos dos outros SCMs, apresentam também resultados próximos e favoráveis. Julga-se que estes melhores resultados com as MT ATA e PALA estão relacionados com o seu baixo teor de SO_3 e pelo facto de serem compostos principalmente por filossilicatos e carbonatos.

Há um reconhecimento claro da necessidade de mapear, identificar e caracterizar os rejeitos sulfídicos, crucial para desbloquear o seu potencial uso como recursos para outras indústrias. Em resumo, os resultados deste estudo indicam um potencial promissor dos MTs como SCMs e apontam para a necessidade de mais investigação para otimizar sua aplicação na indústria da construção.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Tailing$R^3$2Green, financiado pela União Europeia. Europeia (ERA-MIN3 No.101003575), com o apoio da FCT.

REFERÊNCIAS

Edraki, M.; Baumgartl, T.; Manlapig, E.; Bradshaw, D.; Franks, D.M.; Moran, C.J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. J. Clean. Prod. 2014, 84, 411–420. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079

Barcelos, D.A.; Pontes, F.V.; da Silva, F.A.; Castro, D.C.; dos Anjos, N.O.; Castilhos, Z.C. Gold mining tailing: Environmental availability of metals and human health risk assessment. J. Hazard. Mater. 2020, 397, 122721. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122721

Rimstidt, D.D.; Vaughan, D.J. Pyrite oxidation: A state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. Geochim. Cosmochim. Acta 2003, 67, 873–880. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01165-1

Hansen, R. Process network modelling of the geochemical reactions responsible for acid mine drainage emanating from the Witwatersrand tailings facilities. S. Afr. J. Geol. 2020, 123, 357–365. https://doi.org/10.25131/sajg.123.0024

Plumlee, G.S. The environmental geology of mineral deposits. In The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A. Processes, Techniques, and Health Issues; Society of Economic Geologists: Littleton, CO, USA, 1999; Volume 6A, pp. 71–116.

Xenidis, A.; Mylona, E.; Paspaliaris, I. Potential use of lignite fly ash for the control of acid generation from sulphidic wastes. Waste Manag. 2002, 22, 631–641. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00053-8

Fourie, A. Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. Procedia Earth Planet. Sci. 2009, 1, 1067–1071. https://doi.org/ 10.1016/j.proeps.2009.09.164

Yilmaz, E.; Benzaazoua, M.; Bussière, B.; Pouliot, S. Influence of disposal configurations on hydrogeological behaviour of sulphidic paste tailings: A field experimental study. Int. J. Miner. Process. 2014, 131, 12–25. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.08.004

Moreno, L.; Neretnieks, I. Long-term environmental impact of tailings deposits. Hydrometallurgy 2006, 83, 176–183. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.052

Qi, C.; Fourie, A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. Miner. Eng. 2019, 144, 106025. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025

Ghirian, A.; Fall, M. Long-term coupled behaviour of cemented paste backfill in load cell experiments. Geomech. Geoengin. Int. J. 2016, 11, 237–251. https://doi.org/10.1007/s10706-015-9892-6

Kinnunen, P.H.M.; Kaksonen, A.H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. J. Clean. Prod. 2019, 228, 153–160. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171

Ludwig, H.M.; Zhang,W. Research review of cement clinker chemistry. Cem. Concr. Res. 2015, 78, 24–37. [CrossRef] 70. Gou, M.; Zhou, L.; Then, N.W.Y. Utilization of tailings in cement and concrete: A. review. Sci. Eng. Compos. Mater. 2019, 26, 449–464. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.018

Gou, M.; Zhou, L.; Then, N.W.Y. Utilization of tailings in cement and concrete: A. review. Sci. Eng. Compos. Mater. 2019, 26, 449–464. https://doi.org/10.1016/10.1515/secm-2019-0029

Belmonte, L.J.; Ottosen, L.M.; Kirkelund, G.M.; Jensen, P.E.; Vestbø, A.P. Screening of heavy metal containing waste types for use as raw material in Arctic clay-based bricks. Environ. Sci. Pollut. Res. 2018, 25, 32831–32843. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8040-z

Snellings, R. Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials. RILEM Tech. Lett. 2016, 1, 50. https://doi.org/ 10.21809/rilemtechlett.2016.12

M. Hamidi, L. Kacimi, M. Cyr, and P. Clastres, “Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement,” Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 1268–1277, Oct. 2013, https://10.1016/j.conbuildmat.2013.06.013

Vargas, F.; Lopez, M. Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors. J. Clean. Prod. 2018, 182, 427–436. https:// 10.21809/rilemtechlett.2021.143.

Ramanathan, S.; Perumal, P.; Illikainen, M.; Suraneni, P. Mechanically activated mine tailings for use as supplementary cementitious materials. RILEM Tech. Lett. 2021, 6, 61–69. https://10.1016/j.jclepro.2018.01.223

Li, X., Snellings, R., Antoni, M. et al. (31 more authors) (2018) Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. Materials and Structures, 51. 151. ISSN 1359-5997. https://doi.org/10.1617/s11527-018-1269-x

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE RESÍDUOS DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS - CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO

Sara Dias [a]; António Tadeu [a]; João Almeida [a], Jorge de Brito [b]

[a] Universidade de Coimbra, CERIS, Coimbra, Portugal

[b] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

RESUMO

O betão, como material de construção amplamente utilizado, enfrenta desafios significativos devido às suas substanciais emissões de carbono e elevado consumo de recursos naturais. Para enfrentar estes problemas, várias estratégias, incluindo o uso de agregados alternativos, têm sido exploradas.

O presente estudo investiga a viabilidade da utilização de resíduos de madeira tratada em fim de vida para produzir compósitos de cimento e betão. A gestão adequada desses resíduos tornou-se uma preocupação ambiental urgente na indústria da madeira, representando desafios para muitas empresas. O trabalho de investigação começa pela caracterização dos resíduos de madeira de diferentes fontes para avaliar a presença de substâncias lixiviantes e investigar as propriedades físicas e químicas relevantes para a produção de compósitos de cimento. Um estudo experimental abrangente foi então realizado para avaliar a viabilidade do uso de misturas de betão contendo estilha de madeira e serradura para aplicações estruturais e não estruturais na construção. Várias misturas com diferentes tipos e percentagens de madeira foram produzidas e avaliadas quanto à sua durabilidade e ao seu desempenho mecânico e físico.

O estudo investiga ainda a viabilidade da incorporação de resíduos de madeira em aplicações estruturais, através da avaliação da aderência aço-betão de armaduras ordinárias e de cabos pré-esforçados em compósitos de madeira-betão. Elementos estruturais à escala real foram construídos e testados para avaliar a viabilidade do uso de compósitos de madeira-betão em aplicações estruturais. Foram realizados testes de flexão e fadiga sob cargas estáticas e dinâmicas.

Palavras-chave: Agregados alternativos para betão; Resíduos de madeira; Subprodutos florestais; Compatibilidade madeira-cimento; Compósitos de madeira betão; Materiais sustentáveis

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população global, especialmente em áreas urbanas, leva a uma maior procura por habitação nova e infraestruturas. O betão, sendo um material de construção fundamental, será necessário em grandes quantidades para atender a essa procura. No entanto, o impacte ambiental da produção de betão não pode ser ignorado (de Brito e Kurda, 2021), já que o cimento Portland contribui de forma significativa para as emissões de CO_2. Além das emissões de carbono, o consumo de agregados naturais para o fabrico de betão é um problema (Thomas, 2021). A extracção de agregados leva à destruição de *habitats* e a efeitos adversos na fauna e flora. Perturba o equilíbrio dos solos, causando aumento da erosão e, além disso, resulta na contaminação de água e poluição do ar, consumo de energia e em emissões de gases de efeito estufa. Para fazer face a estas preocupações, são necessárias abordagens alternativas que minimizem os impactes ambientais e promovam a sustentabilidade na produção de betão.

Por outro lado, existe outra preocupação, que é a necessidade de minimizar resíduos e adicionar valor a produtos e materiais considerados no fim de vida. Os resíduos de madeira em fim de vida constituem um desafio do ponto de vista da reciclagem devido à sua heterogeneidade (madeira tratada, de diversas origens, espécies etc.), o que inviabiliza a sua reciclagem por vias mais limpas e para produção de materiais com maior valor comercial (Facara *et al. 2019*).

A eliminação de resíduos de madeira tratada no fim de vida surge como um problema ambiental na indústria da madeira, com algumas empresas a enfrentar dificuldades em gerir de forma adequada este resíduo. A empresa *Toscca Wood & Solutions* identificou a importância de acrescentar valor à madeira contaminada no fim de vida, mais concretamente a postes de madeira comercializados para uso agrícola. Em resposta a este desafio, foi desenvolvido o projecto de investigação PROCK. O projecto abordou os desafios associados aos postes de madeira contaminados no fim de vida e explorou maneiras de aumentar seu valor. Através da incorporação de resíduos de madeira no betão, é possível desviar efetivamente estes resíduos dos métodos tradicionais de eliminação (incineração e depósito) e criar uma alternativa sustentável que acrescenta circularidade tanto aos resíduos de madeira como à indústria do betão.

Embora os resíduos de madeira já sejam utilizados em materiais à base de cimento, a sua aplicação para fins estruturais ainda não é amplamente estudada (Thandavamoorthy, 2016). Outra lacuna identificada é a não utilização de madeira tratada no fim de vida em compósitos cimentícios. A maioria dos estudos existentes (*Dias et al.* 2022a) foca-se principalmente na utilização de matérias-primas virgens (subprodutos). Ao expandir o uso de resíduos de madeira em aplicações estruturais e incorporar madeira tratada no fim de vida, esta investigação contribui para uma abordagem mais ecológica e eficiente em termos de recursos para a produção de betão e gestão de resíduos.

2 RESÍDUOS DE MADEIRA

2.1 CARACTERIZAÇÃO

As amostras de resíduos de madeira utilizadas neste estudo têm várias origens e, consequentemente, possíveis diferentes contaminantes e foram codificadas de acordo com o indicado na Figura 1 (*ww - wood waste*).

WW1	WW2	WW3	WW4
Fonte: serralharia (madeira não tratada)	Fonte: postes de agricultura e vedações	Fonte: postes de agricultura e vedações	Fonte: sulipas dos caminhos de ferro.
Potenciais contaminantes: -	Potenciais contaminantes: tratamento CCA e ACQ (óxido de cobre, óxido de arsénio e óxido de crómio)	Potenciais contaminantes: tratamento CCA e ACQ (óxido de cobre, óxido de arsénio e óxido de crómio)	Potenciais contaminantes: creosote

Figura 1: Amostras dos diferentes tipos de resíduos de madeira estudados.

Para a caracterização química, foram produzidos extractos aquosos dos diferentes resíduos de madeira de acordo com a norma EN 12457-2:2002. O resíduo sólido foi separado por filtração e os eluatos resultantes foram analisados por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, cromatografia gasosa associada à espectrometria de massa, cromatografia líquida, combustão-infravermelho, entre outros métodos químicos clássicos. Os resultados indicaram que a concentração de substâncias lixiviantes variava significativamente dependendo da fonte dos resíduos de madeira, por vezes excedendo os limites de aceitação para aterros de resíduos inertes ou não perigosos. Não foram detectados produtos químicos significativos no eluato da madeira não tratada, enquanto os eluatos de madeira tratada com ACQ e CCA revelaram quantidades consideráveis de metais pesados. O eluato de madeira tratada com creosote continha compostos orgânicos relevantes. As partículas de madeira de fontes ACQ e CCA apresentaram baixo risco ambiental devido à provável fixação dos metais pesados nos compósitos de cimento. Em contraste, as partículas de madeira tratadas com creosote representavam uma ameaça maior, pois os compostos orgânicos prejudicam a ligação com a matriz cimentícia e, por essa razão, decidiu-se não prosseguir com este resíduo de madeira na produção de pastas de cimento e nos testes seguintes. As amostras de madeira foram também caracterizadas em termos físicos: absorção de água, massa volúmica, água livre na superfície, adaptando os procedimentos da norma EN 1097-6:2013.

Para avaliar a compatibilidade madeira-cimento, dois tipos de pastas de cimento foram preparados: cimento Portland com extractivos de resíduos de madeira substituindo a água; e cimento Portland com partículas de resíduos de madeira. Foi utilizado o cimento Portland CEM II/B-L 32.5N. Foram introduzidas variações em termos de tipo de resíduo de madeira, teor de madeira, tamanho das partículas de madeira e pré-tratamento da madeira. A análise foi realizada em duas etapas. Primeiro, as misturas foram submetidas a um calorímetro isotérmico para avaliar a influência dos resíduos de madeira no calor de hidratação e no tempo de cura das pastas de cimento-eluato e das pastas de cimento-madeira. Em seguida, as misturas com o melhor desempenho foram submetidas a testes mecânicos. Em ambas as etapas, uma pasta de cimento Portland foi usada como referência.

2.1.1 Calor de hidratação

O detalhe da preparação das amostras e do estudo do calor de hidratação pode ser consultado em Dias *et al*. (2022a). Na Figura 2, apresenta-se os resultados obtidos para o calor de hidratação. A incorporação de quantidades crescentes de partículas de madeira nas pastas de cimento leva a uma redução significativa no calor de hidratação libertado. Foram também encontradas pequenas variações ao mudar os tipos de resíduos e os pré-tratamentos. Como esperado, a madeira não tratada (WW1) afectou o calor de hidratação um pouco mais do que as madeiras tratadas quimicamente (WW2, WW3) o que é explicado pelo processo de lixiviação destes últimos ao longo da vida útil da madeira.

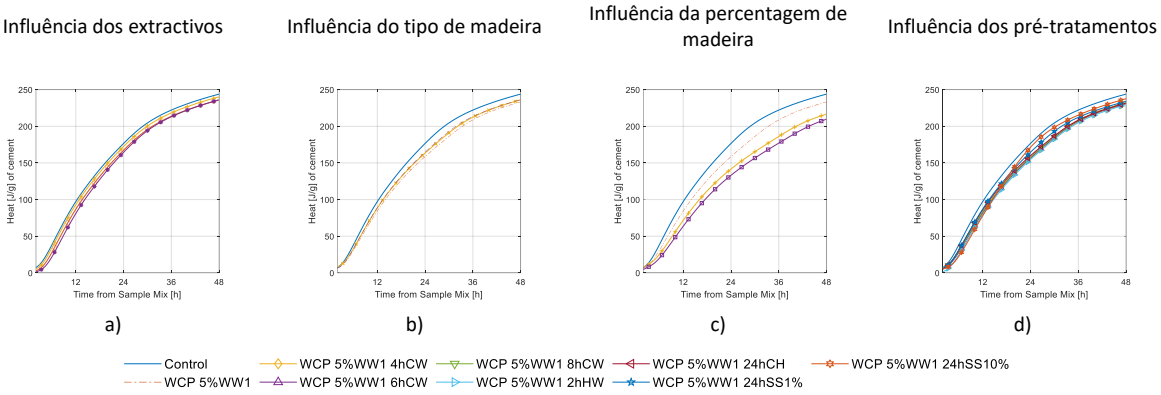


Figura 2: Evolução do calor de hidratação: a) influência dos extractivos; b) influência do tipo de madeira; c) influência da percentagem de madeira; d) influência dos pré-tratamentos.

2.1.2 Ensaios mecânicos

Para avaliar as propriedades mecânicas das pastas de cimento com madeira, foram realizados testes de resistência à flexão (3 pontos) e compressão de acordo com a norma EN 1015-11:2019. Os resultados mostram que a incorporação de partículas de madeira resultou numa redução significativa do desempenho mecânico (Figura 3).

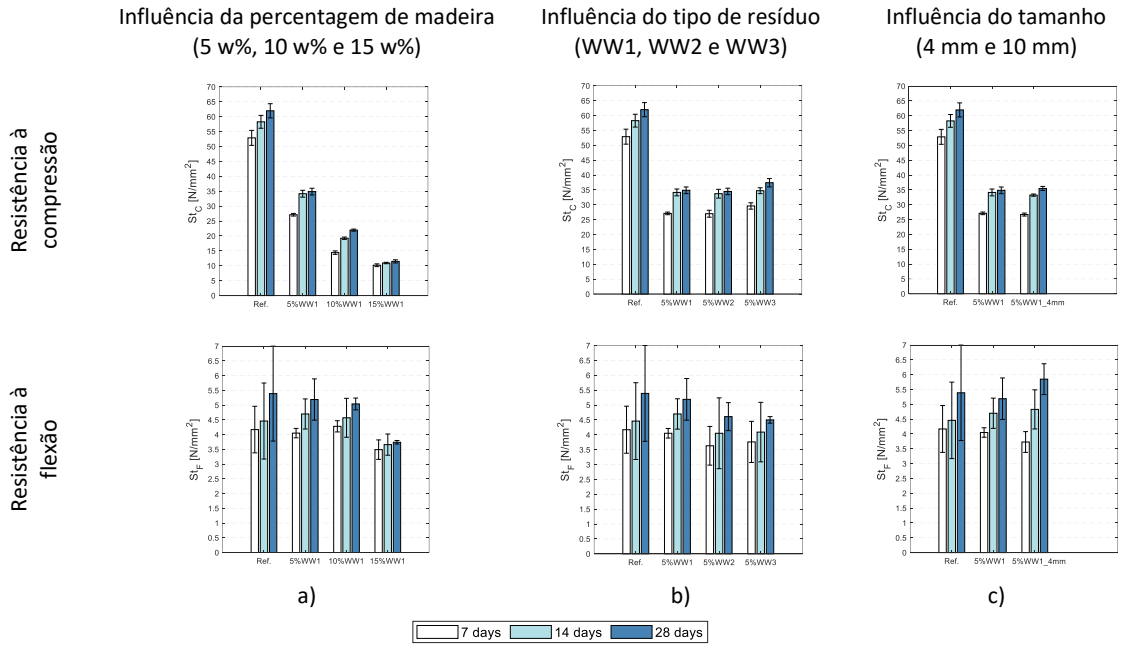


Figura 3: Resultados dos ensaios de compressão e flexão realizados às pastas com madeira: a) influência da percentagem de madeira; b) influência do tipo de resíduo; c) influência do tamanho da partícula.

3 BETÃO COM RESIDUOS DE MADEIRA

Numa fase posterior do trabalho, foram desenvolvidas formulações de betão com substituição parcial dos agregados por estilha e serradura. As composições de betão foram desenvolvidas com três objectivos: desenvolver um betão com massa volúmica abaixo de 2125 kg/m³ (redução de massa volúmica sem comprometer a resistência); obter uma resistência à compressão acima de 25 MPa a 28 dias e maximizar o teor volumétrico de madeira (v%). Doze misturas foram desenvolvidas variando a quantidade de estilha de madeira e serradura em substituição aos agregados minerais, substituição parcial do agregado grosso por estilha (*WC - wood chip*), com substituição do agregado fino por serradura (*SD - sawdust*), e misturas com substituição parcial de ambos (*WCSD*). Os compósitos foram inicialmente caracterizados em termos de resistência à compressão a 7 e 28 dias (Figura 4).

Comparado com a mistura de referência (REF), a redução na resistência à compressão a 28 dias para composições com 5 v%, 10 v%, 15 v%, 20 v% e 25 v% de estilha de madeira foi de 6,79%, 10,27%, 19,14%, 28,27% e 33,35%, respetivamente. A incorporação de serradura parece ter menos impacte na resistência à compressão, com reduções de 0,93%, 8,25% e 9,9% na resistência à compressão com 5%, 10% e 15% de incorporação de SD, respetivamente. A redução na resistência à compressão em composições contendo uma mistura de ambas as madeiras com as quantidades respectivas de WC+SD de 7,5 + 7,5 v%, 12,5 + 7,5 v% e 20 + 5 v% foi de 12,14%, 23,70% e 41,29%, respectivamente. A resistência à compressão de todos os compósitos aumentou de forma constante com a idade de cura (15%, ou 6,6 MPa em média).

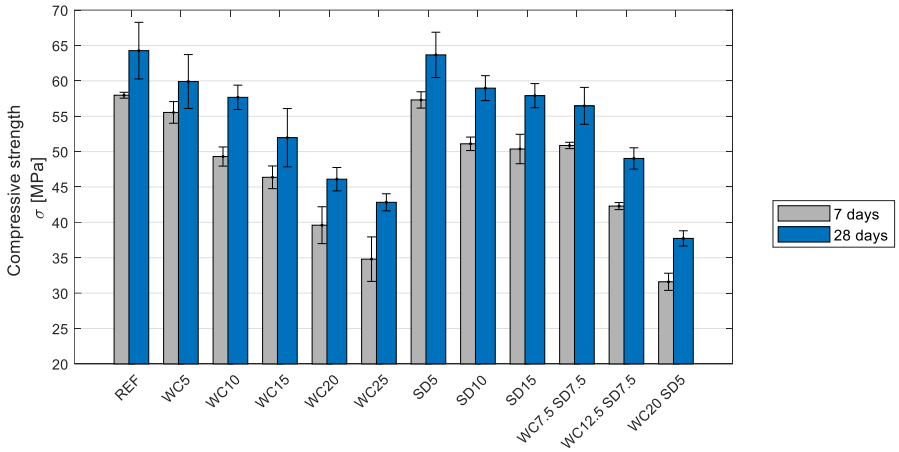


Figura 4: Resistência à compressão de todas as formulações, a 7 e 28 dias.

Todas as misturas foram preparadas com cimento CEM II/A-L 42.5 R. A relação a/c (água/cimento) foi de 0,4. Uma das 12 foi a mistura de referência de cimento Portland (*REF*) apenas com agregados minerais. A quantidade de cimento foi mantida constante em todas as misturas (400 kg/m³). Mais detalhe sobre o desenvolvimento e caracterização destas misturas pode ser consultado em Dias *et al.* (2022b). Foram seleccionadas duas composições para uma caracterização mais extensa (*WC25 e WC20SD5*).

3.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A caracterização mecânica realizada inclui a avaliação da resistência à compressão de acordo com a norma EN 12390-3:2019, do coeficiente de Poisson, do módulo de elasticidade e da massa volúmica determinada de acordo com a EN 1602:2013. As relações entre as várias propriedades mecânicas são apresentadas na Figura 5.

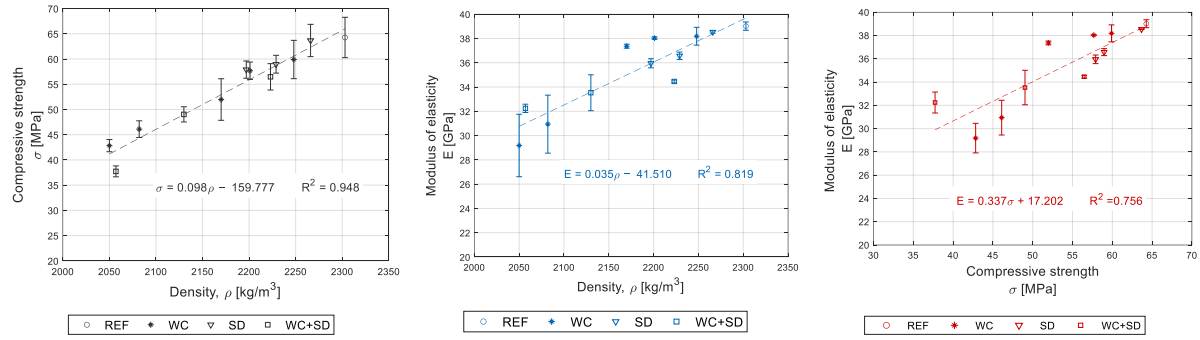


Figura 5: Relação entre as diferentes propriedades mecânicas e físicas: a) resistência à compressão/massa volúmica; b) módulo de elasticidade / massa volúmica; c) módulo de elasticidade / resistência à compressão.

Como esperado, e de forma similar ao observado para a resistência à compressão (Figura 5a), o módulo de elasticidade diminuiu à medida que o teor de madeira aumentou - redução da massa volúmica (Figura 5b). Uma relação aproximadamente linear pode ser obtida entre a massa volúmica e a resistência à compressão e módulo de elasticidade. Apesar de apresentar uma pior correlação, pode ser observada uma relação linear entre os resultados do módulo de elasticidade e a resistência à compressão (Figura 5c).

3.2 DURABILIDADE

O efeito do envelhecimento sob condições extremas foi avaliado através de ciclos de envelhecimento artificial (molhagem-secagem, gelo-degelo e choque térmico) em três provetes antes de os submeter a testes de resistência à compressão. Foram também testadas na mesma idade provetes de referência sem passar pelos ciclos de envelhecimento artificial para avaliar a deterioração da resistência à compressão. Na Figura 6, apresenta-se os resultados médios da resistência à compressão após os ciclos de envelhecimento para as duas formulações seleccionadas (*WD25 e WD20S5*).

Registou-se uma ligeira redução de resistência à compressão após ciclos de molhagem e secagem e ciclos de gelo-degelo. Em ambas as amostras, a resistência à compressão após os ciclos de choque térmico registou uma redução significativa, no entanto considerada pouco comprometedora da utilização do compósito uma vez que eram condições de envelhecimento muito agressivas e pouco prováveis (Dias *et al* 2022b).

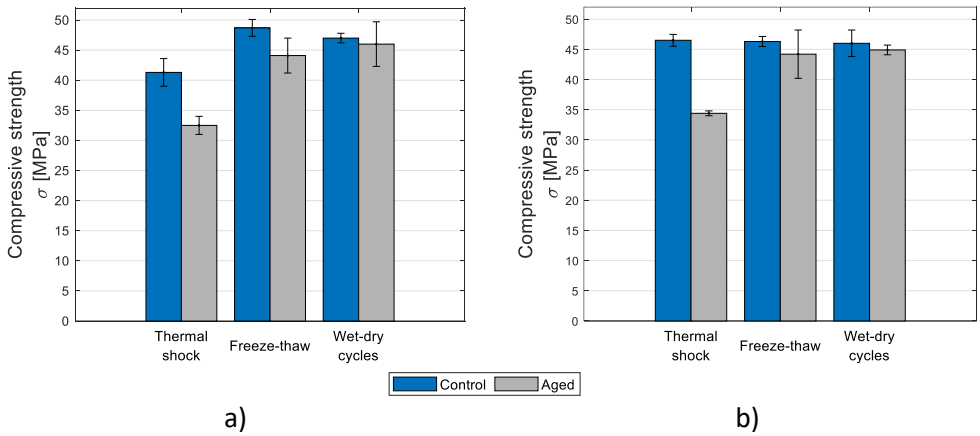
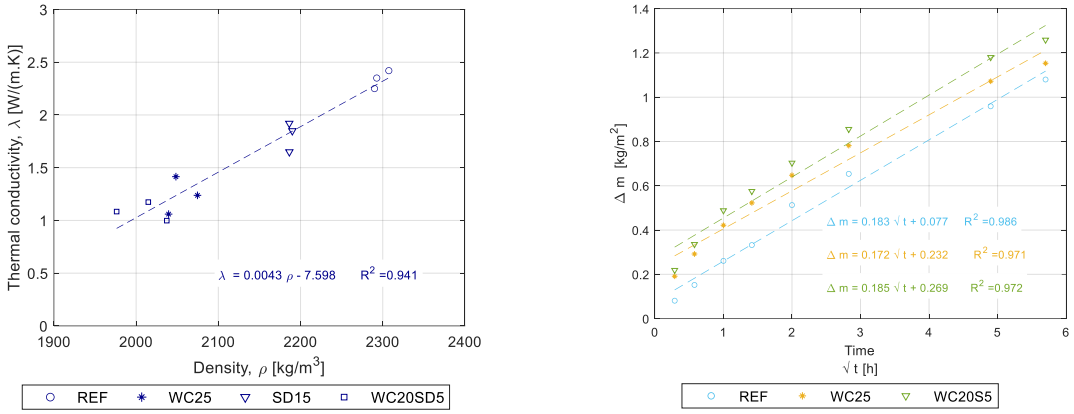


Figura 6: Resistência à compressão após ciclos de envelhecimento acelerado: a) WC25; b) WC20SD5.

3.3 CARACTERIZAÇÃO HIGROTÉRMICA

A caracterização higrotérmica avalia a condutividade térmica e a absorção de água. Os resultados mostraram uma redução considerável na conductividade térmica para *WC20SD5* (54%) e *WC25* (52%) em comparação com a amostra de referência (Figura 7a). A conductividade térmica apresenta uma relação linear com a massa volúmica. Relativamente à absorção de água (Figura 87b), as composições com madeira registaram maior absorção do que a de referência, embora os valores tenham sido bastante reduzidos.



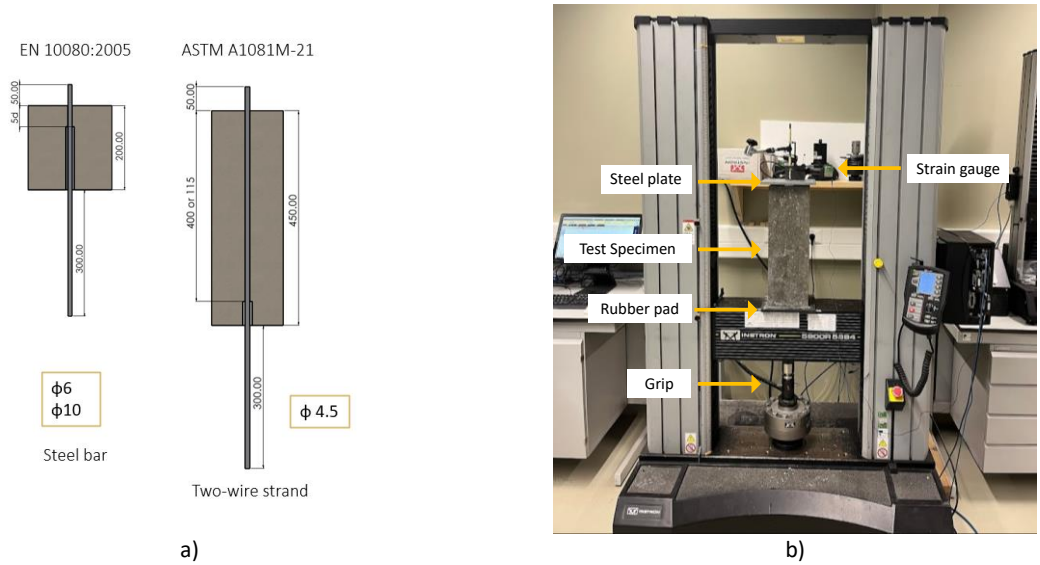
a) b)

Figura 7: Resultados da caracterização higrotérmica: a) conductividade térmica; b) absorção de água.

4 COMPORTAMENTO AÇO- COMPÓSITOS DE BETÃO

4.1 ADERÊNCIA

A aderência entre a armadura ordinária (ϕ6 mm e ϕ10 mm) e o compósito foi determinada experimentalmente de acordo com o procedimento indicado na norma EN 10080:2005. As dimensões dos provetes e os comprimentos de ancoragem (bl) adoptados são ilustrados na Figura 8a. A aderência entre os cordões de pré-esforço (ϕ4,5 mm) foi determinada com base nas normas EN 10080:2005 e ASTM A1081M-21 (Figura 8b), para diferentes comprimentos de ancoragem.



a) b)

Figura 8: Estudo da aderência: a) esquema dos provetes; b) registo fotográfico do aparato de ensaio.

Os resultados obtidos para o estudo da aderência são apresentados na Figura 9.

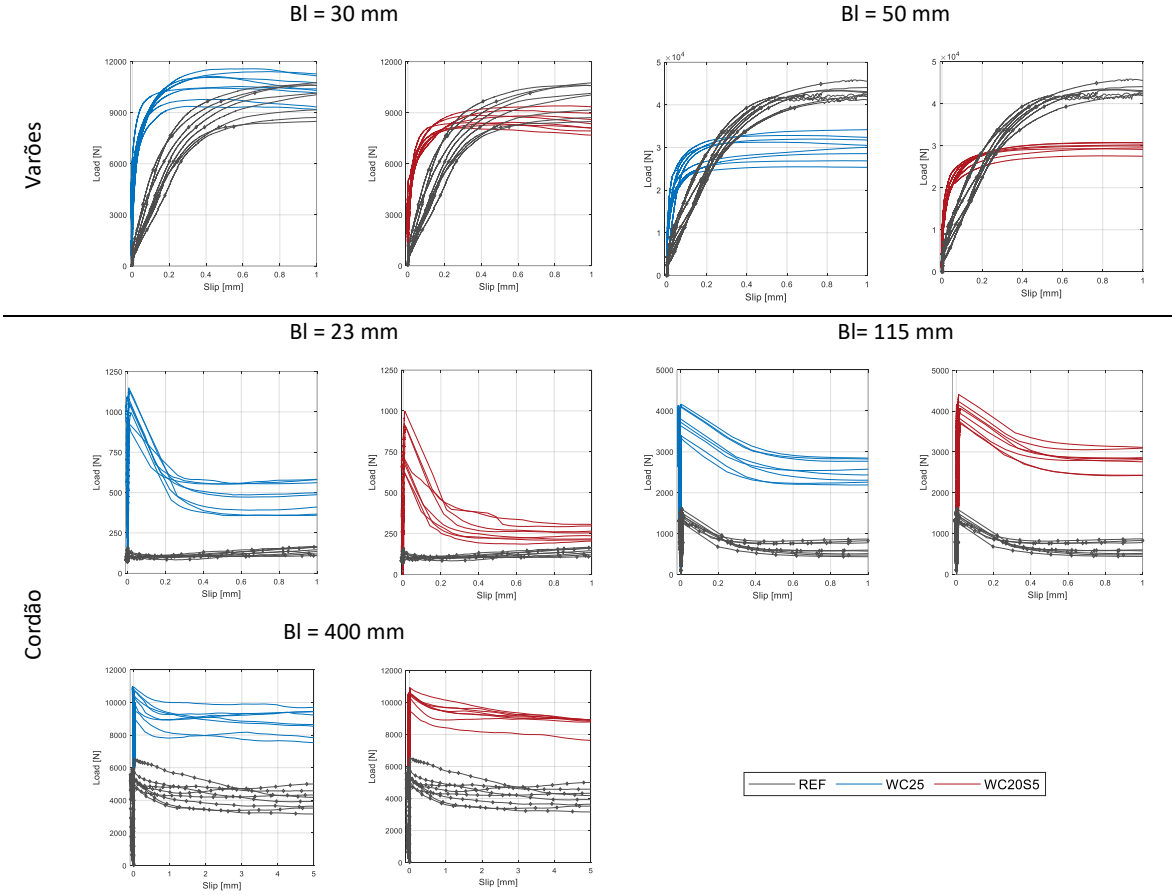


Figura 9: Resultados do estudo da aderência.

Para o reforço convencional (varões), a incorporação de madeira parece criar uma melhor interacção mecânica ao aumentar o componente de atrito como mecanismo de resistência. Para as amostras de referência, o deslizamento entre o varão e o betão ocorre para cargas mais baixas. No entanto, foram obtidas resistências ao arrancamento mais altas para as amostras de referência sem resíduos de madeira devido à sua resistência à compressão ser substancialmente maior. Essa diferença é mais significativa para as amostras ϕ10 mm do que para as amostras ϕ6 mm.

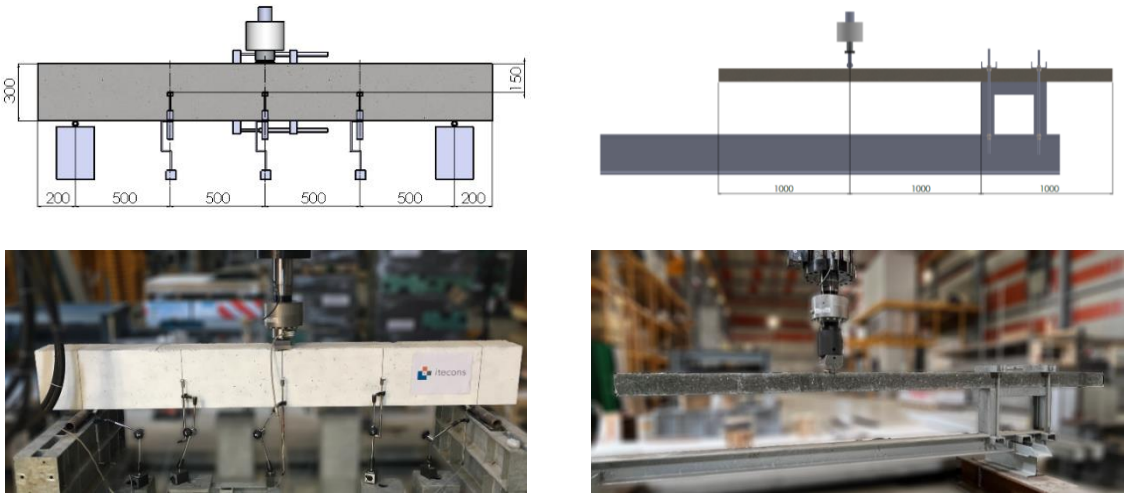
O comprimento de ancoragem indicado na ASTM A1081M-21 (aproximadamente 400 mm) garante um desenvolvimento adequado para testar a aderência entre cordões e betão. No entanto, as dimensões das amostras podem ser um inconveniente. No caso de cordões, os resultados mostram que a incorporação de madeira tem um efeito positivo no aumento de aderência, demonstrando assim a adequação desse tipo de compósitos para fins estruturais, especialmente elementos pré-fabricados.

4.2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Para avaliação da aplicação estrutural, vigas armadas com armadura convencional (ϕ6 mm e ϕ10 mm) e vigas armadas com cordão de pré-esforço foram construídas e testadas. Foram produzidas duas vigas armadas com armadura convencional de cada mistura (REF, WC25 e WC20S5), cada uma com 2,40 m de comprimento. Essas vigas foram submetidas a ensaios de flexão em três pontos a 28 dias (Figura 10a).

Foram também fabricadas três vigas de cada mistura (REF, WC25 e WC20S5) com 3,0 m de comprimento e reforçadas com cordões de fios de pré-esforço (ϕ4,5 mm). Foi desenvolvido um sistema especial para aplicar a carga de pré-esforço em laboratório e realizar a betonagem (Dias *et al.*

2023). Duas vigas de cada conjunto foram testadas em flexão em consola e a terceira foi submetida a testes de fadiga sob condições de flexão a 28 dias (Figura 10b).



a) b)

Figura 10: Ensaios de flexão: a) vigas com armadura convencional; b) vigas com pré-esforço.

Na Figura 11, são apresentados os resultados dos ensaios realizados aos elementos estruturais. Nos testes de flexão das vigas com armadura ordinária, o betão de referência apresentou fissuras sob cargas mais baixas do que os compósitos com madeira e apresentou rigidez à flexão muito maior do que a dos compósitos. As vigas com pré-esforço foram submetidas à fadiga em flexão. As amostras da mistura de referência e WC25 apresentaram fissuras antes de atingir o final do teste (1.000.000 de ciclos). A amostra WC20S5 não apresentou fissuras visíveis ao final do teste, o que demonstra um melhor comportamento sob condições de carga dinâmica.

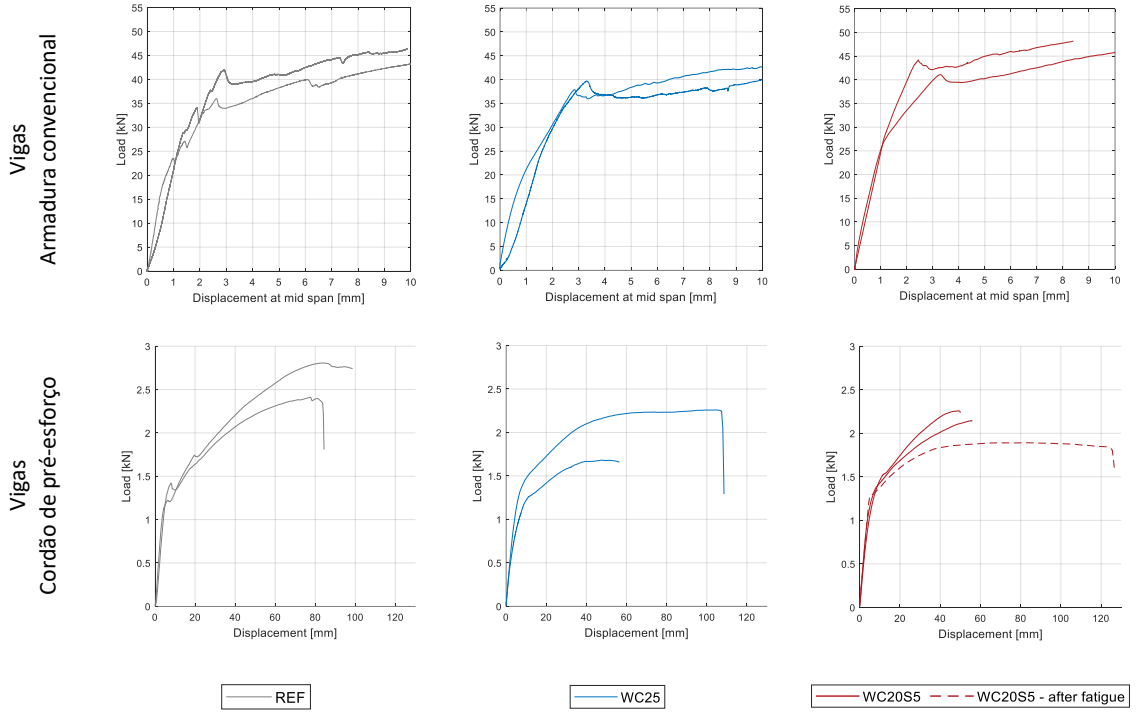


Figura 11: Resultados dos ensaios de flexão.

5 CONCLUSÕES

Os resíduos de madeira são um agregado alternativo promissor que pode substituir parcial ou totalmente os agregados tradicionais em misturas de betão para uso estrutural e não estrutural. No entanto, apesar do seu potencial, a adopção generalizada de resíduos de madeira como agregado no betão ainda é limitada.

Neste trabalho, os resíduos de madeira de quatro fontes diferentes foram caracterizados para avaliar a presença de substâncias lixiviantes e determinar propriedades químicas e físicas relevantes para a produção de compósitos cimentícios. Inicialmente, foram preparadas pastas de cimento com extractivos de madeira, seguidas de pastas contendo partículas de madeira, para avaliar a compatibilidade com o ligante de cimento Portland.

Após a caracterização dos resíduos de madeira e a avaliação da compatibilidade, foi realizado um estudo experimental extenso para investigar a viabilidade de incorporar madeira sob a forma de estilha e serradura em misturas de betão. Foram desenvolvidas doze misturas incorporando diferentes percentagens de partículas de madeira e foram submetidas a uma caracterização abrangente do desempenho mecânico (por exemplo, resistência à compressão, módulo de elasticidade). Todas as misturas demonstraram uma resistência à compressão a 28 dias superior a 30 MPa, indicando a sua adequação para aplicações estruturais. Com base nos resultados, duas misturas com características optimizadas foram seleccionadas para todos os trabalhos subsequentes. As misturas seleccionadas foram avaliadas em termos de durabilidade e características higrotérmicas. A resistência à compressão permaneceu acima dos critérios predefinidos de 25 MPa mesmo após passar por processos relevantes de envelhecimento artificial. As propriedades higrotérmicas registadas também mostraram resultados promissores em comparação com a mistura de referência.

Numa fase posterior, foi avaliada a aderência aço-betão através de ensaios de *pull-out*. Os ensaios foram realizados em varões de aço (ϕ6 mm e ϕ10 mm) e cordão de dois fios (ϕ4,5 mm) adoptando diferentes comprimentos de ligação, 5 d (com base na EN 10080:2005), o passo do cordão e 400 mm (com base na ASTM A1081M-21). Os resultados revelaram que a incorporação de madeira nos compósitos melhorou a interação mecânica ao aumentar o componente de fricção como um mecanismo de resistência. No caso dos cordões, independentemente dos compósitos de madeira-betão e do comprimento de ancoragem, a aderência foi superior. Por fim, foram construídos elementos estruturais em escala real para avaliar a viabilidade de usar estes compósitos em aplicações estruturais. Ensaios de flexão e flexão mais fadiga foram realizados para examinar o comportamento sob cargas estáticas e dinâmicas. Concluiu-se que o betão de referência sem incorporação de madeira exibiu fissuração a cargas mais baixas em comparação com os compósitos de madeira-betão e apresentou rigidez à flexão significativamente maior do que os compósitos de madeira-betão. Os compósitos de madeira-betão com serradura resistiram com sucesso aos ensaios de flexão por fadiga sem fissuração, indicando resistência a cargas cíclicas.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da bolsa de doutoramento PD/BD/150575/2020, do Programa Doutoral EcoCoRe. Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

J. de Brito, R. Kurda, The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials, J. Clean. Prod. 281 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558.

M. Thomas, Recent tendencies in waste-based aggregates in concrete production, Civ. Environ. Eng. Reports. 31 (2021) 43–62. https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0019.

G. Faraca, A. Boldrin, T. Astrup, Resource quality of wood waste: The importance of physical and chemical impurities in wood waste for recycling, Waste Manag. 87 (2019) 135–147. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.005.

T.S. Thandavamoorthy, Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete, Eur. J. Environ. Civ. Eng. 20 (2016) 125–141. https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631.

S. Dias, J. Almeida, B. Santos, P. Humbert, A. Tadeu, J. António, J. de Brito, P. Pinhão, Lightweight cement composites containing end-of-life treated wood - Leaching, hydration and mechanical tests, Constr. Build. Mater. 317 (2022a) 125931. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125931.

S. Dias, A. Tadeu, J. Almeida, P. Humbert, J. António, J. de Brito, P. Pinhão, Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing wood chips and sawdust: An experimental approach, Buildings. 12 (2022b) 1277. https://doi.org/10.3390/buildings12081277.

S. Dias, A. Tadeu, J. Almeida, J. António, J. de Brito, Steel-concrete bond behaviour of concrete mixes with wood waste: pull-out and bending tests of full-scale beams and columns, Constr. Build. Mater. 383 (2023). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131343.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS EM FIM DE VIDA: DESEMPENHO MECÂNICO E ACÚSTICO

German Vela [a*]; António Figueiredo [a]; Vítor Costa [b]; Romeu Vicente [a]

[a]RISCO - Riscos e Sustentabilidade na Construção, Universidade de Aveiro (UA), Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal. *Autor correspondente: german@ua.pt

[b]TEMA - Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Universidade de Aveiro (UA), Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro Portugal.

RESUMO

A gestão dos resíduos das pás de turbinas eólicas no final da sua vida útil é um desafio complexo, devido à crescente produção global de energia eólica. Em 2022, foram adicionados com sucesso 77,6 GW de capacidade elétrica à rede, produzida a partir de energia eólica, totalizando 906 GW, com um notável crescimento anual de 9%. Estima-se que, até 2034, serão geradas cerca de 200.000 toneladas de resíduos de pás de turbinas eólicas. Reciclar as pás das turbinas eólicas para desempenharem a mesma função não é a solução, devido aos materiais usados, como fibra de vidro, fibra de carbono e várias resinas, os quais não são facilmente recicláveis. Urge, portanto, encontrar soluções alternativas económicas e ecológicas para os resíduos de turbinas eólicas em fim de vida.

Este estudo aborda a utilização dos resíduos de pás de turbinas eólicas em fim de vida para produção de painéis para uso em edifícios. Utiliza-se um processo de reciclagem mecânica, que envolve o corte e trituração das pás, sendo os resíduos resultantes combinados com bioligantes para produzir painéis com boas características de isolamento acústico. Esses painéis foram caracterizados experimentalmente quanto à sua resistência mecânica (compressão e flexão) e capacidade de absortância e transmitância acústica.

Os resultados indicam que o biocompósito pode ser utilizado para produção de painéis com boas características mecânicas e boas propriedades acústicas para aplicação em edifícios. Esses painéis apresentam-se como uma alternativa viável às soluções convencionais de isolamento acústico, promovendo a sustentabilidade e a economia circular, e sendo uma solução viável e promissora para o encaminhamento dos resíduos de pás de turbinas eólicas em fim de vida.

Palavras-chave: Pás de turbinas eólicas em fim de vida, Economia circular, Painéis, Características mecânicas, Isolamento acústico, Absorção sonora.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da energia eólica está com um ritmo de crescimento elevado, impulsionada pela procura crescente de fontes de energia renováveis e sustentáveis. Segundo a WindEurope (2023), a capacidade global de produção de energia elétrica a partir da energia eólica atingiu 906 GW em 2022, registando um crescimento anual de 9%. No entanto, esse crescimento traz consigo um desafio ambiental cada vez mais premente: a gestão dos resíduos provenientes das pás de turbinas eólicas no fim de sua vida útil. Estima-se que na Europa, até 2050, precisarão de ser adequadamente tratadas aproximadamente 300.000 toneladas desses resíduos (Lichtenegger et al. 2020).

Por outro lado, o setor da construção emerge como um dos principais contribuintes para as emissões de CO_2, com números históricos de 10 gigatoneladas, correspondendo a cerca de 34% do consumo

global de energia e a aproximadamente 37% das emissões de gases de efeito estufa em 2021 (United Nations Environment Programme 2022). Atualmente, espera-se que os materiais de construção cumpram não apenas requisitos estruturais, térmicos e acústicos, mas também de sustentabilidade.

A reciclagem convencional de pás de turbinas eólicas tem-se mostrado desafiadora devido à complexidade de sua composição, que inclui materiais como fibra de vidro, fibra de carbono e resinas não biodegradáveis (Shen et al., 2023). Tal dificulta o processo de reciclagem, podendo resultar na deposição e acumulação desses resíduos em aterros, com impactos ambientais negativos.

A utilização de bioligantes na criação de biocompósitos tem ganho destaque na indústria da construção civil, pois confere-lhes características ecológicas e sustentáveis. Esses bioligantes podem ser derivados de fontes renováveis, como óleos vegetais, resinas naturais e fibras vegetais, e apresentam diversas vantagens em relação aos ligantes convencionais à base de petróleo (Muthuraj et al. 2019). Entre os seus benefícios destacam-se a menor pegada de carbono e a excelente compatibilidade com materiais de base em fibras (Mati-Baouche et al., 2014).

Diferentes estudos que utilizaram bioligantes, como o caso de Trobiani Di Canto et al. (2023) que apresentou uma solução de placa isolante utilizando farelo de trigo como material de reforço e casca de banana como bioligante, demonstraram que é possível obter placas isolantes com propriedades mecânicas adequadas. Outro exemplo de sucesso é o estudo de Mati-Baouche et al. (2014) no qual o material de reforço foi o caule de girassol e o bioligante a quitosana, mostrando que é viável criar painéis isolantes à base de materiais biológicos com características comparáveis às soluções comerciais, com destaque para as propriedades mecânicas e acústicas. Outro caso é o estudo de Hajj et al. (2011) que usou um processo térmico, em fase húmida e em baixa temperatura, para ligar fibras de linho, resultando em painéis com boas características, com destaque para as características acústicas.

É neste contexto que este estudo propõe uma alternativa promissora e sustentável para a gestão e reutilização dos resíduos de pás de turbinas eólicas em fim de vida: a reciclagem e transformação desses resíduos em painéis de isolamento térmico e acústico para aplicação na construção civil. Recorrendo a um processo mecânico, as pás são cortadas e trituradas, resultando num material granular que combinado com os bioligantes adequados é utilizado no fabrico de painéis com boas características mecânicas e acústicas. Esta abordagem contribui para a sustentabilidade ambiental, e promove a economia circular, reutilizando materiais de componentes em fim de vida que, de outro modo, seriam difíceis de gerir e provocariam impacte ambiental negativo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho é proposta uma metodologia para avaliar a viabilidade técnica da reciclagem de materiais provenientes de pás de turbinas eólicas em fim de vida, para produção de um biocompósito na forma de placas para utilização na construção de edifícios, com boas características mecânicas e acústicas.

2.1 MATERIAIS

As fibras de vidro recicladas foram obtidas a partir de pás de turbinas eólicas em fim de vida. O processo de reciclagem mecânica envolve inicialmente o corte das pás em pedaços menores, com dimensões de aproximadamente 800 mm x 800 mm, para facilitar o transporte e manuseamento. Esses troços são posteriormente cortados em fragmentos de aproximadamente 50 mm x 50 mm, a fim de possibilitar a trituração utilizando um moinho de lâminas. Este moinho está equipado com uma

peneira de 10 mm, com o objetivo de obter um material particulado o mais homogéneo possível. As diferentes etapas de corte, trituração e obtenção do material granular final encontram-se ilustradas na Figura 1.

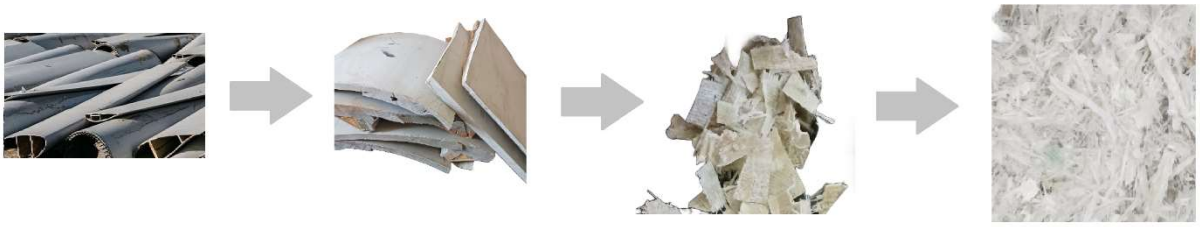


Figura 1 – Processos de corte e trituração mecânica de pás em fim de vida.

Foi usado um bioligante alginato de sódio ($C_6H_7NaO_6$) com aspeto de sal, com uma viscosidade de 350-550 mPas em solução aquosa a 1% (a 20 °C), com um pH de 8,0. Para obtenção do bioligante foram também usados sulfato de cálcio (CaSO4, cura e resistência à água) e citrato de sódio ($C_6H_5O_7Na_3$. $2H_2O$, regulador de pH).

2.2 PROCESSAMENTO DO BIOCOMPÓSITO

A Figura 2 ilustra as várias etapas de processamento do biocompósito. As fibras obtidas através do processo de trituração descrito são selecionadas. Enquanto isso, o alginato de sódio, o citrato de sódio e o sulfato de cálcio são misturados manualmente a seco à temperatura ambiente (16 °C). O solvente usado é água destilada também à temperatura ambiente. O solvente e o ligante são misturados num agitador mecânico operando a 800 rpm durante 60 min. O bioligante é gradualmente adicionado durante todo o processo de agitação até que seja obtida uma pasta viscosa. A base do biocompósito obtém-se depois de misturar manualmente as fibras e o bioligante durante 10 min, que é então depositada em moldes. Após isso, as amostras foram sujeitas a um processo de cura em estufa, à temperatura de 50 °C durante 72 horas.

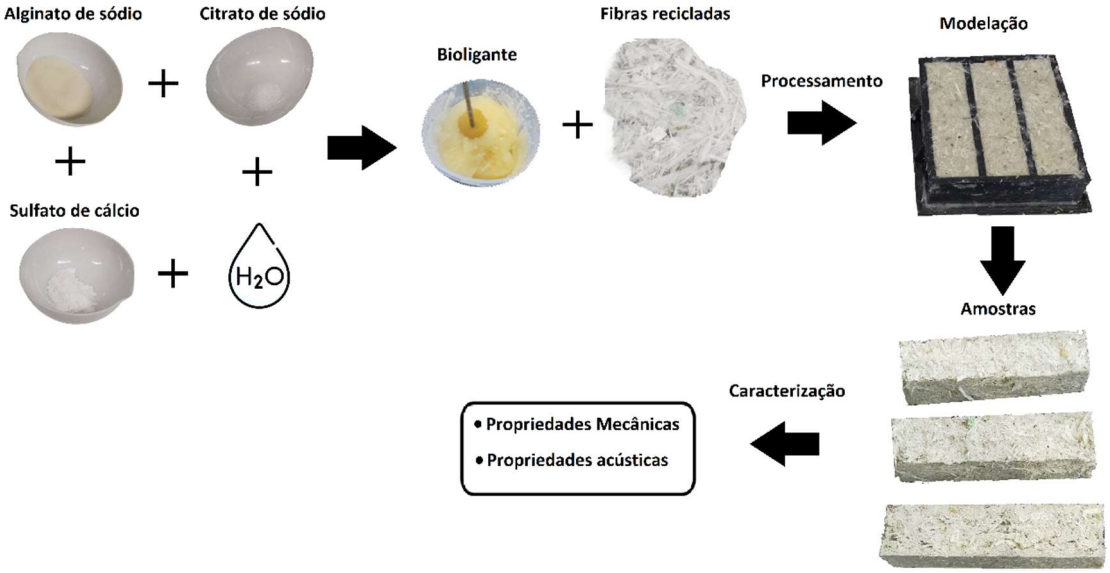


Figura 2 – Etapas principais do processamento do biocompósito.

A fórmula selecionada (ótima) para o biocompósito foi determinada por meio de experimentação preliminar, na qual foram testadas cinco composições distintas, variando as percentagens de alginato em relação à percentagem de fibras. A composição escolhida foi aquela que apresentou melhor trabalhabilidade e propriedades mecânicas para a aplicação pretendida. A formulação final consiste nas seguintes relações em peso dos correspondentes agregados pelo peso total da amostra: 64,4 % (p/p) de água, 32,8 % (p/p) de fibras recicladas, 2,3 % (p/p) de alginato de sódio, 0,4 % (p/p) de sulfato de cálcio e 0,1 % (p/p) de citrato de sódio.

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

O material biocompósito foi ensaiado em flexão e em compressão, utilizando uma máquina de ensaios universal (Shimadzu AG-IC 100kN, equipada com uma célula de carga de 5 kN, conforme prescrito pela norma NP EN 1015-11). Para os ensaios de comportamento em flexão foram preparadas três amostras com 40 mm x 40 mm x 160 mm, enquanto para os ensaios de comportamento em compressão foram preparadas três amostras com 40 mm x 40 mm x 40 mm, seguindo o estabelecido pela mesma norma.

2.4 ENSAIOS ACÚSTICOS

Para determinação do coeficiente de absortância do biocompósito foi realizado um ensaio de acordo com a norma ISO 10534-2. Este ensaio envolveu o uso de uma amostra do material biocompósito com 100 mm de diâmetro e 40 mm de espessura para analisar nas frequências entre 100 e 1000 Hz, e uma segunda amostra com 29 mm de diâmetro e 25 mm de espessura para analisar nas frequências entre 1000 e 5000 Hz. Para avaliação da transmitância foi realizado um ensaio de acordo com as especificações da norma ASTM E1050, 2019, utilizando as mesmas amostras e nas mesmas gamas de frequência. Ambos os ensaios foram realizados utilizando o tubo de impedância Holmarc ITA219. Na Figura 3 encontra-se uma imagem das amostras utilizadas nos ensaios acústicos.

Figura 3 – Amostras para ensaios acústicos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESEMPENHO MECÂNICO

A avaliação do desempenho mecânico do biocompósito desenvolvido é um parâmetro relevante, dado que poderá permitir aplicações em diferentes contextos. Da literatura verifica-se que algumas soluções isolantes de base biológica apresentam baixa capacidade resistente em compressão e flexão (Mati-

Baouche et al. 2014). Uma vez conhecidas as propriedades mecânicas do biocompósito é possível avaliar a viabilidade e o potencial da sua aplicação na construção.

A resistência à compressão apresenta valores de 185,75 ± 98,59 kPa em deformação a 10 % (avaliada pelo deslocamento entre pratos e não por medição nos provetes). Esses resultados sugerem que as fibras recicladas proporcionam excelente capacidade mecânica devido à sua boa interação com o bioligante. Quando comparado com outras soluções comerciais, como a lã mineral, com uma resistência à compressão de 10-65 kPa (Saint-Gobain 2024a) (Saint-Gobain 2024b), ou o EPS, que pode atingir 150 kPa (Saint-Gobain 2024c) em deformações a 10 %, a solução desenvolvida apresenta valores superiores. Para aplicações em que a resistência à compressão é importante, o biocompósito desenvolvido é capaz de cumprir os requisitos. No lado esquerdo da Figura 4, são exibidos os valores das três amostras ensaiadas em compressão do biocompósito produzido. Enquanto isso, do lado direito, é mostrada a média dos resultados.

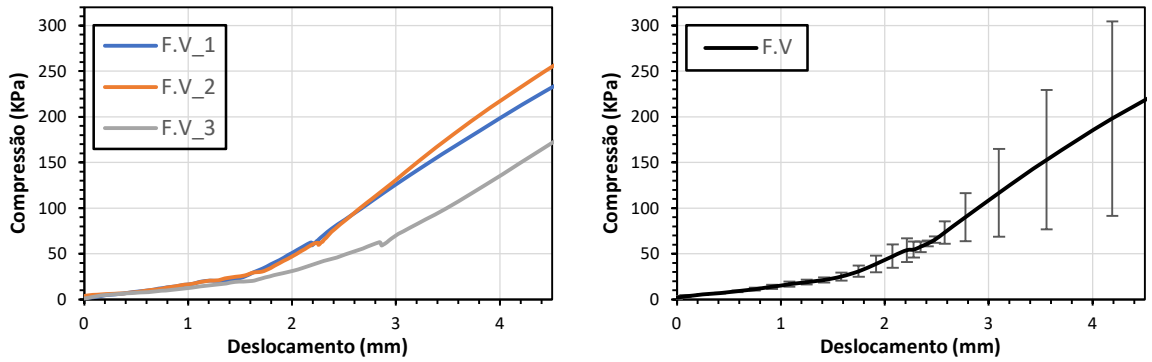


Figura 4 – Resultados dos ensaios em compressão (F.V_# – Referência do provete de Fibra de Vidro).

Os ensaios de resistência à flexão conduziram a um valor de 432,72 ± 52,47 kPa (avaliada pelo deslocamento entre pratos e não por medição nos provetes), o que é significativamente maior que os 200 kPa de um EPS comercial (Saint-Gobain 2024c). Na Figura 5, os valores de três amostras submetidas ao ensaio estão representados no lado esquerdo. A média dessas medições é mostrada no lado direito. Uma vez otimizada, a formulação usada apresenta uma boa relação entre o bioligante e a percentagem de fibra reciclada, resultando em propriedades mecânicas facilmente comparáveis, ou até superiores, às de soluções disponíveis na indústria. O biocompósito tem potencial para ser utilizado no fabrico de painéis isolantes para aplicação em edifícios.

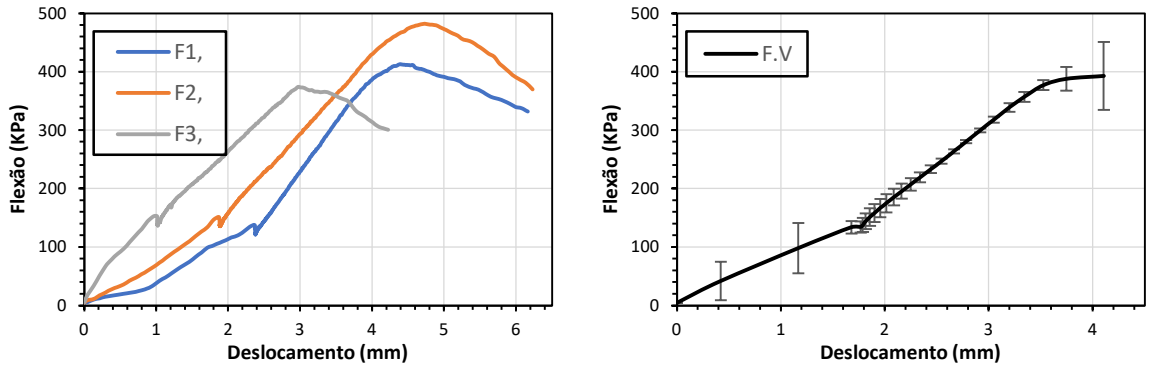


Figura 5 – Resultados dos ensaios em flexão (F.V_# – Referência do provete de Fibra de Vidro).

3.2 DESEMPENHO ACÚSTICO

Os resultados do coeficiente de absorção do biocompósito encontram-se representados na Figura 6. O coeficiente de absorção do biocompósito testado alcança um valor máximo de aproximadamente 87 % de absorção na gama de frequências de 500 a 700 Hz. Em comparação com a lã mineral, observa-se que na gama de frequências de 200 a 1000 Hz, o biocompósito apresenta valores cerca de 40% superiores. No entanto, na gama de 1000 a 5000 Hz os valores são aproximadamente 28% inferiores.

O coeficiente de absorção acústica do biocompósito desenvolvido pode ser considerado com excelentes propriedades acústicas de absorção para as frequências mais baixas. Estes resultados sugerem que o biocompósito pode ser uma alternativa eficaz como material acústico, especialmente para as frequências mais baixas. É de notar que os isolantes acústicos usados nas construções são testados para frequências de 0 a 4000 Hz (El et al. 2011).

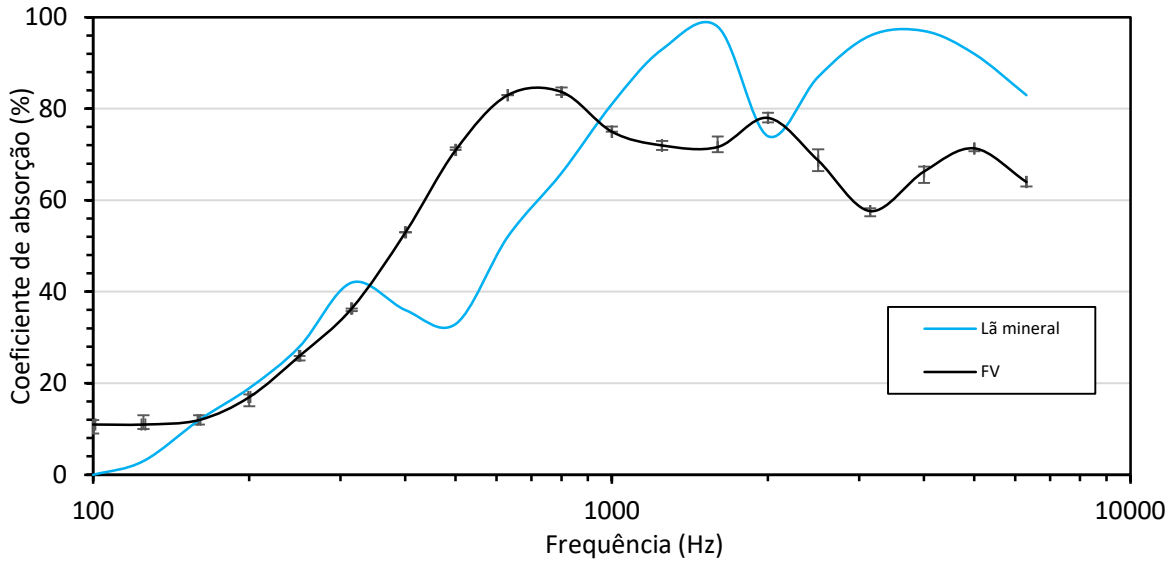


Figura 6 – Resultados da evolução do coeficiente de absorção acústica.

Os resultados da transmitância do biocompósito são apresentados na Figura 7. O biocompósito apresenta valores superiores aos da lã mineral, em toda a gama de frequências (100 a 5000 Hz), com os maiores valores observados na gama de frequências de 1600 a 3000 Hz. O material biocompósito apresenta melhores características de transmitância que a lã mineral para todas as frequências, o que o torna uma boa solução para produção de paneis isolantes acústicos para utilização em edifícios.

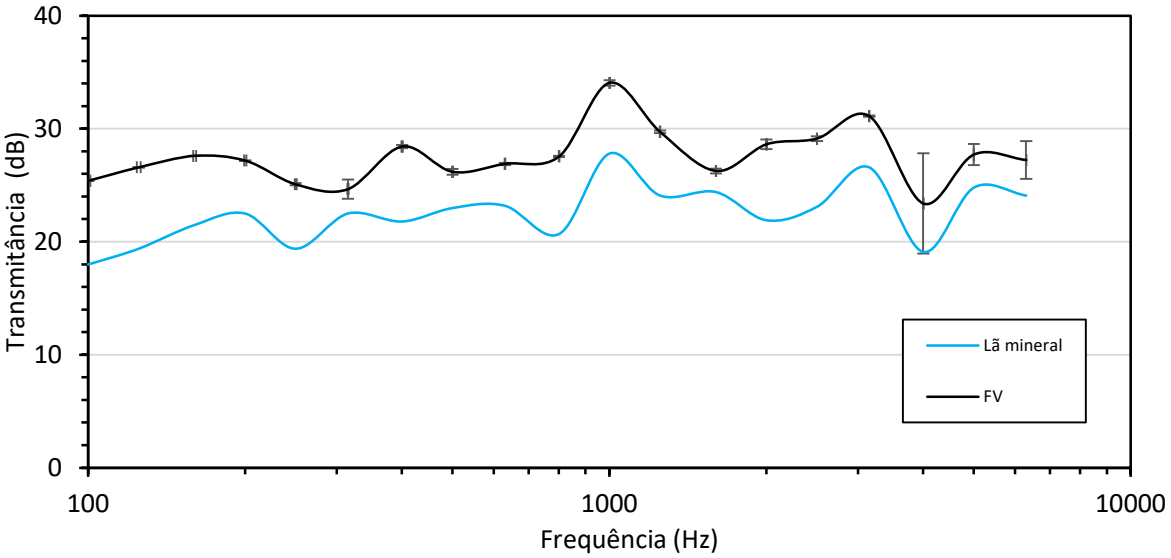


Figura 7 – Resultados da evolução da transmitância.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho resulta num contributo significativo para a sustentabilidade da indústria eólica, ao propor uma solução inovadora para o reaproveitamento dos materiais de pás de turbinas eólicas em fim de vida. Os bioligantes, como o alginato de sódio, mostraram-se como uma opção válida para combinações com materiais de base de fibra de vidro para a redução da dependência de recursos fósseis e do impacto ambiental associado. No entanto, observou-se também que a percentagem de alginato de sódio tem importante influência nas propriedades mecânicas das amostras. Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a solução apresentada oferece propriedades mecânicas equivalentes ou até mesmo superiores às soluções comerciais convencionais. Adicionalmente, os coeficientes de absorção apontam que o biocompósito pode ser uma alternativa eficaz como atenuador acústico, especialmente para frequências mais baixas. Também se constatou que o material biocompósito possui melhores características de transmitância em todas as frequências analisadas. Em suma, este estudo demonstra o potencial promissor do biocompósito à base de fibras de vidro obtidas de pás de turbinas eólicas em fim de vida como solução para a redução de resíduos neste sector, como um material para aplicação no sector da construção, promovendo a economia circular e a sustentabilidade ambiental. A experimentação conducente à otimização da composição, e a exploração de outras características funcionais como a porosidade ou de diferentes formas nas superfícies das placas, abrem caminho para investigações futuras e para o desenvolvimento de soluções inovadoras, promissoras e sustentáveis para a indústria da construção.

AGRADECIMENTOS

Esta trabalho de investigação foi apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) [DOI 10.54499/UI/BD/154572/2022] e pelo Centro de Investigação de Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [UI/BD/154572/2022].

REFERÊNCIAS

El, N., Mboumba-mamboundou, B., Dheilly, R., Aboura, Z., Benzeggagh, M., & Queneudec, M. (2011). Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows. *Industrial Crops & Products*, *34*(1), 921–928. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.02.012

Hajj, N. El, Mboumba-Mamboundou, B., Dheilly, R.-M., Aboura, Z., Benzeggagh, M., & Queneudec, M. (2011). Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows. *Industrial Crops and Products*, *34*(1), 921–928. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.02.012

Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., & Siegl, S. (2020). Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste Management*, *106*, 120–131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.018

Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Lebert, A., Sun, S., Lopez-Mingo, C. J. S., Leclaire, P., & Michaud, P. (2014). Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products*, *58*, 244–250. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022

Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., & Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, *135*, 238–245. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.053

Saint-Gobain. (2024a). *Acutex*. https://construir.saint-gobain.pt/sites/mac3.saint-gobain.pt/files/assets/MAM/assets/1/AFF31A09D9AC44AC9384A39182D8BB25/doc/E8D96C1FB44B431EAB7BBF2D73F6EFF7/FT_ACUTEX.pdf

Saint-Gobain. (2024b). *Panel PST*. https://construir.saint-gobain.pt/sites/mac3.saint-gobain.pt/files/assets/MAM/assets/1/AFF31A09D9AC44AC9384A39182D8BB25/doc/BAEEAF01FE954908B8C9A6A9FCF7E2C2/FT_PAINEL_PST.pdf

Saint-Gobain. (2024c). *Webertherm EPS 150*. https://construir.saint-gobain.pt/sites/mac3.saint-gobain.pt/files/assets/MAM/assets/1/125D8AC2C38D4A498675522E0CD98E10/doc/0B0D204547D444EF992F54005234A7E2/Ficha_Tcnica_Webertherm_EPS_150.pdf

Shen, M.-Y., Guo, Z.-H., & Feng, W.-T. (2023). A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar. *Composites Part B: Engineering*, *264*, 110878. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110878

Trobiani Di Canto, J. A., Malfait, W. J., & Wernery, J. (2023). Turning waste into insulation – A new sustainable thermal insulation board based on wheat bran and banana peels. *Building and Environment*, *244*, 110740. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110740

United Nations Environment Programme. (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.

WindEurope. (2023). *Global Wind Energy Outlook 2023*. https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO E DA ECOEFICIÊNCIA DE BIOCONCRETOS DE BAMBU (BCB) COM SOLO E CINZA DE CASCA DE ARROZ

Arthur Ferreira de Araujo[a]; Nathalia Andrade da Silva[a]; Mônica Cristina Pinto[a]; Thiago Melo Grabois[b]; Lucas Rosse Caldas[a,b]; Romildo Dias Toledo Filho[a]; Thomas Schatzmayr Welp Sá[a].

[a]PEC/COPPE/UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, arthur.araujo@coc.ufrj.br , nathalia.silva@coc.ufrj.br , monica.pinto@coc.ufrj.br , lucas.caldas@fau.ufrj.br , prof.romildotf@gmail.com , thomas.sa@coc.ufrj.br .

[b]PROARQ/FAU/UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, grabois@fau.ufrj.br .

RESUMO

Este trabalho avalia a ecoeficiência de bioconcretos de bambu (BCB) com solo através de um ecoindicador que considera um critério ambiental (emissões de CO_2-eq.) frente a outro de desempenho mecânico (MPa). As misturas estudadas possuem 45% do seu volume composto por bioagregado de bambu em uma matriz cimentícia ternária com 35% de cimento, 40% de cinza volante e 25% de cinza da casca de arroz. Além disso, objetivou-se investigar a influência da variação do teor de solo nas misturas em 10%, 15% e 20% em substituição à matriz cimentícia. A metodologia envolveu: o processamento e a caracterização do solo e do bambu; o estudo de dosagem, a moldagem das misturas e realização dos ensaios mecânicos e; a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para contabilizar as emissões de gases de efeito estufa da produção das misturas. Para isso, o escopo adotado na ACV foi do berço ao portão, considerando uma metodologia específica para contabilização do carbono biogênico das partículas de bambu. As misturas apresentaram valores de compressão uniaxial entre 7-9 MPa ao passo que a ACV demonstrou um balanço negativo de emissões para as mistura com solo, devido: ao alto teor de biomassa adotado; à adoção de uma matriz com grande quantidade de materiais cimentícios suplementares; e a substituição da matriz cimentícia por solo.

Palavras-chave: Ecoindicador, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Bioconcreto de bambu com solo, Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais conceitos alinhados ao futuro sustentável é o da ecoeficiência, uma estratégia de gestão para fazer mais com menos, ou ainda, utilizar os recursos naturais eficientemente para atingir as necessidades humanas (OECD, 1998). Para a indústria da construção, trata-se de uma medida importante que traz a visão de todo o ciclo de vida de uma edificação e visa uma otimização multifuncional de materiais. A ecoeficiência pode ser quantificada através de diversos ecoindicadores que avaliam um critério ambiental frente a outros critérios, como custo, impacto social, desempenho mecânico, térmico, acústico, entre outros. Considerando o atual contexto de emergência climática, o critério ambiental de emissões equivalentes de dióxido de carbono, CO_2-eq (também conhecido como gás carbônico equivalente), ganha importância na avaliação da ecoeficiência de materiais de construção por tratar de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em relação a outros critérios de desempenho.

As edificações são reconhecidas como uma peça crítica para o futuro de baixo carbono e como um desafio global para a integração com o desenvolvimento sustentável (IPCC, 2023). Junto com a indústria da construção, as edificações são responsáveis por cerca de 40% das emissões globais de GEE relacionadas à energia (UNEP, 2022). Por conta disso, enfatiza-se a importância de que a descarbonização do setor seja acelerada em escala e velocidade, sendo necessária sua completa descarbonização até 2050 para que o Acordo de Paris seja cumprido (UNEP, 2022).

Nesse sentido, o setor da construção volta-se para soluções materiais e tecnológicas consideradas baixas ou ainda negativas em carbono. Casos prósperos são os materiais naturais como os biomateriais de construção (materiais de origem vegetal) e, também, a construção com terra, que possuem o potencial de reduzir tanto as emissões incorporadas quanto as emissões operacionais do ciclo de vida das edificações. Esses materiais costumam possuir baixa energia incorporada, baixo carbono, propriedades térmicas adequadas que promovem a eficiência energética e estão disponíveis em todas as partes do globo (Silva *et al.*, 2018). Ou seja, há diversas vantagens relacionadas ao seu emprego, visto que podem atuar tanto na mitigação quanto na adaptação às mudanças climáticas e promover o uso de mão de obra e materiais locais, diminuindo gastos e emissões com transportes e alinhando o setor com princípios de economia circular.

Exemplos de materiais bastante promissores são as diferentes famílias de bioconcretos, que incorporam diversas estratégias circulares como a incorporação de resíduos agroindustriais reciclados e Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), promovendo a redução das emissões incorporadas e operacionais das edificações em que são empregados. Em países europeus e norte-americanos, o emprego da tecnologia de bioconcretos de cânhamo já é bem desenvolvido devido a suas propriedades térmicas adequadas para climas frios (Pretot *et al.*, 2014; Siqueira *et al.*, 2022). Já no Brasil, onde a produção de cânhamo ainda não é uma opção legalizada, os bioconcretos mais estudados são produzidos com outras biomassas, provenientes de resíduos de atividades agroflorestais abundantes localmente, como bioconcretos de bambu, madeira e casca de arroz (Caldas *et al.*, 2017; Siqueria *et al.*, 2022).

Um avanço interessante na redução da pegada de carbono de bioconcretos foi identificado no trabalho de Araujo *et al.* (2022), que avaliaram as misturas de Sá (2022) de Bioconcretos de Bambu (BCBs) com solo, contendo 45% de bambu (em volume) e matriz cimentícia ternária de cimento, cinza volante (CV) e metacaulinita (MTK), onde o solo atuou como substituto à matriz cimentícia nos teores de 10%, 15% e 20%. Nesse trabalho estimou-se que, para todas as misturas, as emissões de produção dos BCB com solo foram negativas, porém identificou-se um potencial para melhora da pegada de carbono visto que a MTK, material virgem, representou 16% das emissões positivas, que pode ser substituído por outros

MCS, como a Cinza da Casca de Arroz (CCA), que é um resíduo do aproveitamento energético da queima da casca do arroz.

Visto isso, este trabalho se propõe a avaliar a ecoeficiência de BCBs com solo e CCA através de critérios ambiental (emissões de GEE, medido em $kgCO_2$-eq) e de desempenho mecânico (MPa) considerando misturas contendo 45% do seu volume de bioagregado de bambu e matriz cimentícia ternária com 35% de cimento, 40% de CV e 25% de CCA. Além disso, objetiva-se investigar a variação do teor de solo nas misturas em 10%, 15% e 20% em substituição à matriz cimentícia. Até onde se sabe, um BCB com esta composição ainda não foi avaliado, sendo, portanto, uma contribuição do prestente trabalho.

2 METODOLOGIA

A metodologia envolveu o desenvolvimento de um plano experimental com dosagem e moldagem das misturas, a obtenção dos índices de consistência, a cura e obtenção de valores de densidade aparente e de resistência à compressão uniaxial a 28 dias. Além disso, foi realizada também uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do berço ao portão para obtenção da pegada de carbono do processo de produção das misturas e, finalmente, a elaboração dos indicadores de ecoeficiência com o cruzamento dos resultados de desempenho mecânico em relação ao desempenho ambiental.

2.1 PRODUÇÃO DO BIOCONCRETO DE BAMBU (BCB) COM SOLO

Para a produção do BCB com solo, foi utilizada uma dosagem baseada no trabalho de Sá (2022), que empregou 30% de cimento, 40% de CV e 30% de MTK. Entretanto, Araujo *et al.* (2022) analisaram a pegada de carbono dessa mistura e destacaram a significativa contribuição da MTK nas emissões, o que motivou uma análise neste estudo substituindo este material pela CCA, porém o teor de substituição da CCA foi de 25%, conforme recomendações da literatura. Sandhu e Siddique (2017) e Siddika *et al.* (2018) mostram que para uma melhor resistência, o teor de substituição de cimento por CCA recomendado é entre 10% e 25%.

O solo adicionado foi o mesmo utilizado por Sá (2022) em sua pesquisa, proveniente de uma obra no estado do Rio de Janeiro, passando pelo processo de destorroamento e peneiramento, utilizando-se a fração passante pela peneira de 300 µm (representando cerca de 20% do solo original), caracterizado como um solo argiloso de baixa compressibilidade. As frações de substituição do solo em relação aos materiais cimentícios foram de 10%, 15% e 20%.

A fração volumétrica do bambu foi mantida em 45%, utilizando-se bioagregados proveniente do estado do Rio de Janeiro, o qual foi cortado, triturado (2 vezes) e tratado com hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para retirada os extrativos hidrossolúveis, homogeneizado e peneirado para atender à granulometria passante pela peneira de 5,6 mm e retida na peneira de 1,18 mm. O tratamento com $Ca(OH)_2$ foi realizado na proporção de água:bambu de 7:1, com 1,85 g de $Ca(OH)_2$ por litro de água, por uma hora.

Dos materiais cimentícios, o cimento adotado foi do tipo CP V – ARI de alta resistência inicial, a CV foi da marca *Pozo Fly* proveniente de Capivari de Baixo (SC) e a CCA da marca *Silcca Nobre*, proveniente de Alegrete (RS). Como aditivo, foi utilizado cloreto de cálcio, correspondendo a 3% da massa dos materiais finos (matriz + solo), com uma relação água/finos de 0,3. Além disso, foi considerada a água de compensação para a absorção dos bioagregados.

Este plano experimental tinha como critérios preliminares: a obtenção de misturas com resistência à compressão mínima de 4 MPa, sugerida para moldagem de blocos de alvenaria estrutural; e o

espalhamento de 180 ± 5 mm, a fim de obter bioconcretos trabalháveis e adensáveis por vibração mecânica (da Gloria, 2020). Dessa maneira, foi elaborado o Quadro 1, que apresenta o consumo de materiais para 1 m³ de cada mistura. A moldagem das quatro misturas foi realizada em laboratório na cidade do Rio de Janeiro.

Quadro 1 - Consumo de materiais para 1 m³ de cada mistura de bioconcreto de bambu com solo.

Mistura	Solo		Biomassa	Cimento	Cinza Volante	CCA	$CaCl_2$	Água total
	%	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
BCB	0	0	203	262	299	187	22	392
BCB - 10	10	75	203	236	270	169	22	389
BCB - 15	15	113	203	224	256	160	22	388
BCB - 20	20	151	203	211	241	151	22	386

Os BCBs com solo foram produzidos em um misturador de 20 litros, moldados e curados em ambiente seco, com umidade relativa de 60% e temperatura de 21 °C. Foram seguidas as mesmas diretrizes utilizadas por Sá (2022): diluição prévia do $CaCl_2$ na água; lançamento e homogeneização dos finos (materiais cimentícios e solo) e do bambu na argamassadeira por 1 minuto; adição de cerca de 30% da água, sendo o restante adicionado ao longo do próximo minuto de mistura; parada do processo por 30 segundos para raspagem das bordas da cuba da argamassadeira e; prosseguimento com a mistura por mais 1 minuto para atingir a homogeneização dos BCBs com solo.

2.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E DENSIDADE APARENTE

O ensaio de índice de consistência seguiu a norma NBR 13276 (ABNT, 2016a), sendo conduzido em uma mesa de fluidez (*flow table test*) para avaliar a trabalhabilidade do material. A medição do espalhamento foi realizada considerando o diâmetro do círculo formado pelo material em três direções, com posterior cálculo da média desses valores. Quanto à densidade, esta foi determinada após 28 dias, utilizando as dimensões dos corpos de prova cilíndricos e suas respectivas massas. Os resultados são apresentados na seção 3.1.

2.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL AOS 28 DIAS

Os ensaios de compressão foram realizados após 28 dias para determinar a carga máxima, utilizando a prensa Shimadzu de 1000 kN.

Figura 1 - Ensaio mecânico de um corpo de prova.

A velocidade adotada foi de 0,3 mm/min, e foram testados cinco corpos de prova cilíndricos para cada mistura, com dimensões de 50 x 100 mm. A Figura 1 ilustra um exemplo de corpo de prova. Os resultados obtidos são apresentados na seção 3.2.

2.4 PEGADA DE CARBONO

A fim de avaliar o desempenho ambiental dos BCBs com solo em relação às emissões de GEE, foi realizada uma ACV para quantificar a pegada de carbono de cada mistura, considerando o balanço entre a emissão de GEEs e absorção e estoque de CO_2 pelas partículas de bambu.

2.4.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo dessa ACV consistiu em estimar as emissões de GEE relacionadas à produção das misturas de BCB com solo. Para isso, adotou-se um escopo do berço ao portão e a unidade funcional de 1 m³ de BCB com solo.

A fronteira do sistema adotada é ilustrada pela Figura 2, que considera: a produção de matérias-primas (cimento, $CaCl_2$, $Ca(OH)_2$ e água); a produção de co-produtos (CV e CCA); o processamento mecânico do solo; o processamento mecânico e tratamento alcalino do resíduo de bambu; o transporte dos materiais até o laboratório (salvo da água); o uso de maquinário e eletricidade para a produção das misturas. Além disso, considerou-se também a captura e estoque do carbono biogênico durante o crescimento do bambu.

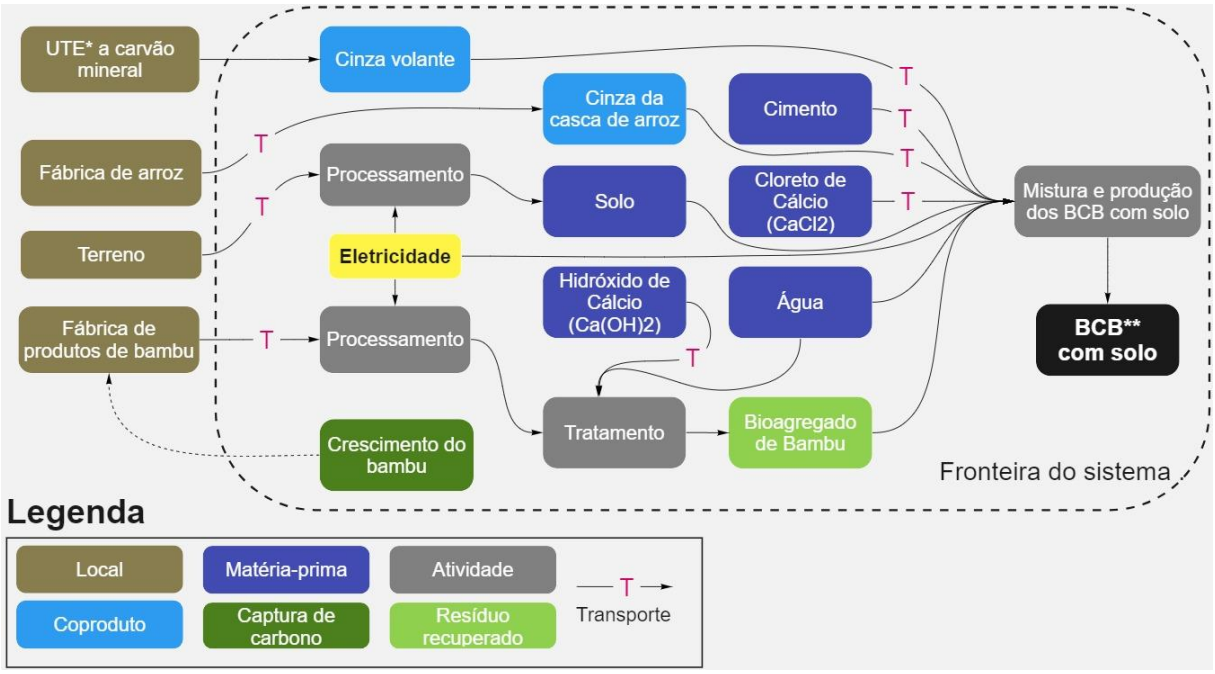


Figura 2 - Fronteira do sistema para a produção de bioconcretos de bambu com solo.

*UTE – Usina termoelétrica; **BCB – Bioconcreto de bambu.

2.4.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os dados primários foram obtidos no laboratório e os dados secundários são da base de dados da *Ecoinvent v.3.8* e da composição de conjutos de dados baseados em achados da literatura. Para as distâncias de transporte, utilizou-se o *Google Maps*, considerando a origem dos materiais até o laboratório, localizado na capital do estado do Rio de Janeiro (BR).

Carbono Biogênico

Para esta análise, considerou-se como carbono biogênico o carbono absorvido da atmosfera pela biomassa (bambu) durante o crescimento da plantação através da fotossíntese até o seu corte, ou seja, o carbono biogênico estocado no bambu.

Utilizou-se o método desenvolvido por Guest *et al.* (2013) para quantificá-lo, que permite considerar variações nas características específicas de crescimento. Para esse cálculo, diferentes parâmetros foram considerados: (1) a porcentagem de carbono na biomassa (de 42%, 45% e 47%), (2) o período de rotação da plantação (de 3, 5 e 8 anos), dado que o bambu possui crescimento rápido (Caldas *et al.*, 2020) e, (3) o período de armazenamento na antroposfera (fixado em 100 anos). Esses parâmetros foram os mesmos considerados por Araujo *et al.* (2022).

2.4.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Os impactos foram estimados seguindo as diretrizes estabelecidas pelas ISO 14040-44 (2006a,b). O método da EN 15804 + A2 (CEN, 2019) foi usado para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), considerando a categoria de *Global Warming Potential* (GWP). Foram consideradas as frações fóssil (GWP_{Fossil}) e de uso e mudança de uso da terra (GWP_{LULUC}). A parte biogênica (GWP_{Bio}) foi modelada conforme descrito na seção 2.4.2, apenas para o caso das partículas de bambu. Utilizou-se o software *SimaPro v.9.3* em conjunto com uma planilha eletrônica para tratamento e apresentação dos resultados, os quais são detalhados na seção 3.3.

2.5 INDICADOR DE ECOEFICIÊNCIA

Optou-se por adotar um indicador de ecoeficiência que destaque as vantagens que materiais naturais, como os BCBs com solo, possuem. Para isso adotou-se um critério ambiental, em kg de CO_2 por m³, e um mecânico, em MPa. Esse é um indicador comum usado para avaliação de novos materiais, como concretos e bioconcretos (Caldas *et al.*, 2020) e simplificadamente indica quanto de GEE é emitido para cada MPa em 1 m³ de um material. A seção 3.4 apresenta os valores obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, apresentam-se os valores dos índices de consistência obtidos ao longo das moldagens; em seguida, a densidade aparente e a resistência à compressão uniaxial aos 28 dias são apresentadas. Posteriormente, apresentam-se e discutem-se as pegadas de carbono e, por fim, os indicadores de ecoeficiência para cada mistura.

3.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E DENSIDADE APARENTE

As Figuras Figura 3 e Figura 4 apresentam, respectivamente, o espalhamento das misturas na mesa e os valores médios obtidos para o índice de consistência. A partir dessa análise não foi possível identificar diferenças significativas entre as misturas. Nenhuma mistura apresentou exsudação ou segregação de partículas. Apesar disso, os valores obtidos para o índice de consistência ficaram aquém do parâmetro de trabalhabilidade de 180 ± 5 mm definido na premissa de dosagem para bioconcretos trabalháveis e adensáveis por vibração mecânica. Para o BCB, BCB-10, BCB-15 e BCB-20 os valores obtidos foram de 159, 157, 155 e 150 mm, conforme visto na Figura 4. Percebe-se que quanto maior o teor de solo na mistura, menor é o espalhamento obtido, o que também foi observado para concretos convencionais segundo Chan e Wu (2000 apud Sá, 2022) e Nehdi (2014 apud Sá, 2022). Esse comportamento está relacionado com a afinidade das partículas de solo, especialmente da fração

argilosa, com a água, o que acaba comprometendo a trabalhabilidade de misturas com maiores teores de solo.

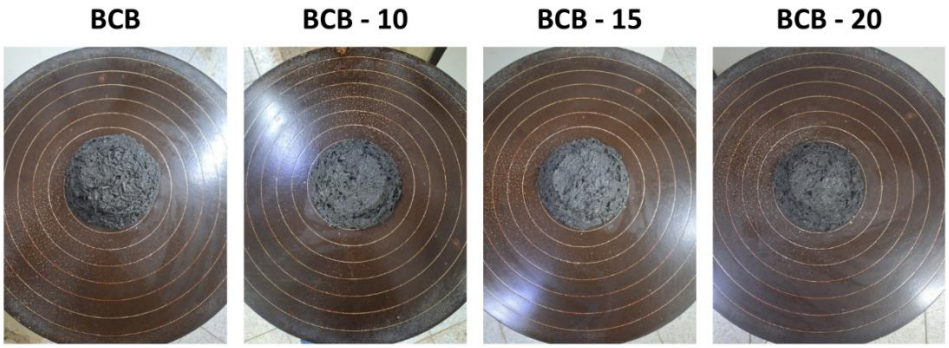


Figura 3- Mesa de espalhamento após ensaio de índice de consistência.

Já a Figura 4 ilustra os valores obtidos para a densidade aparente das misturas. Os valores médios obtidos foram de 1173, 1167, 1169 e 1168 kg/m³ para o BCB, BCB-10, BCB-15 e BCB-20, respectivamente, caracterizando os BCBs com solo como leves. Isso se deve principalmente ao elevado teor de bambu nas misturas (45% do volume), que é um bioagregado leve e poroso. Percebe-se que a substituição da matriz por solo em até 20% praticamente não alterou a densidade das misturas.

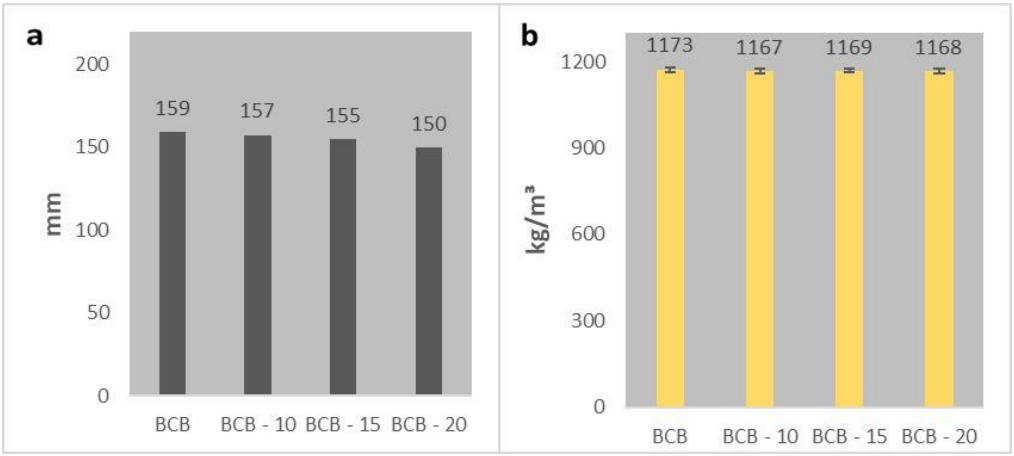


Figura 4 - a) Índice de consistência e b) densidade aparente das misturas de BCB com solo.

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL AOS 28 DIAS

Os valores de resistência à compressão aos 28 dias das misturas estudadas estão apresentados na Figura 5. O maior valor de resistência à compressão foi apresentado pelo bioconcreto sem adição de solo (BCB), atingindo 8,7 MPa. As misturas BCB-10 e BCB-15 apresentaram valores 6,9 % e 5,7 % menores que a referência, respectivamente. A partir de uma análise de variância (ANOVA) de um fator concluiu-se que os resultados de resistência à compressão das misturas BCB e BCB-15 são estatisticamente iguais entre si e que as misturas BCB-15 e BCB-10 também são estatisticamente iguais entre si. A mistura BCB-20 apresentou o menor valor (7,2 MPa), 17,2 % menor que a referência (BCB). A partir da ANOVA, constatou-se que BCB-20 apresentou uma resistência à compressão estatisticamente diferente das outras três misturas.

Alguns estudos apontam que, de forma geral, quanto maior a fração volumétrica de bambu na mistura, menor é a resistência à compressão uniaxial (Andreola, 2017; da Gloria et al., 2021). Nesse sentido o elevado teor de bioagregado de bambu influencia na densidade, na porosidade e assim na resistência

mecânica. Em comparação com Sá (2022), onde o mesmo teor de bambu (45%) foi adotado, as misturas com 30% de MTK na matriz cimentícia resultaram em resultados um pouco inferiores, variando de 5,9-7,1 MPa. Porém isso também pode ser explicado pela menor quantidade de cimento na matriz (30%).

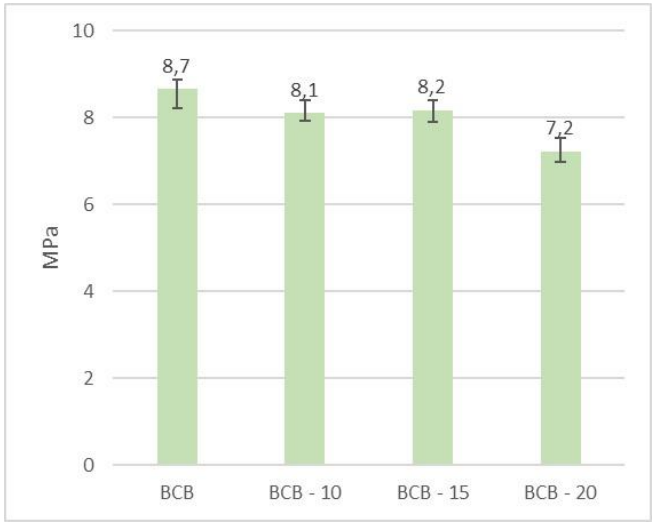


Figura 5 - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias das misturas de BCB com solo.

Já era esperado que o aumento do teor de solo implicaria em uma redução da resistência à compressão, uma vez que isso implica em uma diminuição da quantidade de materiais cimentícios em favor do aumento de um material inerte, *i.e.*, o solo. Isso é especialmente evidente no caso do BCB-20. No entanto, é importante notar que, mesmo com essa redução, os valores de resistência obtidos aos 28 dias para todas as misturas ainda se mantêm acima dos 4 MPa recomendados para aplicação como blocos de alvenaria estrutural, conforme destacado por Sá (2022). Essas recomendações têm respaldo em critérios estabelecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2009) e pela NBR 6136 (ABNT, 2016b).

3.3 PEGADA DE CARBONO

Focando nas emissões de GEE da produção dos BCBs com solo, a Figura 6 apresenta a pegada de carbono em $kgCO_2$-eq para 1 m³ de cada mistura de BCB com solo estudada. Com a consideração do carbono biogênico, detalhada anteriormente, todos os valores médios obtidos são baixos. Para o caso das misturas com solo, os valores são negativos, o que representa um balanço entre a captura de carbono da atmosfera pela biomassa e estoque no ambiente construído superior ao que é emitido. Os valores obtidos variaram de 25 a -35 $kgCO_2$-eq./m³ em média. A barra de erro representa a variação de dois desvios padrões dos cenários de captura do carbono biogênico, representando um intervalo de confiança de 95% em uma distribuição normal.

Os principais fatores que contribuem para esses valores negativos são: (1) o alto teor de biomassa adotado (45% em volume); (2) a adoção de uma matriz com grande quantidade de MCS, *i.e.*, 25% de CCA e 40% de CV, visto que um BCB com apenas cimento como ligante emite cerca de 133 $kgCO_2$-eq./m³ na sua produção (Caldas *et al.*, 2017), e; (3) a substituição da matriz cimentícia por solo. Esses aspectos podem ser observados na Figura 6, que apresenta as parcelas de contribuição dos materiais e processos considerados. É notável que quanto maior o teor de solo nas misturas, menor é a pegada de carbono das mesmas.

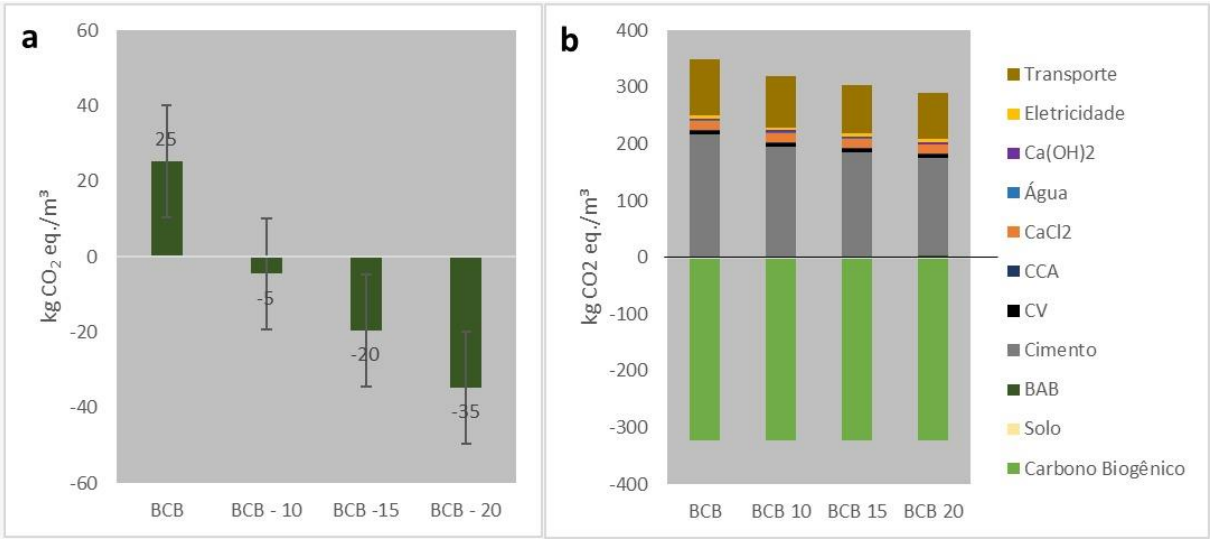


Figura 6 - a) Emissões de GEE estimada para a produção das misturas de bioconcreto de bambu com solo; b) Parcelas de contribuição dos materiais e processos.

Ainda pela Figura 6, identifica-se que os materiais e processos que mais contribuíram para as emissões positivas foram o cimento (61%), os transportes dos materiais (28%) e o aditivo $CaCl_2$ (5%), enquanto o beneficiamento da CCA representou menos de 1%.

Avaliando-se a influência do transporte de cada material nos impactos de transporte, pode-se identificar que os MCS adotados, i.e., CV e CCA contribuíram entre 94-95% do total. Essa contribuição ocorre devido ao fato desses coprodutos serem provenientes da região sul do Brasil, que concentra a produção nacional de arroz e também possui as maiores reservas de carvão mineral no país. Isso resulta na concentração de usinas termoelétricas a carvão mineral, bem como de indústrias de arroz na região.

O transporte eficiente desempenha um papel importante nas emissões de GEE e, dependendo da localização do material, coproduto ou resíduo, o seu transporte pode aumentar consideravelmente as emissões finais. Nessa análise, o transporte dos materiais representou 28% das emissões positivas, destacando a sensibilidade dos resultados à variação da distância do transporte da CCA e da CV. Reforça-se a importância de que sejam consideradas as realidades regionais para a produção de materiais com baixas emissões, especialmente em países com dimensões continentais como o Brasil. Essas análises são fundamentais em um contexto de economia circular.

Em comparação, apesar de os valores médios obtidos das pegadas de carbono dos BCB com solo (BCB-10, BCB-15 e BCB-20) serem todos negativos (Figura 6), eles ainda são superiores aos valores obtidos por Araujo *et al.* (2022) para as misturas de BCB com solo, onde a matriz cimentícia era composta por MTK e as pegadas de carbono variaram de -112 a -142 $kgCO_2$-eq./m³ (para teores de substituição similares, ou seja, de 10 a 20% de solo). Nessa comparação, é importante ressaltar algumas diferenças entre os materiais e processos de cada estudo, que influenciaram nessa diferença de resultados, tais como: (1) a densidade diferente do bambu, que resultou em menor quantidade de biomassa adicionada na dosagem volumétrica das misturas do presente estudo e , portanto, menos carbono biogênico armazenado; (2) a composição da matriz cimentícia, que por um lado contém 5% a mais de cimento, mas, por outro lado, não inclui MTK; (3) a não consideração dos impactos evitados da incineração do bambu no presente estudo; e (4) a influência da grande distância de transporte da CCA, que é de 1900 km.

3.4 INDICADOR DE ECOEFICIÊNCIA

Com base nos desempenhos ambiental e mecânico apresentados acima, foram calculados os indicadores de ecoeficiência em $kgCO_2$-eq./(m^3.MPa). Como os valores das pegadas de carbono obtidos foram negativos para as misturas com solo, os valores dos indicadores de ecoeficiência também são negativos, o que significa que para cada MPa há um balanço negativo entre a captura de -'x' kg de CO_2 por m^3 e a emissão. Essa análise comparativa, juntamente com outros indicadores de ecoeficiência, permite embasar a tomada de decisão sobre qual é a melhor mistura para cada aplicação (Caldas *et al.*, 2022). Os indicadores de ecoeficiência obtidos para cada mistura são apresentados pela Figura 7, na qual percebe-se que os valores foram de 3,8; -0,7; -3,2 e -6,1 $kgCO_2$-eq./(m^3.MPa) para os BCB, BCB-10, BCB-15 e BCB-20 respectivamente.

Percebe-se que quanto maior o teor de solo na mistura, mais negativo é o valor do indicador, ou seja, o balanço entre captura e emissões de carbono, por MPa. Esse padrão identificado se deve por conta de: (1) os valores de resistência à compressão uniaxial variarem muito pouco entre as misturas e; (2) a pegada de carbono sofrer maior influência da substituição da matriz cimentícia por solo.

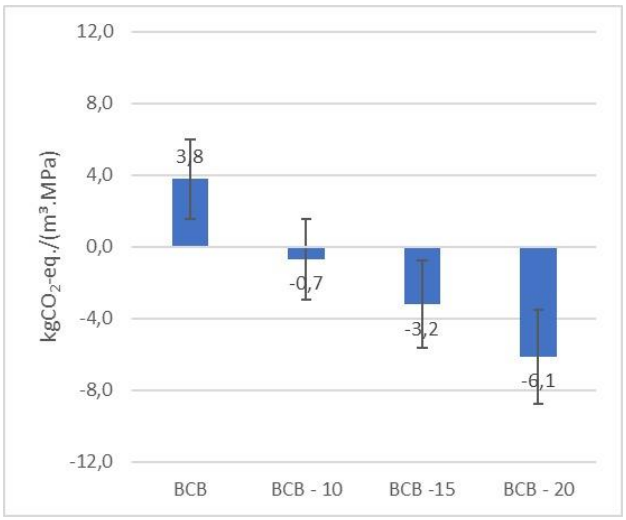


Figura 7 - Indicador de ecoeficiência das misturas de BCB com solo.

Para comparação, menciona-se o trabalho de Caldas *et al.* (2022), no qual os autores compararam a performance de um concreto convencional com bioconcretos de casca de arroz (com 10% de biomassa em volume) usando o mesmo indicador de ecoeficiência, dentre outros. Os autores obtiveram valores positivos de cerca de 11 a 18 $kgCO_2$-eq./(m^3.MPa). Entretanto, os autores observaram que para esse trabalho, o concreto convencional acabou performando melhor, obtendo os menores valores, devido à grande perda de resistência relacionada a adição de casca de arroz às misturas e também devido à pequena diferença na pegada de carbono entre as misturas (pouca biomassa) (Caldas *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou investigar a influência da substituição de uma matriz cimentícia ternária (35% cimento, 40% cinza volante e 25% cinza da casca de arroz) por 10%, 15% e 20% de solo nas propriedades mecânicas e ambientais de bioconcretos contendo 45% do seu volume de bioagregado de bambu.

Apesar do índice de consistência das misturas ter ficado abaixo do esperado, foi possível moldar as misturas através de vibração. Os valores de resistência mecânica foram satisfatórios para todas as misturas, variando de 7,2-8,7 MPa, satisfazendo assim os requisitos mínimos de 4 MPa sugeridos para moldagem de blocos de alvenaria estrutural.

Quanto à pegada de carbono, todas as misturas apresentaram valores baixos ou ainda negativos, caracterizando os bioconcretos de bambu com solo como excelentes materiais para armazenamento de carbono no ambiente construído. Assim, o emprego desse material contribui para atenuar as emissões de GEE a incorporadas do setor das edificações e da construção. Dessa forma, os bioconcretos de bambu com solo, por se alinharem à busca por materiais *net-zero,* têm potencial para mitigação e adaptação às mudanças climáticas dentro do setor, além de integrarem diversas estratégias de economia circular.

Através do indicador de ecoeficiência, foi possível comparar as misturas quanto a critérios de emissões de CO_2 e de resistência à compressão, sendo todos resultados promissores, especialmente para as misturas com teores de solo (BCB-10, BCB-15 e BCB-20), no sentido de capturarem carbono por MPa. Além disso, à medida que o solo é adicionado às misturas, o desempenho do indicador tende a melhorar gradativamente. A importância de que critérios ambientais sejam avaliados frente a outros critérios de desempenho por meio de indicadores de ecoeficiência é crucial para o futuro sustentável.

Para continuidade da pesquisa, recomenda-se que trabalhos futuros investiguem a influência da variação da fração de biomassa das misturas nas propriedades mecânicas e ambientais, bem como a consideração de outras propriedades, como térmicas e de performance termo-hígrica. Além disso, outra investigação interessante seria verificar a influência da adoção de aditivos superpastificantes a fim de melhorar a trabalhabilidade das misturas. Ademais, diferentes composições para a matriz cimentícia também podem ser investigadas, com variação nas porcentagens de materiais, nas densidades das biomassas estudadas, ou ainda com a substituições por outros MCS de baixas emissões, como outros resíduos recuperados.

REFERÊNCIAS

Andreola, V.M. (2017). Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. https://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/590-msc-pt-2017/8536-vanessa-maria-andreola

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2016a). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2016b). NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro.

Araujo, A., da Silva, N., Sá, T., Caldas, L., Toledo Filho, R. (2022). Potential of Earth-Based Bamboo Bio-Concrete in the Search for Circular and Net-Zero Carbon Solutions to Construction Industry, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1122, n. 1. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012043

Caldas, L., da Gloria, M., Santos, D., Andreola, V., Pepe, M., Toledo Filho, R. (2017). Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. Academic Journal of Civil Engineering 35 (2) 499-506. https://doi.org/10.26168/iccbm2017.76

Caldas, L.R., da Gloria, M.Y.R., Pittau, F., Andreola, V.M., Habert, G., Toledo Filho, R.D. (2020). Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials, 268:0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121146

Caldas, L.R., Araujo, A.F., Hasparyk, N.P., Tiecher, F., Amantino, G., Toledo Filho, R.D. (2022). Circular economy in concrete production: Greenhouse Gas (GHG) emissions assessment of rice husk bio-concretes. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 15 (6). https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000600002

Comité Européen de Normalisation – CEN. (2019). EN 15804:2012 + A2: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels, Belgium.

da Gloria, M.Y.R. (2020). Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal. Tese de Doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. https://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/627-2020/9605-m-hamed-yassin-rajiv-da-gloria

da Gloria, M.Y.R., Andreola, V.M., Santos, D.O.J., Pepe, M., Toledo Filho, R.D. (2021). A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. Journal of Building Engineering, 34 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101696

Guest, G., Cherubini, F., Strømman, A.H. (2013). Global warming potential of carbon dioxide emissions from biomass stored in the anthroposphere and used for bioenergy at end of life. Journal of industrial ecology 17 (1) 20-30. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. (2009). Código de práticas nº 1: alvenaria de vedação em blocos cerâmicos. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8304736/mod_resource/content/0/113-Codigo_de_Praticas_n_01.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2023). 'Buildings', in Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 953–1048. https://doi.org/10.1017/9781009157926.011

Organization for Economic Co-operation and Development – OECD. (1998). Eco-efficiency. Paris.

Pretot, S., Collet, F., Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating. Building and Environment 72(C), 223-231. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010

Sá, T.S.W. (2022). Efeito da adição de solo nas propriedades mecânicas e termo-hígricas do bioconcreto de bambu. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. https://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/640-2022/10180-thomas-schatzmayr-welp-sa

Sandhu, R.K., Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. Construction and Building Materials, 153, 751-764. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165

Siddika, A., Mamun, M.A.A., Ali, M.H. (2018). Study on concrete with rice husk ash. Innovative Infrastructure Solutions, 3(18) 1-9. http://dx.doi.org/10.1007/s41062-018-0127-6

Silva, L.C., Caldas, L.R., Paiva, R.L.M., Toledo Filho, R.D., (2018). Role of Bio-based Building Materials in Climate Change Mitigation: Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 20p. ISBN: 978-85-285-0376-0. https://www.researchgate.net/publication/327578512_Role_of_Bio-based_Building_Materials_in_Climate_Change_Mitigation_Special_Report_of_the_Brazilian_Panel_on_Climate_Change?enrichId=rgreq-ba2e5fb6327bbafd37e01d6a8c813a6e-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMyNzU3ODUxMjtBUzo2Njk2NTczNzU3MTk0MzZAMTUzNjY3MDE2ODcxMg%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

Siqueira, T.P.L., Sá, T.S.W., Caldas, L.R., Hasparyk, N.P., Toledo Filho, R.D. (2022). Bioconcretes and GHG emissions reduction: what the scientific literature says? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1101. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022026

The International Organization for Standardization – ISO. (2006a). ISO 14040—environmental management—life cycle assessment— Framework and principles., Geneva.

The International Organization for Standardization – ISO. (2006b). ISO 14044—environmental management—life cycle assessment— Requirements and guidelines., Geneva.

United Nations Environment Programme – UNEP. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS COMPÓSITOS DE CORTIÇA E CASCA DE AMENDOIM COLONIZADOS COM MICÉLIO DE COGUMELOS – PROCEDIMENTO E ENSAIOS PRELIMINARES

Miguel José Oliveira[a]; Marta Marçal Gonçalves[b]; Cláudia Martins[c]; Ion Volosciuc[c]

[a]Universidade do Algarve, CERIS Coimbra, Campus da Penha, 8005-139 Faro, Portugal, mjolivei@ualg.pt

[b] CEAACP-UAlg, Universidade do Algarve, Campus da Penha, 8005-139 Faro, Portugal, mgoncal@ualg.pt

[c] Ethereal Spark, Lda, Rua Francisco Bivar 2, 8500-675 Portimao, Portugal, hello@hyphaecreate.com

RESUMO

De acordo com a Comissão Europeia os edifícios são responsáveis por sensivelmente 40% do consumo de energia e 36% das emissões diretas e indiretas de gases com efeito de estufa, relacionadas com energia, isto, ao longo de toda a sua vida útil. Acrescenta que cerca de 75% do parque imobiliário é ineficiente e 85% a 95% dos edifícios atuais ainda existirão em 2050. Deste modo admite-se um grande incremento nas necessidades futuras de reabilitação, em particular, através de melhorias significativas no desempenho térmico do envelope dos edifícios, principalmente através da utilização de materiais isolantes térmicos. Atualmente os materiais com essa função mais utilizados são derivados do petróleo, nomeadamente o EPS e XPS.

Neste artigo é apresentado um estudo preliminar onde foram desenvolvidos e testados dois biomateriais compósitos desenvolvidos a partir de granulado de cortiça e de casca de amendoim onde foram incubados dois tipos de micélios de cogumelos, alternativos aos materiais convencionais mencionados acima. São apresentados os procedimentos realizados no desenvolvimento e estabilização dos biomateriais assim como os resultados dos ensaios físicos realizados às duas amostras, que evidenciam potencial para o seu uso como material de construção isolante, entre outros.

Palavras-chave: Biomateriais, Micélio, Cortiça, Casca de amendoim, Construção sustentável.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos que mais consomem energia e mais liberta CO2 para a atmosfera, estando por isso associado ao aumento da temperatura global (Júnior, Isaías Geronymo, 2022; Lanza, Francisco & Centeno, Jorge David, 2022; Nasr, Yara et al., 2023; Vašatko, Hana et al., 2022). É necessário eliminar ao máximo a utilização de produtos fósseis, e por isso substituições inovadoras destes produtos, principalmente por materiais de origem ou de base biológica, são de grande importância e interesse (Muiruri, Joseph Kinyanjui et al., 2023; Vašatko, Hana et al., 2022).

Atualmente, a construção civil utiliza principalmente materiais de origem petroquímica não renováveis, que libertam gases poluentes com o passar do tempo, para fazer o isolamento de edificações. Para além disso, estes isolamentos apresentam na sua composição química retardantes de fogo, o que não ajuda ao seguir os códigos de segurança contra incêndios (Jones, Mitchell et al., 2020; Souza, Eduardo, 2020), assim, uma boa alternativa pode ser a utilização de biomateriais disponíveis localmente (Alemu, Digafe et al., 2022).

De acordo com a Comissão Europeia, na Europa, os edifícios são responsáveis por sensivelmente 40% do consumo de energia e 36% das emissões diretas e indiretas de gases com efeito de estufa, relacionadas com energia, isto, ao longo de toda a sua vida útil. Acrescenta que cerca de 75% do parque imobiliário é ineficiente e 85% a 95% dos edifícios atuais ainda existirão em 2050. Deste modo admite-se um grande incremento nas necessidades futuras de reabilitação, em particular, através de melhorias significativas no desempenho térmico do envelope dos edifícios, principalmente através da utilização de materiais isolantes térmicos. Atualmente os materiais com essa função mais utilizados são derivados do petróleo, nomeadamente o EPS e XPS.

Num mundo com recursos finitos, a reciclagem de resíduos de construção e demolição e outros subprodutos da indústria é uma componente fundamental para uma abordagem circular necessária e em progresso. Deste modo, a utilização de materiais de construção mais sustentáveis, de origem natural e local, com baixo valor de energia incorporada, reutilizáveis e/ou recicláveis é uma necessidade.

No caminho para uma economia circular, a sociedade atual é desafiada a desenvolver materiais de construção sustentáveis, que, além de não esgotarem os recursos que não são renováveis, não gerem resíduos ambientalmente nocivos (Hookham, Bohemia, 2022; Livne, Achiya et al., 2022). De entre as várias possibilidades surge o desenvolvimento de biomateriais compósitos com propriedades controladas e ajustáveis durante o seu crescimento, prontos para utilização e sem a necessidade de métodos de processamento caros e sofisticados, como é o caso dos desenvolvidos com a utilização do micélio. Estes materiais biológicos melhoram a eficiência energética durante a utilização, têm baixo impacto ambiental, são renováveis e têm baixa energia incorporada, contribuindo para a sustentabilidade global (Nasr, Yara et al., 2023) pois alguns destes biocompósitos com base em micélio são, inclusivamente, carbono negativo (Riccio, Gianluca, 2021).

Os fungos existem no nosso dia-a-dia em locais como a água, o nosso organismo, por exemplo, tendo o papel de recicladores primários na Natureza. Assumem diversas formas como diversos tipos de cogumelos, mofos e bolores e tanto podem produzir antibióticos, como podem provocar doenças (Souza, Eduardo, 2020). Para o seu desenvolvimento, os fungos necessitam de locais húmidos e sombreados e o que é visível acima do solo é apenas uma pequena parte deles: abaixo da superfície vão desenvolvendo raízes parecidas com pequenos fios, designados por micélio, que se desenvolvem em todas as direções em busca de alimento numa relação simbiótica com os materiais que a alimentam, formando redes emaranhadas complexa de fibras ramificadas que têm um crescimento

muito rápido. Esta rede funciona como agregadora do substrato, conseguindo transformá-lo num bloco sólido por digestão e aderência ao substrato das ramificações, aumentando a resistência mecânica dos materiais compósitos constituídos por micélio (*Building with mushrooms*, sem data; Islam, M. R. et al., 2018; Júnior, Isaías Geronymo, 2022; Riccio, Gianluca, 2021; Saez, Dana et al., 2022; Souza, Eduardo, 2020; Wikipedia, sem data).

Os materiais de construção com base no micélio são biomateriais que utilizam a parte vegetativa de fungos, sendo um recurso fácil de obter, para se conseguir agregar e obter diversas propriedades de um substrato orgânico de reduzido valor económico e comummente com utilizações menos nobres (Alves, Rafael Maria Escaleira, 2019; *Building with mushrooms*, sem data; Souza, Eduardo, 2020). O micélio apresenta um tecido compacto e de rápido crescimento, adaptando-se a diversas condições ambientais, o que permite uma produção fácil, rápida e de baixo custo (*Building with mushrooms*, sem data).

As grandes variáveis neste tipo de biomaterial são o tipo de fungo utilizado, porque diferentes micélios têm diferentes propriedades, o tipo de substrato utilizado, definindo a maneira como o micélio se desenvolve nesse substrato e os processos mecânicos auxiliares (Alves, Rafael Maria Escaleira, 2019; Attias, Noam et al., 2020; *Building with mushrooms*, sem data; Júnior, Isaías Geronymo, 2022; Souza, Eduardo, 2020). Estas variáveis estão diretamente relacionadas com as características finais que o material apresenta, em especial na densidade, na absorção de água e na resistência à compressão (Attias, Noam et al., 2020). Assim, o produto final obtido pode ser utilizado para diversas aplicações, como painéis isolantes, mobiliário, materiais de embalagem ou tijolos, por exemplo (Souza, Eduardo, 2020).

Atualmente a prática emergente em relação à prática do Growing Design, ou seja, desenvolvimento de materiais a partir de organismos vivos, baseia-se, essencialmente, na aplicação como substituição de materiais convencionais, obtendo-se novos produtos (Karana, Elvin et al., 2018) que poderão vir a ter uma enorme importância na construção civil, principalmente devido à disponibilidade local/facilidade em produzir estes produtos biológicos em larga escala, o baixo custo que terão num futuro próximo, baixa emissão ambiental e fácil reciclagem (Alemu, Digafe et al., 2022; Jones, Mitchell et al., 2020; Riccio, Gianluca, 2021). “Estes materiais oferecem uma alternativa totalmente natural e sustentável às modernas placas compostas, como placas de fibra de média densidade, ‘MDF’ e placas de fibras orientadas, ‘OSB’” (Pelletier, M.G. et al., 2017, p. 342). Em consequência das grandes vantagens que estes materiais podem apresentar, desenvolveram-se trabalhos para a sua utilização como material para isolamento (Riccio, Gianluca, 2021), como bioespumas (Attias, Noam et al., 2020; Nashiruddin, Noor Idayu et al., 2022), painéis sandwich (Jiang, Lai et al., 2019) e na ótica da utilização estrutural, a aplicação de micélio em estruturas de argila (Jauk, Julian et al., 2021, 2022).

Existem diversas investigações utilizando diferentes tipos de fungos ou diferentes tipos de substratos (Aiduang, Worawoot et al., 2024; Alemu, Digafe et al., 2022; Alves, Rafael Maria Escaleira, 2019; *Building with mushrooms*, sem data; Haneef, Muhammad et al., 2017; Lanza, Francisco & Centeno, Jorge David, 2022; Lanza, Francisco & Reyes, Juan Carlos, 2023; Liu, Ru et al., 2019; Marcante, Rafael de Carli et al., 2014; Nashiruddin, Noor Idayu et al., 2022; Pelletier, M.G. et al., 2017; Vašatko, Hana et al., 2022). No entanto, não se encontrou, até ao momento na literatura, a utilização dos fungos *Lentinula edodes* e *Hypsizygus Ulmarius* desenvolvidos nos substratos de cortiça e casca de amendoim, produtos facilmente encontrados, em especial no Sul de Portugal, pelo que este trabalho é inovador e original, pretendendo-se com ele apresentar os resultados preliminares de alguns ensaios realizados.

Existem diversos trabalhos e abordagens sobre as propriedades apresentadas por este tipo de materiais, abordando, propriedades físicas, propriedades mecânicas, resistência ao fogo, densidade,

absorção de água, eficiência térmica e energética, características higrotérmicas e a biodegradabilidade (Aiduang, Worawoot et al., 2024; Fellah, M. et al., 2024; Júnior, Isaías Geronymo, 2022; Lanza, Francisco & Reyes, Juan Carlos, 2023; Nasr, Yara et al., 2023; Pelletier, M.G. et al., 2017; Riccio, Gianluca, 2021).

Para além das vantagens que os biocompósitos de micélio podem apresentar na fase de produção e pós-utilização do seu ciclo de vida, pode-se afirmar que estes materiais podem ter "propriedades personalizáveis" (Jones, Mitchell et al., 2020) e podem substituir espumas, madeira e plásticos em isolamentos, por exemplo, pois apresentam propriedades como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta absorção acústica, propriedades boas contra incêndio, são biodegradáveis, muitas vezes superando os materiais de construção utilizados até agora (*Building with mushrooms*, sem data; Jones, Mitchell et al., 2020; Livne, Achiya et al., 2022). A adequada eleição dos substratos para cada tipo de micélio, facilita a adaptação das propriedades apresentadas por estes biocompósitos abrindo caminho para a sua utilização em larga escala (Haneef, Muhammad et al., 2017).

No entanto, uma das desvantagens mais apontadas a este tipo de biocompósito é em relação à sua resistência à humidade (*Building with mushrooms*, sem data; Jones, Mitchell et al., 2020) pois esta diminui com o passar do tempo, tornando este material vulnerável à humidade, podendo ter um comportamento higroscópico, mas, se for mantido em condições favoráveis e estáveis, a sua vida útil pode ser de cerca de 20 anos (*Building with mushrooms*, sem data). Existem também trabalhos que referem o problema de bioacumulação de zinco e a retenção de metais pesados em alguns tipos de micélios (Cabral, Lucélia et al., 2010; Marcante, Rafael de Carli et al., 2014), o que poderá vir a ser outra desvantagem para estes materiais.

2 PREPARAÇÃO DE PROVETES

2.1 COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O processo iniciou-se com a coleta de resíduos da cortiça, como pó e aparas, que são subprodutos comuns da produção de rolhas e outros produtos de cortiça. Estes materiais são então submetidos a um processo de esterilização a vapor a 121°C por 90 minutos para eliminar contaminantes biológicos e prepará-los para a inoculação com micélio. A pureza dos materiais é essencial para assegurar um desenvolvimento saudável do micélio sem interferências de microrganismos competitivos.

Relativamente à casca de amendoim o procedimento é idêntico. Tratam-se de subprodutos da indústria que são frequentemente descartados, porém, no âmbito deste projeto, são valorizados como matéria-prima principal.

2.2 CULTIVO DO MICÉLIO

Após a esterilização, os resíduos de cortiça foram inoculados com micélio selecionado para a sua capacidade de crescimento rápido e propriedades de isolamento. As condições de crescimento, incluindo uma temperatura constante de 22°C e uma humidade relativa de 80%, foram cuidadosamente controladas numa câmara de cultivo. Este ambiente favorece a colonização rápida do material de cortiça pelo micélio, processo que geralmente leva entre três a quatro semanas.

Relativamente à casca de amendoim o processo difere ligeiramente. O micélio foi inoculado nas cascas de amendoim preparadas, sujeito à temperatura de 24°C, com uma humidade relativa do ar de 75%. Estas condições foram rigorosamente monitorizadas para facilitar o crescimento rápido e saudável do

micélio. Este processo pode durar entre duas a três semanas, durante as quais o micélio se entrelaça formando uma matriz sólida.

2.3 FORMAÇÃO DOS PROVETES

Após o crescimento suficiente do micélio, nas duas situações, as misturas foram transferidas para moldes com a forma desejada. Nesta fase, foi aplicada alguma compressão para garantir que o micélio se distribui uniformemente e preenche todos os espaços vazios, fortalecendo a estrutura do material. Este passo é crucial para a integridade física dos provetes, garantindo que sejam resistentes e duradouros. O tempo de crescimento dentro dos moldes é ajustado de acordo com as especificações de tamanho e densidade desejados para os provetes, geralmente mais uma semana sob condições controladas de temperatura e humidade.

2.4 SECAGEM E CURA

Após a formação dos provetes, estes foram cuidadosamente removidos dos moldes e submetidos a um processo de secagem. A secagem foi realizada em uma estufa onde a temperatura foi gradualmente elevada para 40°C e a humidade reduzida para cerca de 12%, ao longo de 72 horas. Este passo é crucial para reduzir a humidade residual, aumentar a rigidez dos provetes e maximizar suas propriedades isolantes. Após a secagem, os biomateriais estão prontos para uma suposta utilização.

3 ENSAIOS PRELIMINARES

Foram produzidos 8 provetes em forma de prisma 4 x 4 x 16 cm^3. Quatro de aparas de cortiça e quatro de casca de amendoim (figura 1). Ambos foram ensaiados à compressão e submetidos à absorção de água por imersão.

Figura 1 – Provetes preparados. Esquerda: de aparas de cortiça; direita: de casca de amendoim (autores)

Previamente à realização dos ensaios os provetes foram conservados ao ar, num laboratório, com uma temperatura aproximada de 20ºC e uma humidade relativa de 70%, durante uma semana. Nessas condições os valores das massas volúmicas registadas foram de 0,251 g/cm^3 e 0,197 g/cm^3, respetivamente para os provetes produzidos com aparas de cortiça e casaca de amendoim.

Relativamente ao ensaio de compressão, os provetes foram ensaiados numa prensa de acordo com a NP EN 196-1 (figura 2) e os resultados obtidos constam no quadro 1.

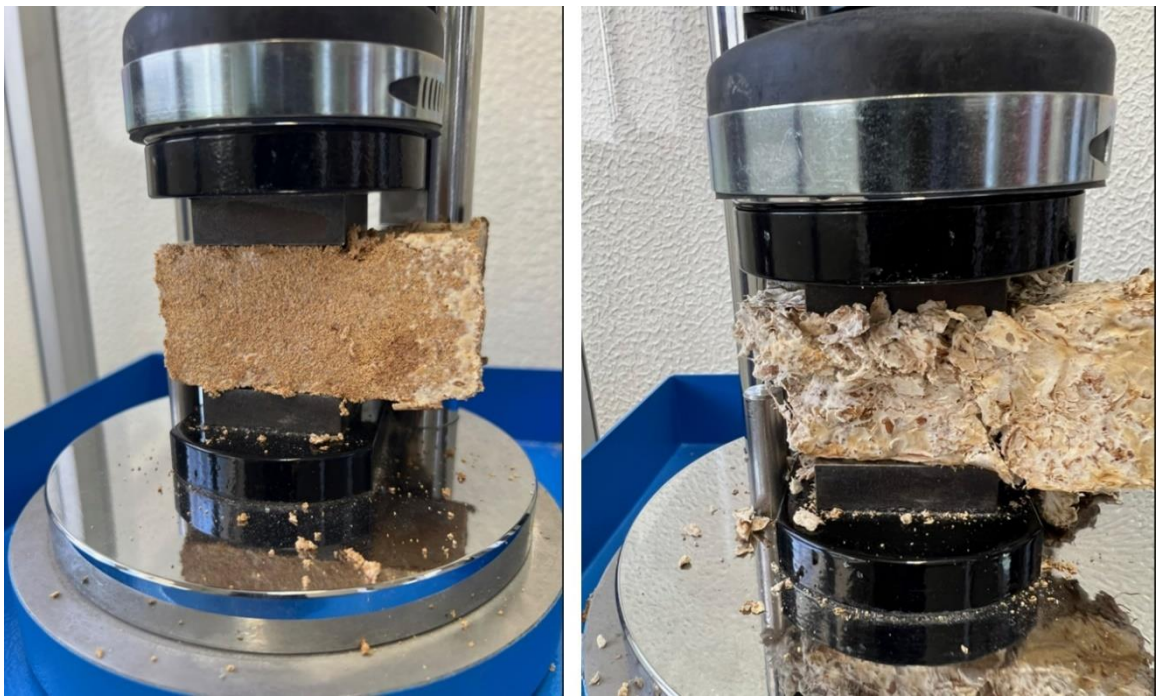


Figura 2 – Ensaio dos provetes à compressão. Esquerda: de aparas de cortiça; direita: de casca de amendoim (autores)

Quadro 1 – Resultados do ensaio de compressão

Provetes	**Aparas de cortiça**	**Casca de amendoim**
	Tensão de rotura MPa	
1	0,31	0,13
2	0,38	0,11
3	0,37	0,15
4	0,32	0,13
Média	0,35	0,13

Verifica-se que os provetes preparados a partir de aparas de cortiça apresentam resistência à compressão superior face aos preparados com casca de amendoim, seguindo a mesma tendência da massa volúmica registada.

Simultaneamente, dois provetes de cada série foram ensaiados à absorção de água por imersão, durante 7 dias à temperatura de 20ºC. Os valores registados apresentam-se no quadro 2.

Quadro 2 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Provetes	Massa inicial	Incremento de massa			
		1 h	24 h	48 h	7 dias
Aparas de cortiça	58,293 g	17,991 g	57,348 g	92,684 g	115,247 g
		30,9 %	98,4 %	159,0 %	197,7 %
Casca de amendoim	58,468 g	14,049 g	26,963 g	40,584 g	51,419 g
		24,0 %	46,1 %	69,4 %	87,9 %

Existem diferenças significativas relativamente à imersão dos provetes, observando que a absorção de água nessas condições é substancialmente inferior para os provetes preparados a partir da casca de amendoim.

4 CONCLUSÕES

A inovação no uso de materiais sustentáveis é crucial para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos. A combinação de aparas de cortiça ou cascas de amendoim com micélio para criar materiais é um exemplo promissor de como a indústria da construção pode evoluir para incorporar práticas mais verdes. Este projeto não apenas ajuda a reduzir o desperdício de subprodutos industriais e agrícolas, mas também promove a utilização de recursos renováveis, abrindo novos caminhos para a construção de um futuro mais sustentável.

A integração de práticas sustentáveis na indústria da construção é vital para o desenvolvimento de soluções que respondam aos desafios climáticos atuais. Utilizando resíduos de cortiça e casca de amendoim e micélio, este projeto não só valoriza materiais que de outra forma seriam descartados, mas também fornece uma alternativa ecológica, por exemplo, para melhorar a eficiência energética dos edifícios, através da utilização dos mesmos como materiais de isolamento térmico.

Neste artigo apresentaram-se os procedimentos de desenvolvimento e resultados dos ensaios preliminares de biomateriais desenvolvidos a partir de aparas de cortiça e casca de amendoim colonizados com micélio. Os resultados preliminares obtidos para a massa volúmica, resistência à compressão e absorção de água por imersão indicam possibilidades promissoras para uma futura utilização como materiais de construção, por exemplo como materiais de isolamento térmico. Para tal será no futuro realizada uma campanha exaustiva de avaliação dessa possibilidade. Primeiramente será melhorado o processo de desenvolvimento dos biomateriais apresentados e posteriormente serão testados ao nível do comportamento físico, químico, biológico, face a diferentes condições de utilização incluindo a resistência ao fogo.

Em suma, pode-se afirmar que a tecnologia do micélio tem muito para oferecer na área da construção civil.

REFERÊNCIAS

Aiduang, Worawoot, Jatuwong, Kritsana, Jinanukul, Praween, Suwannarach, Nakarin, Kumla, Jaturong, Wandee Thamjaree, Teeraphantuvat, Thana, Waroonkun, Tanut, Oranratmanee, Rawiwan, & Lumyong, Saisamorn. (2024). Sustainable Innovation: Fabrication and Characterization of Mycelium-Based Green Composites for Modern Interior Materials Using Agro-Industrial Wastes and Different Species of Fungi. *polymers*, *16*(550). https://doi.org/10.3390/polym16040550

Alemu, Digafe, Tafesse, Mesfin, & Deressa, Yohannes Gudetta. (2022). Production of Mycoblock from the Mycelium of the Fungus Pleurotus ostreatus for Use as Sustainable Construction Materials. *Hindawi - Advances in Materials Science and Engineering*, *2022*(2876643). https://doi.org/10.1155/2022/2876643

Alves, Rafael Maria Escaleira. (2019). *Estudo de materiais avançados de micélio para utilização na indústria automóvel* [MsD]. Instituto Politécnico de Leiria.

Attias, Noam, Danai, Ofer, Abitbol, Tiffany, Tarazi, Ezri, Ezov, Nirit, Pereman, Idan, & Grobman, Yasha J. (2020). Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, *246*, 119037. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037

Building with mushrooms. (sem data). Critical Concrete. Obtido 5 de março de 2024, de https://criticalconcrete.com/building-with-mushrooms/

Cabral, Lucélia, Siqueira, José Oswaldo, Soares, Claúdio Roberto Fonsêca Sousa, & Pinto, José Eduardo Brasil Pereira. (2010). Retenção de metais pesaod em micélio de fungos micorrízicos arbusculares. *Química Nova*, *33*(1), 25–29.

Fellah, M., Ouhaibi, S., Belouaggadia, N., Mansouri, K., & Naji, H. (2024). Thermal insulation and energy performance's assessment of a mycelium-based composite wall for sustainable buildings. *Case Studies in Construction Materials*, *20*(e02786). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02786

Haneef, Muhammad, Ceseracciu, Luca, Canale, Claudio, Bayer, Ilker S., Heredia-Guerrero, José A., & Athanassiou, Athanassia. (2017). Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Nature*, *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/srep41292

Hookham, Bohemia. (2022). Nature as inspiration: Bio-based materials for sustainable construction. *Architecture Australia*, 52–54.

Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2018). Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Nature*, *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2

Jauk, Julian, Gosch, Lukas, Vašatko, Hana, Christian, Ingolf, Klaus, Anita, & Stavric, Milena. (2022). MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures. *International Journal of Architectural Computing*, *0*(0), 1–10. https://doi.org/10.1177/14780771221082248

Jauk, Julian, Vašatko, Hana, Gosch, Lukas, Christian, Ingolf, Klaus, Anita, & Stavric, Milena. (2021). Digital fabrication of growth. Combining digital manufacturing of clay with natural growth of mycelium. *PROJECTIONS*, *1*, 753–762. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2021_282

Jiang, Lai, Walczyk, Daniel, McIntyre, Gavin, Bucinell, Ronald, & Li, Bingbing. (2019). Bioresin infused then cured mycelium-based sandwich-structure biocomposites: Resin transfer molding (RTM) process, flexural properties, and simulation. *Journal of Cleaner Production*, *207*, 123–135. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.255

Jones, Mitchell, Mautner, Andreas, Luenco, Stefano, Bismarck, Alexander, & John, Sabu. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials and Design*, *187*, 108397. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397

Júnior, Isaías Geronymo. (2022). *Micélio como alternativa sustentável para materiais de construção: Uma revisão da literatura* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal de São Paulo, Campus Baixada Santista, Instituto do Mar.

Karana, Elvin, Blauwhoff, Davine, Hultink, Erik-Jan, & Camere, Serena. (2018). When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-based Materials. *International Journal of Design*, *12*(2), 119–136.

Lanza, Francisco & Centeno, Jorge David. (2022). *Resistencia a la compresión y porcentaje de absorción del micelio de Ganoderma Lucidum* [PROYECTO I]. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA - FACULTAD DE INGENIERÍA.

Lanza, Francisco & Reyes, Juan Carlos. (2023). Compressive strength and water absorption percentage of Pleurotus Ostreatus and Ganoderma Lucidum mycelium. *Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development*. 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, Buenos Aires, Argentina. https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1169

Liu, Ru, Long, Ling, Sheng, Yan, Xu, Jianfeng, Qiu, Hongyun, Li, Xiaoyan, & Wang, Yanxia. (2019). Preparation of a kind of novel sustainable mycelium/cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties. *Industrial Crops & Products*, *141*, 111732. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111732

Livne, Achiya, Wösten, Han A. B., Pearlmutter, David, & Gal, Erez. (2022). Fungal Mycelium Bio-Composite Acts as a CO2-Sink Building Material with Low Embodied Energy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *10*, 12099–12106. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01314

Marcante, Rafael de Carli, Meniquetti, Adriano, Pascotto, Claudicéia Risso, Gazin, Zilda Cristiani, Magalhães, Hélida Mara, Colauto, Nelson Barros, & Linde, Giani Andrea. (2014). Biocumulação de zinco em micélio de Agaricus subrufescens. *Arquivo Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR*, *17*(4), 249–252. https://doi.org/10.25110/arqvet.v17i4.2014.5025

Muiruri, Joseph Kinyanjui, Yeo, Jayven Chee Chuan, Zhu, Qiang, Ye, Enyi, Loh, Xian Jun, & Li, Zibiao. (2023). Sustainable Mycelium-Bound Biocomposites: Design Strategies, Materials Properties, and Emerging Applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *11*, 6801–3821. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00831

Nashiruddin, Noor Idayu, Chua, Kai Shin, Mansor, Azmi Fadziyana, Rahman, Roshanida A., Lai, Jau Choy, Azelee, Nur Izyan Wan, & Enshasy, Hesham El. (2022). Effect of growth factors on the production of mycelium-based biofoam. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *24*, 351–361. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02146-4

Nasr, Yara, Zakhem, Henri El, Hamami, Ameur El Amine, Bachawati, Makram El, & Belarbi, Rafik. (2023). Comprehensive Review of Innovative Materials for Sustainable Buildings' Energy Performance. *Energies*, *16*(7440). https://doi.org/10.3390/en16217440

Pelletier, M.G., Holt, G.A., Wanjura, J.D., Lara, A.J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G., & Bayer, E. (2017). An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Industrial Crops and Products*, *95*, 342–347. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042

Riccio, Gianluca. (2021). Isolamento de casa com cogumelos? Resistente, acessível, emissões zero. *Futuro prossimo*. https://pt.futuroprossimo.it/2021/10/isolamento-abitazioni-con-funghi-resistenti-convenienti-a-emissioni-zero/

Saez, Dana, Grizmann, Denis, Trautz, Martin, & Werner, Anett. (2022). Exploring the Binding Capacity of Mycelium and Wood-Based Composites for Use in Construction. *biomimetics*, *7*, 78. https://doi.org/10.3390 biomimetics7020078

Souza, Eduardo. (2020). *Edifícios de cogumelos? As possibilidades do uso do micélio na arquitetura*. ArchDaily Brasil. https://www.archdaily.com.br/br/948979/edificios-de-cogumelos-as-possibilidades-do-uso-do-micelio-na-arquitetura

Vašatko, Hana, Gosch, Lukas, Jauk, Julian, & Stavric, Milena. (2022). Basic Research of Material Properties of Mycelium-Based Composites. *biomimetics*, *7*, 51. https://doi.org/10.3390/ biomimetics7020051

Wikipedia. (sem data). *Micélio*. Wikipedia, a enciclopédia livre. Obtido 2 de abril de 2024, de https://pt.wikipedia.org/wiki/Micélio

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO MATERIAL DO NINHO DA VESPA ASIÁTICA

Naim Sedira[a]; Moisés Santos[a]; Fábio Pereira[a]; Cristovão Santos[a]; Sandra Pereira[a,b], Miguel Nepomuceno[b,c], Isabel Bentes[a,b], Jorge Pinto[a,b]

[a] UTAD (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 VILA REAL, Portugal), naimsedira@utad.pt, moisantos18@gmail.com, famp@utad.pt, clsantos@utad.pt

[b] CMADE (Centre of Materials and Civil Engineering for Sustainability, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal), spereira@utad.pt, ibentes@utad.pt, tiago@utad.pt

[c] UBI (Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, 6201-001 COVILHÃ, Portugal), mcsn@ubi.pt

RESUMO

O ninho da vespa asiática (NVA) tem despertado o interesse de vários investigadores de diversas áreas do conhecimento. Na perspetiva da construção, este ninho revela uma complexidade funcional, arquitetónica, construtiva, estrutural e material deveras interessante. Alguns trabalhos de investigação foram publicados recentemente sobre o estudo desta construção animal. De uma maneira geral, estes trabalhos debruçaram-se sobre uma visão macro das estratégias construtivas, sobre a caracterização química do material de construção e sobre a descrição da solução arquitetónica e construtiva. Este trabalho de investigação pretende dar um contributo na caracterização mecânica do material do ninho da vespa asiática. Para o efeito, foram recolhidas algumas amostras de material de um ninho de vespa asiática, foram preparados diferentes provetes, ajustadas as técnicas de ensaio e realizados ensaios de tração. Com base nos resultados experimentais, foi possível obter de forma aproximada a capacidade resistente à tração do referido material. Importa acrescentar que este material é natural, de origem celulósica e bastante heterogéneo. Pensa-se que este trabalho possa dar contributo na temática dos materiais e das construções naturais.

Palavras-chave: Ninho de Vespa Asiática; Materiais naturais; Construção natural; Propriedades Mecânicas

1 INTRODUÇÃO

A natureza é amplamente reconhecida como uma profunda fonte de conhecimento, oferecendo soluções frequentemente procuradas pelos humanos. Ao longo de mais de 3,8 bilhões de anos de evolução, via testes contínuos, investigações, desenvolvimentos e soluções adaptativas, a natureza acumulou uma riqueza em sabedoria. Este conceito é encapsulado na biomimética, um termo originado das palavras gregas “BIOS”, que significa vida, e "mimese", que significa imitar. Cunhado em 1962, o termo biomimética envolve a emulação consciente do génio da natureza. Conforme definido por Janine Benyus em 1997, a biomimética é “a emulação consciente do génio da natureza” (Benyus, 1997; Sedira *et al*., 2024).

Nós humanos podemos aprender com a natureza, por exemplo, a arquitetura animal é um tema fascinante na história natural, crucial para a sobrevivência dos animais ao proporcionar proteção contra predadores e elementos externos. Em particular, os ninhos de insetos sociais desempenham um papel essencial na vida das colónias, fornecendo informações valiosas sobre o tamanho da colónia, taxa de crescimento, divisão do trabalho, armazenamento de alimentos, defesa e considerações económicas. Além disso, abrange conceitos avançados de fenótipo e homeostase, entre outros parâmetros que justificam uma investigação mais aprofundada (Hansell, 2005, 2007). Ao contrário de outros grandes grupos de insetos sociais, as vespas sociais normalmente constroem os seus ninhos acima do solo, expondo-os às variações do meio ambiente. Esses ninhos são construídos para suportar a sua carga permanente (e.g. o peso próprio) e as ações variáveis tais como a sobrecarga, o vento, as variações térmicas, entre outras, enquanto suspensas nos seus apoios. As vespas criam um material semelhante ao papel ao mastigar a polpa raspada de madeira morta ou ao recolher fibras vegetais de plantas vivas, combinadas com casca, folhas mortas ou outros tecidos vegetais do chão da floresta (Wenzel, 2020).

Em 2001, M.R. Cole *et al*. (Cole *et al*., 2001) realizaram um estudo quantitativo abrangente para explorar as propriedades físicas do papel dos ninhos em três espécies distintas de vespas da subfamília Vespinae (Hymenoptera, Vespidae). A pesquisa examinou minuciosamente como os comportamentos e preferências de construção de ninhos dessas espécies influenciaram as características do papel dos ninhos que produziram. Através de análise detalhada, Cole *et al*. observaram diferenças significativas na composição e na integridade estrutural do papel dos ninhos entre as espécies de vespas estudadas. Estas variações foram intimamente relacionadas às condições ambientais específicas e aos hábitos de nidificação preferidos por cada espécie. Por exemplo, as espécies que preferem construir ninhos em locais expostos podem produzir ninhos com diferentes resistências à tração e de durabilidade em comparação com aquelas que preferem ambientes mais protegidos. Contudo, eles não estudaram o ninho deste tipo de vespa, nem sequer, este tipo de ninhos localizados em Portugal. Também, estes autores não mostram qualquer imagem real ou gráfico dos resultados alcançados.

Recentemente, e no contexto da biomimética N. Sedira *et al*. (Sedira *et al*., 2023) investigaram a arquitetura interna de ninhos de vespas asiáticas (NVA) utilizando técnicas avançadas de imagem, como tomografia computorizada e radiografia de raio-X. O seu objetivo foi compreender a construção e a função desses ninhos e inspirar-se no engenhoso *design* da natureza. Os NVA apresentam um arranjo notável de células hexagonais que funcionam como compartimentos individuais. Os pedicelos (caules) nestes ninhos desempenham um papel crucial na transferência de carga e na garantia de estabilidade. Ao estudar estes princípios arquitetónicos, os investigadores pretendem inspirar práticas inovadoras e sustentáveis em áreas como a arquitetura e a engenharia civil. Além disso, a intrincada microestrutura do material do ninho, composta por vários fragmentos e fibras de plantas, oferece informações valiosas para melhorar a estabilidade e a durabilidade das construções humanas.

Neste estudo investigam-se algumas propriedades mecânicas, em particular, a resistência à tração, de um material semelhante ao papel encontrado na envolvente externa dos ninhos das vespas asiáticas. Compreender as propriedades mecânicas do material do ninho das vespas asiáticas é importante por várias razões. Primeiro, oferece *insights* sobre as capacidades naturais de engenharia desses insetos, mostrando como otimizam materiais para funções específicas estruturais e de isolamento. Em segundo lugar, esse conhecimento pode inspirar novos projetos biomiméticos em engenharia e arquitetura, onde materiais leves e resistentes são altamente valorizados. Por fim, do ponto de vista biológico, entender a integridade estrutural desses ninhos contribui para um entendimento mais amplo do comportamento e da evolução dos insetos. Através de um trabalho experimental, este artigo pretende divulgar alguns dados mecânicos do material do ninho, em particular, a sua capacidade resistente em relação à tração. Deste modo, pensa-se que se poderá dar um contributo no avanço tecnológico e no design de materiais biomiméticos. Acresce ainda dizer, que este estudo ainda se encontra numa fase preliminar e que estes são os primeiros resultados a serem divulgados neste contexto. Também parece ser oportuno acrescentar que o interesse de se investigar a capacidade resistente à tração prende-se com o facto da estrutura do ninho estar predominantemente sujeita a esforços de tração, uma vez que se encontra suspensa.

2 CASO DE ESTUDO E MÉTODOS

2.1 CASO DE ESTUDO

A Figura 1 mostra o ninho de vespa asiática usado como caso de estudo e que foi recolhido em Amarante, no Norte de Portugal. Trata-se de um ninho de grandes dimensões. Esta construção natural é formada por duas partes distintas, o revestimento exterior (Figura 1.a) e os favos interiores (Figura 1.b). Os materiais de construção são distintos nesta construção. É notável o nível de sofisticação de engenharia estrutural desta construção natural. Este ninho é formado por cinco favos (dispostos simetricamente e igualmente espaçados), Figura 1.b, e que são envolvidos pelo complexo revestimento exterior. Esta construção simétrica realça a habilidade organizacional das vespas e a capacidade de criar uma construção estável, confortável, sustentável e integrada no ambiente e na paisagem.

2.2 MÉTODOS

O trabalho experimental assentou na realização de ensaios de tração, no laboratório de Engenharia Mecânica da UTAD. Para o efeito, foram recolhidos provetes do ninho, mantidos em laboratório durante um ano (temperatura de 22 ºC), preparados e ensaiados à tração até à rotura. Foi usada uma máquina de ensaios uniaxiais INSTRON 5848 MicroTester, Figura 2.a. Geralmente, um ensaio desta natureza é realizado em amostras, em quantidade considerada representativa, de forma e de dimensões padrão, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Seguidamente, estes provetes são fixados à máquina universal de ensaios que aplica forças crescentes. A força aplicada ($\vec{F}_a$) e o respetivo deslocamento são medidos continuamente pelo equipamento e normalmente o ensaio decorre até à rutura do provete.

Na Figura 2, é possível observar o equipamento usado assim como as amarras que permitirão fixar os provetes a ensaiar à tração.

(a) (b)

Figura 1 – (a): Ninho da vespa asiática; (b): Interior do ninho da vespa asiática.

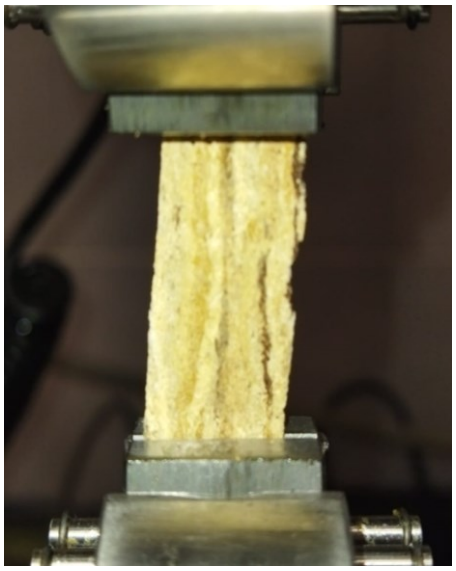
(a) (b)

Figura 2 – (a): Máquina de ensaios uniaxiais INSTRON 5848 MicroTester; (b): Amarras INSTRON 2716-017 (Carga máxima 2kN)

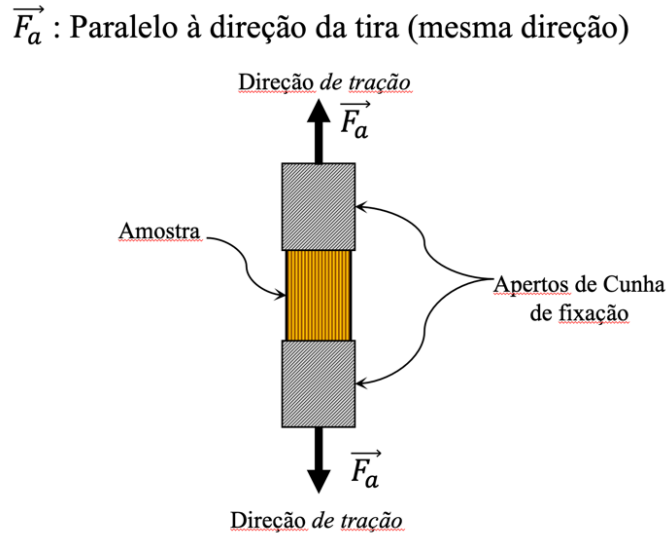
A recolha das amostras, a preparação dos provetes e a fixação destes através das amarras (ou cunhas) foram tarefas experimentais muito desafiantes tendo em conta a fragilidade do material a ensaiar. Outra limitação deste ensaio esteve relacionada com o facto de os provetes não serem perfeitamente planos.

A Figura 3 mostra a configuração deste ensaio. Por exemplo, na Figura 3.a um provete está a ser ensaiado à tração e na Figura 3.b mostra-se esquematicamente este processo de ensaio.

Neste caso, foram ensaiadas quatro amostras de material do revestimento do ninho e paralelamente às camadas do material, Figura 3.a.



(a)



(b)

Figura 3 – Ensaio de tração do material de revestimento do NVA. (a) Configuração física; (b) Configuração esquemática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra os diagramas tensão (MPa) - extensão (%) das quatro amostras ensaiadas. Estes gráficos ilustram as características de comportamento à tração do material.

Em geral e de forma simplificada, o material apresenta uma fase linear e até se atingir a rotura.

A variabilidade das curvas de tensão-extensão obtidas está relacionada com os seguintes fatores: variabilidade do material, variabilidade dimensional das amostras, impossibilidade de se obter amostras perfeitamente planas, dificuldade de montagem das amostras nas amarras, dificuldade de alcançar uma perfeita amarração da amostra às cunhas, entre outros.

O Módulo de Young (*E*) é a inclinação da porção linear do diagrama tensão-extensão. Este é calculado através da Expressão 1:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

Onde Δσ é a variação tensão e Δε é a variação da extensão na região linear.

A resistência à tração é a tensão máxima que o material pode suportar. No gráfico, é o valor de pico da tensão.

A extensão última é a extensão correspondente à resistência à tração. É o valor da extensão no pico de tensão.

A Tabela 1 apresenta os valores destas propriedades obtidas para as quatro amostras ensaiadas.

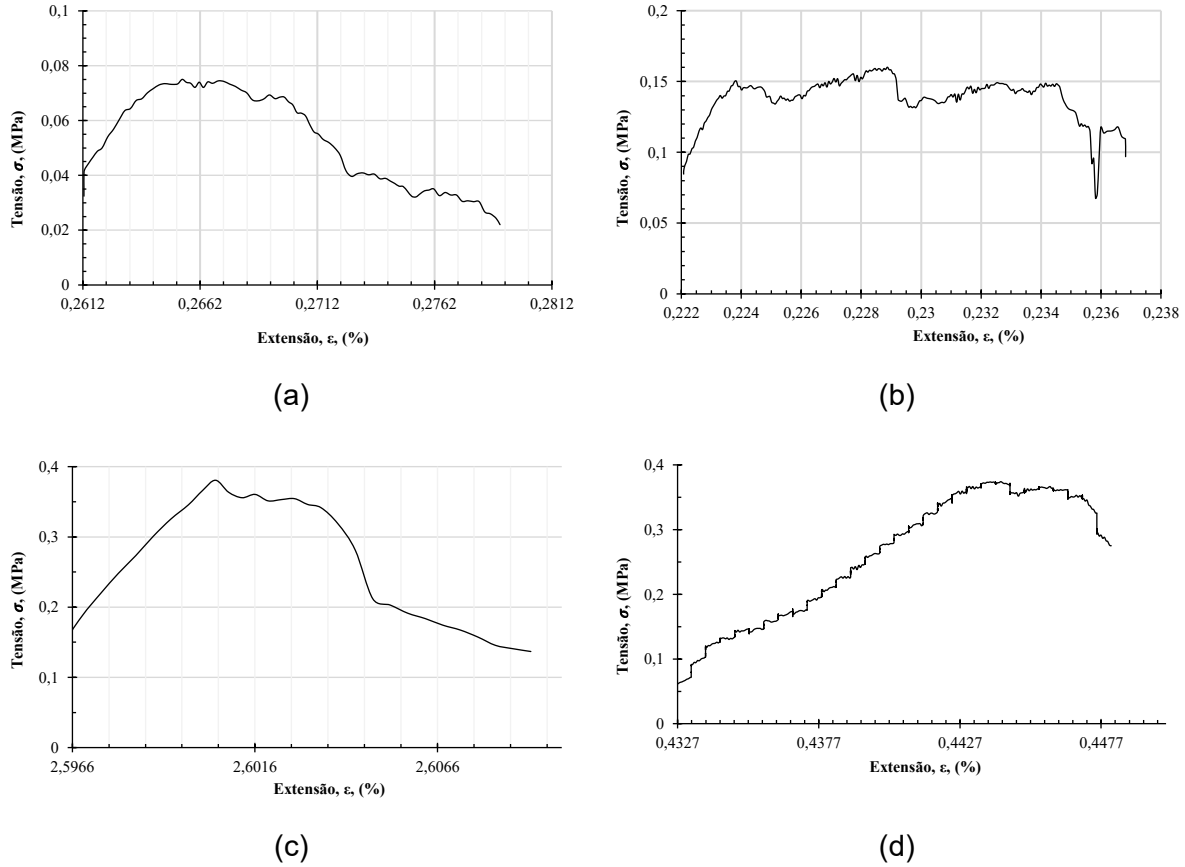


Figura 4 – Diagrama tensão-extensão de: a) Amostra 1; b): Amostra 2; c): Amostra 3; d): Amostra 4

Tabela 1 – Algumas propriedades mecânicas do material do revestimento do NVA.

Amostra	Módulo de Young (*E*) (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Extensão última (%)
1	7,6	0,075	0,265
2	44,1	0,160	0,230
3	57,6	0,381	2,600
4	50,4	0,374	0,444

Na Figura 5 é possível observar o modo de rotura obtido geralmente. A densidade do material estudado é aproximadamente de 0,23 g/cm^3.

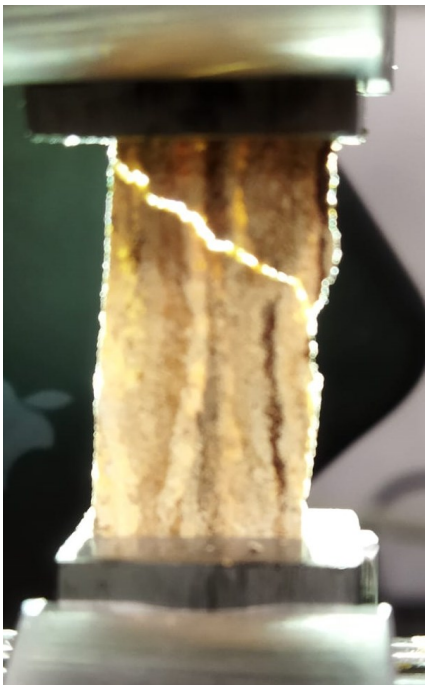


Figura 5 - Modo de rotura

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta alguns dos resultados obtidos num trabalho preparatório de avaliação das propriedades mecânicas do material do NVA.

É proposto um procedimento experimental de determinação de algumas propriedades mecânicas do comportamento à tração do material de revestimento do NVA.

É necessário aperfeiçoar este procedimento experimental.

Também é necessário ensaiar um maior número de amostras de NVA.

As maiores dificuldades enfrentadas foram a variabilidade do material do NVA, a variabilidade dimensional das amostras, a impossibilidade de se obter amostras perfeitamente planas, a fragilidade do material do revestimento do NVA, a dificuldade de montagem das amostras nas amarras, a dificuldade de alcançar uma perfeita amarração da amostra às cunhas, entre outras.

AGRADECIMENTOS
Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT através do projeto UIDB/04082/2020 (C-MADE).

REFERÊNCIAS

Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. HarperCollins Publishers Ltd.

Cole, M. R., Hansell, M. H., & Seath, C. J. (2001). A quantitative study of the physical properties of nest paper in three species of Vespine wasps (Hymenoptera, Vespidae). Insectes Sociaux, 48(1), 33–39.
https://doi.org/10.1007/PL00001742

Hansell, M. (2005). Animal architecture. In Oxford Animal Biology Series Editors. Oxford University

Press Inc., New York.
https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.09.082
Hansell, M. (2007). Built by Animals: The natural history of animal architecture. In Oxford University Press Inc., New York. Oxford University Press Inc., New York.
https://doi.org/10.1007/s11356-018-1626-x
Höcherl, N., Kennedy, S., & Tautz, J. (2016). Nest thermoregulation of the paper wasp Polistes dominula. Journal of Thermal Biology, 60, 171–179.
https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.07.012
Jones, J. C., & Oldroyd, B. P. (2006). Nest Thermoregulation in Social Insects. In Advances in Insect Physiology (Vol. 33, Issue 06).
https://doi.org/10.1016/S0065-2806(06)33003-2
Sedira, N., Pinto, J., Bentes, I., & Pereira, S. (2024). Bibliometric analysis of global research trends on biomimetics, biomimicry, bionics, and bio-inspired concepts in civil engineering using the Scopus database. Bioinspiration & Biomimetics, 19(4), 56.
https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad3ff6
Sedira, N., Pinto, J., Ginja, M., Gomes, A. P., Nepomuceno, M. C. S., & Pereira, S. (2023). Investigating the Architecture and Characteristics of Asian Hornet Nests: A Biomimetics Examination of Structure and Materials. Materials.
Wenzel, J. W. (2020). Nest Structure: Social Wasps. Encyclopedia of Social Insects, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90306-4_146-1

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONTRIBUTOS PARA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE CASAS CONSTRUIDAS EM BLOCOS/BLOQUETES DE GESSO NAS REGIÕES PRODUTORAS DE GIPSITA

Sobrinho, Carlos Welligton de A. Pires [a,b]

[a]Escola Politécnica de Pernambuco, Av. Benfica, 455, 50720-001, Recife, Brasil, carlos.sobrinho@upe.br

[b]Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 700, 50750-545, Recife,Brasil, carlositep@gmail.com

RESUMO

A previsão da estimativa de vida útil de elementos que compõem uma edificação, quando não conhecido seu comportamento, necessita de metodologia que considere a influência dos mecanismos depreciativos que interferem no desempenho ao longo do tempo.

Neste artigo estão apresentados os principais contributos que podem auxiliar na formulação da metodologia para a determinação da vida útil de referência de fachadas em alvenaria de blocos de gesso, utilizando métodos fatoriais com análises de regressão linear considerando os diversos indicadores de falhas, bem como os critérios para quantificar os fatores modificadores da formulação semi-empírica do método dos fatores.

A metodologia fatorial foi empregada tendo por base resultados obtidos na campanha de inspeção em 62 edificações construídas em componentes de gesso em três regiões do estado de Pernambuco-Brasil, considerando os principais fatores associados as curvas de tendência apresentados pela análise de regressão linear, propiciando a determinação da estimativa da vida útil para este tipo de edificação.

Os resultados mostraram que a determinação da Vida Útil Estimada (VUE), associando os modelos de quantificação de falhas e do grau de severidade como modelo para determinação da Vida Útil de Referência (VUR), mostrou resultados bastante coerentes com o comportamento apresentado nas casas investigadas.

Palavras-chave: Vida útil, Método dos fatores, Alvenaria de gesso. Durabilidade

1 INTRODUÇÃO

A previsão de vida útil de um ativo construído pode seguir duas linhas de investigação, uma de natureza probabilística por considerar que os fenômenos que governam o processo de deterioração seguem um processo estocástico (variáveis de comportamento aleatório), não contempladas por equações diferenciais ordinárias e outra de linha de natureza determinística onde considera que as variáveis apresentam comportamento que podem ser associadas às características ação-resposta, sendo os fenômenos potencialmente equacionáveis.(unifac, 2019).

Segundo Gaspar & de Brito, (2008) os métodos probabilísticos tendem a ser bastante complexos, credíveis, mas também difíceis de implementar, enquanto as metodologias determinísticas apresentam simplicidade em expressar fenômenos complexos com sua aplicabilidade por todos os atores do "cluster" de construção (Moser 2004). Os métodos determinísticos apresentam abordagens mais diretas, cujos resultados são normalmente expressos através de uma única formulação, porém incapaz de expressar toda a dispersão que atua no processo.

A análise fatorial procura definir, a partir de conjuntos de variáveis correlacionaveis, fatores que possam resumir as diversas variáveis representativas de um conjunto, com uma perda mínima de informação, sendo possível tornar mais simples um estudo complexo, reduzindo um grande número de variáveis correlacionadas em fatores com baixa correlação entre si (Oper, 2019).

O método dos fatores (AIJ, 1993) é a metodologia mais utilizada nos estudos sobre estimativa de vida útil das edificações, servindo de referência na norma ISO 15686 (ISO, 2014) para a estimativa de vida útil de ativos construídos. Este método apresenta um procedimento de determinar a Vida Útil Estimada (VUE), tendo por base uma Vida Útil de Referência (VUR), sendo corrigida por fatores modificadores na estimativa da vida útil da edificação ou de suas partes.

Gaspar & de Brito (2008b) apresentou uma metodologia para determinar a VUR utilizando ama quantificação dos níveis de degradação de um ativo, ou parte deste, denominado ODL (Overall Degradation Level), realizada através da soma ponderação dos defeitos (falhas) quantificados, em níveis discretos, por investigação visual, em edificações submetidas a condições climáticas similares.

Outro caminho, utilizado na determinação da VUR, consiste na determinação do grau de severidade de degradação (S) de um determinado sistema (revestimento de fachada), que representa uma indicação do grau de degradação do sistema investigado (Gaspar & de Brito, 2011), similar ao anterior, possibilitando considerar ponderações no estado de degradação das falhas investigadas.

O objetivo deste artigo é aplicar uma metodologia para determinar a VUE de casas térreas construídas com componentes de gesso, tendo por base a campanha de inspeção realizada nas edificações da região do Araripe, por ser esta região a que mais concentra casas térreas construídas com blocos e bloquetes de gesso no Brasil.

2 MÉTODO / CASO DE ESTUDO

2.1 METODOLOGIA

Considerando as fachadas como os elementos mais sujeitos aos agentes de degradação, sendo estas a primeira barreira de proteção para os demais elementos/sistemas de uma edificação, estas foram tomadas como objeto de avaliação da determinação da vida útil.

A metodologia fatorial foi empregada tendo com base nos resultados obtidos na campanha de inspeção em 62 edificações construídas em componentes de gesso nas três regiões do estado de Pernambuco, região responsável por 90% do gesso produzido no Brasil e onde se concentra a maior quantidade de casas térreas construídas com estes componentes. A Norma ISO 15686-1 (ISO, 2014) considera que o método fatorial como referência para a estimativa da vida útil de um componente, de um elemento ou mesmo de uma edificação.

A aplicação deste método permite determinar a VUE para um elemento ou sistema construtivo, sob condições específicas. Tem como base uma VUR e uma série de fatores modificadores relacionados com as variáveis, de baixa correlação, que dizem respeito a ações ou condições específicas que agem sobre o produto em avaliação. O método fatorial é expresso pela Equação 1:

$$VUE = VUR \times Factor\ A \times Factor\ B \times Factor\ C \times Factor\ D \times Factor\ E \times Factor\ F \times Factor\ G \quad [1]$$

Onde: VUE - Vida Útil Estimada; VUR - Vida Útil de Referência; Fator A - fator relacionado à qualidade do material/componente; Fator B - fator relacionado à qualidade do projeto; Fator C - fator relacionado à qualidade da execução no local; Fator D - fator relacionado às condições ambientais internas; Fator E- fator relacionado às condições ambientais externas; Fator F - fator relacionado às condições de uso da construção; e Fator G - fator relacionado ao nível de manutenção.

A VUR, principal quantificador da VUE, foi determinada através do levantamento de falhas nas edificações investigadas e ratificada através da validação dos resultados utilizando análises de regressão para curvas de degradação, estas estimadas através de indicadores quantificados.

2.2 QUANTIFICADORES DE DEGRADAÇÃO

Para a determinação da VUR foram utilizadas a quantificação dos níveis de degradação, denominado ODL (Overall Degradation Level), apresentado em Gaspar&de Brito (2008a), e a determinação do indicador de severidade de degradação (S) que representa uma indicação do grau de degradação do sistema investigado (Gaspar&de Brito, 2011).

As Equações 2 e 3 apresentam as formulações para a determinação dos dois quantificadores de degradação utilizados:

$$ODL = \frac{\sum ni.j}{Ni} \quad [2]$$

ODL- nível geral de degradação, onde ODL ϵ K
ni - número de defeitos associado a falha j, j ϵ J
J - Escala de falha {0,1,2,3,4}, para cada falha específica j; e
K- Espaço das condições gerais de falha [0,00 - 4,00]

$$S = \frac{\sum(An.Kn.Kan)}{(A.K)} \quad [3]$$

S - Indicador de severidade da degradação;
An- área da fachada afetada pela anomalia n [m^2];
Kn- Constante de ponderação das anomalias n,
Kn ϵ [0,1,2,3,4];
Kan- Constante de ponderação relativo ao peso
da anomalia, definida em função dos custos de reparação,
Kan ϵ R;
K- Constante de ponderação igual ao Kn mais elevado;
A- Área total investigada.

Em ambas as formulações o tempo é usado como variável independente, quantificado como a idade das edificações investigadas. Cada edificação avaliada apresenta um nível geral de degradação (ODL) formado pela composição da quantificação do número de falhas observadas ponderada pelo nível de degradação considerado, bem como pelo indicador de severidade da degradação (S) que considera esta quantificação através das áreas atingidas, ponderada pelo nível de degradação e pela extensão desta degradação referente a área total avaliada.

Para possibilitar uma comparação dos resultados entre as duas formulações foi utilizada a caracterização do percentual das áreas afetadas/investigadas e sua parametrização aos níveis de severidade macro, no espaço das condições gerais de falha $K \in [0,00 – 4,00]$.

A distinção entre os níveis das falhas foi definida com base em evidências e sintetizados em quatro níveis, utilizado pelas duas formulações:

a) grau de degradação incipiente (nível 1) (K = 1) associado a danos visuais iniciais, como manchas e perda de tonalidade na pintura, quando existe, indicandoo primeiro sintoma de degradação;

b) indicativos de baixa degradação (nível 2) (K = 2) associada a indicadores relacionados à constatação de manchas que indicam presença de água e de perda de pintura sobre blocos, visto que sobre estas condições o contato direto da água é de menor poder degradador; manchas de umidade sobre os componentes e a detecção de micro fissuras, só perceptível em olhar bem próximo;

c) degradação instalada (nível 3) (K = 3) representada pela identificação da perda da proteção (revestimento/pintura) sobre componentes standard e manchas de umidade com indicação de fungos sobre os componentes, bem como fissuras detectadas visualmente com facilidade (olhar rápido); e

d) degradação extensa (nível 4) (K = 4) associada a constatação de fissuras dos componentes e fissuras indicadoras de movimentação da edificação ou bastante intensa.

A extensão de danos, utilizado para diferenciar os diferentes tipos de falhas pertencentes a um mesmo nível de degradação, está proposto para variar entre 0,8 e 1,4, considerado em função da intensidade do tipo de de falha . Já o coeficiente que expressa o diferencial de custos potenciais de reparo da falha foi considerado 0,8 para correção de manchas de umidade; 1,0 para correção de danos na pintura/revestimento; 1,1 para correção de fissuras; e 1,2 para correção de indicativos de degradação.

Na avaliação dos indicadores de severidade da degradação, foram ainda considerados dois cenários. O cenário 1, denominado S1, que não considera os custos potenciais de recuperação, aplicando apenas o coeficiente de extensão dos danos, e o cenários 2, denominado S2, que considera a influência dos custos potenciais de recuperação.

As principais características utilizadas para diferenciação dos níveis de degradação nos sistemas de proteção (revestimento/pintura) aplicados sobre os componentes de gesso são:

a) os sistemas de revestimento/pintura, no contexto da durabilidade, têm como função principal a proteção das alvenarias, quer por dificultarem a infiltração da água, quer por evitarem o contato direto da água com os componentes de gesso;

b) as pinturas à base PVA apresentam aderência pouco durável quando aplicadas aos componentes de gesso hidrofugado, por estes serem fabricados com aditivos impermeabilizantes à base de silicone. Por outro lado, estes aditivos conferem aos componentes uma estanqueidade à infiltração da água e uma maior resistência à degradação por solubilização e lixiviação;

c) as pinturas à base de PVA sobre componentes standard apresentam maior aderência, quando comparada com as aplicadas sobre blocos hidro. Porém, a perda do poder de cobertura possibilita as infiltrações de água e uma maior degradação por solubilização;

d) as pinturas à base de cal não apresentam diferenças significativas quando aplicadas aos diferentes tipos de componentes, sendo sua perda considerada como um indicador de avanço da degradação; e

e) os revestimentos à base de argamassa apresentam menor aderência aos componentes lisos e de maior dimensão (blocos), unidos com cola de gesso, quando comparado aos revestimentos aplicados sobre alvenaria de componentes mais rugosos e de menor dimensão (bloquetes), por estes últimos exigirem juntas mais largas e com utilização de argamassa. A perda da pintura ou mesmo parte da áreas de revestimento revelam avanço da degradação.

Os aspectos que envolvem o avanço da umidade sobre as alvenarias de componentes de gesso, com e sem revestimentos, constituem-se em indicativos de degradação na medida em que podem revelar não só a fonte que origina a umidade (infiltração por capilaridade, acúmulo de água na base), mas também o estágio que se mostra quanto ao poder de degradação, bem como o aspecto da existência de um microclima potencial a degradação.

As fissuras são indicativos de fragilidade associados a concentração de tensões, geralmente localizadas, ou falha de ligação. As principais causas que originam as fissuras nas alvenarias das casas construídas com componentes de gesso são:

a) Concentração de cargas da estrutura de coberta depositadas diretamente sobre as paredes, principalmente as paredes longas e sobre vãos (portas e janelas);

b) Ausência de vergas nas portas e vergas e contravergas nas janelas;

c) Constatação de recalque por observação de fissuras inclinadas nas paredes de fachada; e união de blocos de gesso com gesso-cola, já que a união com argamassa, observada na união de bloquetes, diminuem esta rigidez

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 SOBRE A CONSISTÊNCIA DOS DADOS E DAS FORMULAÇÕES APLICADAS

Na campanha realizada foram inspecionadas 58 casas térreas, localizadas nos municípios de Araripina e Trindade. A região que os constitui é considerada homogénea, classificada como zona bioclimática Z7 (ABNT, 2005). Outras 3 casas localizadas no município de Gravatá, na zona bioclimática Z6, e o protótipo construído no Recife, na zona bioclimática Z8.

Os resultados aplicados às edificações estão mostrados na Figura 1, por Sobrinho(2021).

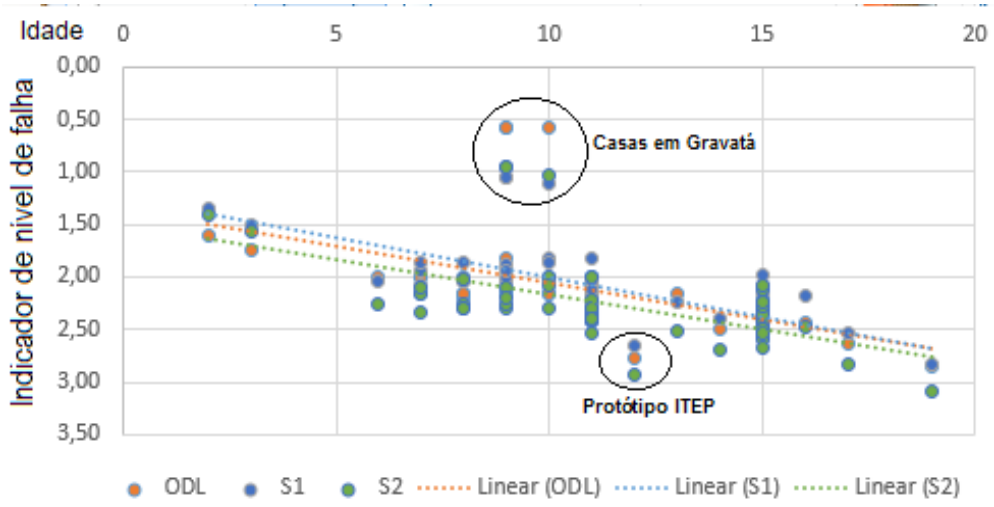


Figura 1- Resultados dos indicadores de degradação e severidade versos idade das edificações

Observa-se também que o comportamento dos indicadores ODL (*Overall Degradation Level*) e os Si (Grau de Severidade de degradação) mostram comportamento e valores similares.

Observa-se que os resultados referentes às casas construídas em alvenaria de blocos em Gravatá e a casa protótipo, também construída em alvenaria de blocos em Recife, mostraram resultados bastante destoantes do universo das edificações avaliadas.

Constata-se que o comportamento destes indicadores refletem uma diferença de padrão, tanto cultural quanto climático. As casas em Gravatá foram construidas por uma Empresa para famílias de alto padrão econômico utilizando acabamento com materias de elevada qualidade (massas e pinturas), além de estarem localizadas em uma região bioclimática que apresenta menor intensidade de chuvas (Z6). Já o protótipo, embora construido com materais e técnicas similares às do Sertão não é habitada e está localizada na região litorânea, com intensidade de chuvas três vezes maior(Z8).

A influência climática é sem dúvida o principal fator que afetam nos resultados. A zona bioclimática Z6 (região do agreste: Gravatá) apresenta as menores precipitações pluviométricas, menor velocidade média dos ventos e umidade média relativa intermediária entre as demais regiões consideradas. Já a casa protótipo do ITEP, situada na Zona bioclimática Z8 (Região do Litoral: Recife), apresenta as maiores pricipitações pluviométrivas e as maiores velocidades médias de vento e uma umidade relativa sempre superior a 65%.

Outro fator que possivelmente tenha influenciado na minimização das manifestações patológicas das casas localizadas em Gravatá foi o sistema de pintura empregado nas fachadas (pintura a base de esmalte sintético e tinta acrílica), corroborando com resultados apresentados em Sobrinho(2018).

Analisando dentro da mesma região bioclimática do Sertão (Z7), em um universo de 58 casas, é possível perceber que os três indicadores apresentam comportamento similar, não existindo disparidade maior entre valores porém, os indicadores que representam graus de severidade S1 e S2 conseguem assimilar as variações das extensões das manifestações patológicas atuantes, exigindo maior sensibilidade dos avaliadores na determinação das áreas afetadas. A **Error! Reference source not found.**2, por Sobrinho(2021), mostra o comportamento dos indicadores apenas situados na região do sertão pernambucano (Z7).

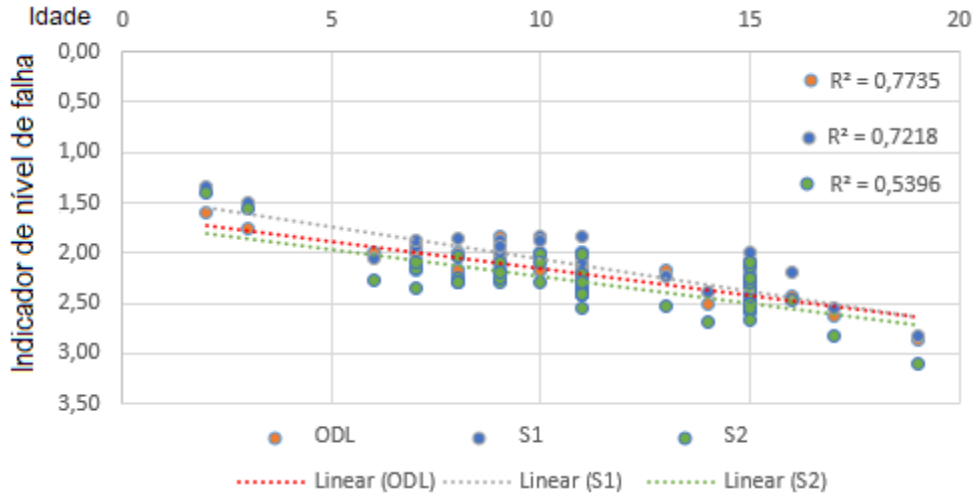


Figura 2- Resultados indicadores de degradação/severidade versos idade casas no sertão

Na análise do comportamento das linhas de tendência referente apenas aos resultados das quantificações realizadas nas edificações localizadas na zona Z7, envolvendo os municípios de Araripina e Trindade, é possível perceber que o modelo ODL apresentou R^2 = 0,77, indicando que a aderência do modelo baseado em quantificação de falhas só responde por 77% em relação à idade das edificações. Isto quer dizer que a idade das edificações influencia na quantificação das falhas.

Já os modelos S1 e S2 apresentam uma aderência dos resultados nos modelos avaliados com R^2 = 0,72 para o modelo S1 (cenários 1-sem considerar ponderação dos custos de recuperação) e R^2 = 0,54 para o modelo S2 (cenários 2-com ponderação dos custos).

As tendências dos modelos mostram similaridade e proximidade, porém foi observado, após expurgo das amostras pertencentes as zonas Z6 (agreste) e Z8 (litoral), um melhor comportamento do indicador de falha ODL e do grau de severidade S1.

O indicador de severidade S2 é quase sempre maior que o indicador S1, mostra uma variação diferenciada, já que os fatores amplificadores consideram estimativas de custos de intervenção para correção ou minimização do dano.

Com estes últimos é possível considerar que o modelo do grau de severidade que considera a quantificação das falhas por área afetada, ponderada em relação à área total investigada, sendo aplicados níveis de degradação macro (S1), ou mesmo considerando as ponderações específicas considerando custos de intervenção (S2), apresentam uma maior sensibilidade em relação a intensidade de extensão das falhas. Já o modelo de níveis gerais de degradação (ODL) apresenta uma maior facilidade de aplicação, com menor dependência da expertise/sensibilidade do investigador.

3.2 Sobre a Vida Útil de Referência

A vida útil de referência (VUR) depende do conceito relativo do "nível mínimo de desempenho exigido" que varia de acordo com o contexto, status de propriedade, orçamento disponível e outros critérios subjetivos (Gaspar&de Brito, 2008). Se for considerado que o desempenho mínimo que indique a necessidade de recuperação, identificado com a constatação dos níveis de degradação instalada, o nível de degradação para o desempenho mínimo é 3.

Desta forma pode-se determinar a VUR como resultado da intersecção entre a curva de tendência dos indicadores de degradação e a linha que delimita o final do nível 3, neste caso, VUR foi obtido através

da extrapolação das curvas de tendência, utilizando a expressão da regressão linear ODL (modelo que apresentou melhor coeficiente quadrático de Pearson R^2), y=0,0537x+1,6136 aplicando y=3,0 tem-se x=25,8 anos.

Esta VUR diz respeito diretamente às edificações investigadas no sertão (Z7), porém pode ser aplicada com reservas para as outras edificações construídas nas demais zonas bioclimáticas. Neste caso os coeficientes dos fatores modificadores do método dos fatores terão como valor unitário (peso base) as condições que refletem as características majoritárias encontradas nas casas do Sertão.

A pouca quantidade de casas existentes, tanto na zona bioclimática Z6 (três casas em Gravatá), quanto na zona bioclimática Z8 (um protótipo em Recife) inviabiliza a realização de análise de tendência global, por conseguinte, a determinação de uma vida de referência aplicável a todas as regiões.

A expectativa é que, em se utilizando a VUR, determinada em função de uma quantidade representativa de casas e que cuja distribuição mostre um comportamento aceitável ($R^2 > 0,70$), seja possível ponderar a influência climática aplicando o fator E (fator que considera as condições ambientais externas) na determinação da vida útil estimada (VUE) do método doa fatores.

3.3 SOBRE A VIDA ÚTIL ESTIMADA

Após a determinação da Vida Útil de Referência (VUR), outras variáveis de baixa correlação com o tempo foram incorporadas, muitas originárias do processo/etapa de construção e outras do uso e climas (interno e externo). Porém, nem todas apresentadas na formulação do método dos fatores (ISO 15686-1,2011) merecem ser consideradas, quer seja pela constatação da pouca influência, que pela ausência de dados disponíveis.

O Quadro 1 apresenta os coeficiente dos fatores modificadores considerados, tendo por base a expertise e as informações colhidas em campo.

Quadro 1- Quantificação dos fatores modificadores utilizados

FATOR	REQUISITO	CARACTERÍSTICA / PESO				
A- Qualidade de materiais /componentes	Fachada (1 fiada)	Standard	0,8	Bloquete	0,8	
	Fachada (demais fiadas)	Standard	0,9	Bloquete	0,9	
	Revestimento em argamassa	Só frontal	1	Sem	0,9	
	Revestimento em pintura	Sobre argamassa.	1,2	Sem	0,8	
	Espessura do componente	10 cm	1	7 cm	0,9	
B- Qualidade de Projeto	Embasamento em relação ao solo	Mesmo	0,9	Abaixo	0,8	
	Presença de calçadas	Só frontal	1	Sem	0,9	
	Fissuras fruto de ausência de cintas	Pouco perceptível	1	Muitas	0,9	
	Presença de calhas do telhado	Limitada a trechos	1	Sem	0,9	
C- Qualidade de Execução	Constatação de falhas construtivas	Poucas	0,9	Muitas	0,8	
	Acabamento	Razoável	1	Ruim	0,9	
D- Condições ambientais internas	Condicionamento de ar interno	Misto	1	Não	1	
	Ventilação cruzada	Parcial	1	Não	0,9	
	Umidade na parede	Pouca	1	Muita	0,9	
E- Condições ambientais externas	Pluviometria	<600-->1,2		(600-1200)-->1	>1200-->0,8	
	Meses de chuva	<2-->1,2		(2 - 6)-->1	>6-->0,8	
	Veloc. vento	<2-->1,2	(2 - 4)--> 1	>4-->0,8		
	Direção vento	Direta-->1,2	Inclinada-->1	Contra-->0,8		

Os demais fatores potencialmente modificadores como: fator F - fator relacionado às condições de uso da construção e fator G - relacionado ao nível de manutenção ficaram prejudicados por falta de informações consistentes, já que na população investigada o tempo de utilização varia entre 5 e 18 anos e não foi precedido de estudos de acompanhamento sistemático. Há de considerar que a maioria dos casos investigados não mostraram indicativos de ter havido renovação de revestimento e/ou pintura nas paredes de fachada.

Os coeficientes modificadores foram aplicados a cada uma das amostras considerando as condições ambientais da região onde a edificação estava construída, suas características construtivas, seus aspectos de acabamento e manifestações patológicas constatadas nos períodos de inspeção, realizados em abril/2007 e abril/2008.

A Tabela 1 e a Figura 3 mostram os resultados obtidos comparativos entre as idades do tempo de construção e a idade estimada calculada

Tabela 1- Resultados da determinação da Vida Útil Estimada para as casas

	Amostra	Idade	VUE			Amostra	Idade	VUE
Casas construídas em blocos no conjunto residencial - Araripina	1/21	15	25,5		Casas em blocos Trindade	1/3	9	29,9
	2/21	15	22,1			2/3	10	33,9
	3/21	15	22,7			3/3	19	17,8
	4/21	15	21,4					
	5/21	15	22,0		Casas em bloquetes em trindade	1/22	8	24,3
	6/21	15	20,9			2/22	17	20,5
	7/21	15	22,0			3/22	13	20,8
	8/21	15	20,9			4/22	9	25,7
	9/21	15	19,3			5/22	15	18,4
	10/21	15	20,3			6/22	6	20,4
	11/21	15	22,0			7/22	10	26,4
	12/21	15	22,3			8/22	16	23,3
	13/21	15	22,5			9/22	7	22,1
	14/21	15	21,4			10/22	15	22,7
	15/21	15	19,3			11/22	15	24,6
	16/21	15	22,0			12/22	15	25,7
	17/21	15	21,4			13/22	10	29,4
	18/21	15	20,9			14/22	9	26,5
	19/21	15	22,0			15/22	11	29,4
	20/21	15	22,6			16/22	9	22,6
	21/21	15	22,6			17/22	9	20,4
Casas isoladas em Araripina						18/22	7	22,0
	1/2	2	29,2			19/22	7	22,0
	2/2	3	29,9			20/22	8	22,0
						21/22	8	22,1
Casas em blocos conj. residencial - Trindade	1/10	11	24,8			22/22	8	20,9
	2/10	11	24,8		Blocos em Gravatá			
	3/10	11	28,2			1/3	10	33,2
	4/10	11	26,2			2/3	9	33,2
	5/10	11	27,5			3/3	8	33,2
	6/10	11	25,5					
	7/10	11	25,5					
	8/10	11	27,5					
	9/10	11	28,2		Protótipo	1/1	12	7,51
	10/10	11	27,5					

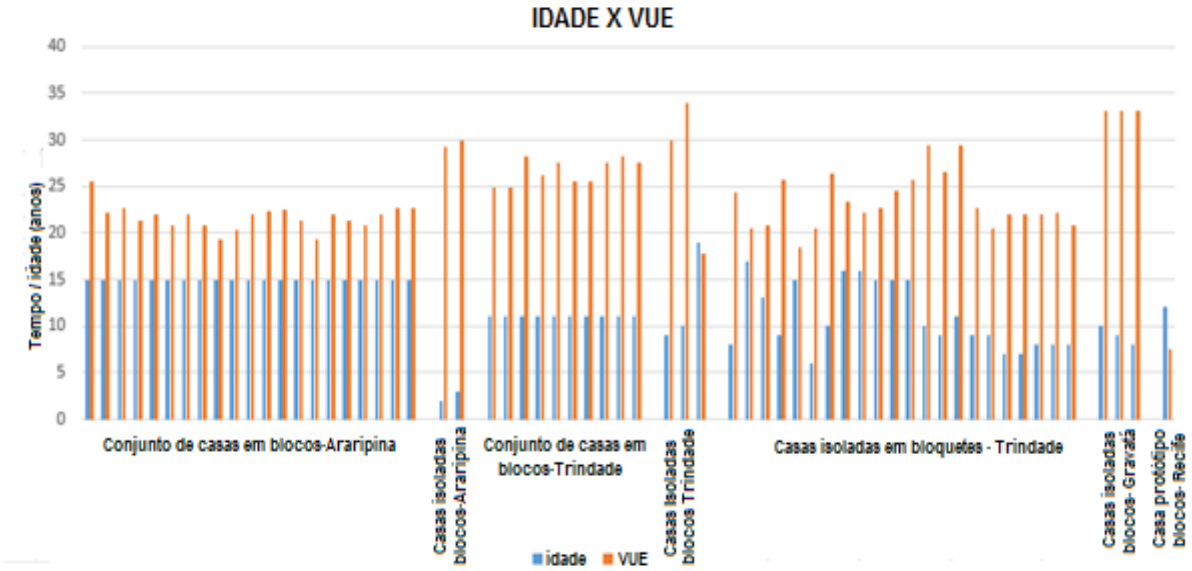


Figura 3- Avaliação comparativa (Idade x Vida Útil Estimada)

Analisando os resultados observa-se que as casas construídas em blocos de gesso pertencentes ao conjunto de casas em Araripina mostram que a vida útil estimada é maior que a idade de construção, com uma pequena variação decorrente principalmente das condições ambientais internas (uso), perda de rigidez da estrutura de coberta no tempo (fissuras por concentração de carga) e alguns indicativos de degradação ainda de forma inicial, observada em algumas casas.

Já as casas isoladas construídas em blocos em Araripina, destacam-se das demais por apresentar qualidade de projeto e de construção. Sua expectativa de vida útil foi estimada em 32,6 anos, bem superior a sua pouca idade construida, bastante coerentes com o observado.

O terceiro conjunto de resultados dizem respeito ao conjunto de casas construídas em blocos hidro em Trindade, que apresentam VUE que varia entre 27 e 32 anos, na época, em 2018, estas casas tinham 11 anos de construídas. Embora apresentem algumas fissuras por concentração de carga de coberta e sobre vazios (portas e janelas), não mostram indicativos de degradação nem infiltração de água. A utilização de blocos hidro em todas as alvenarias externas(fachadas) associada a pintura a base de cal mostraram maior resistência às intempéries.

Outras amostras são de casas isoladas em blocos de gesso construídas em Trindade. A casa urbana mostra aspectos de uma boa construção, assim como o Posto de Saúde, apresentando VUE acima de 32 anos. Já a casa construída na zona rural de Trindade reflete seu estado de degradação acentuado, tendo ultrapassado sua expectativa de vida VUE << Idade.

O conjunto de casas construídas em bloquetes, embora apresentem aspecto rústico e sem revestimento, algumas apenas com revestimento na fachada principal, mostram-se quase sem degradação e refletem a cultura da realidade local, tendo as casas investigadas apresentando idades de construção bastante variadas, mas com VUE> Idade, algumas mostram próxima a estimativa, decorrente das intervenções, ambiente interno e cuidados com manutenção ao longo dos anos.

As casas construídas com blocos em Gravatá, com elevado padrão construtivo, são as que apresentam VUE mais elevado, próximo a 37 anos, bem superior à idade de construção, não mostrando nenhum

indicativo de falha grave. Isto se deve principalmente as condições climáticas mais favoráveis e a qualidade dos materiais e técnicas construtivas.

A casa protótipo mostrou que a VUE (7,5 anos) ficou inferior a idade da construção (12 anos), que embora tenha sido construída com materiais e técnica construtiva semelhante as casas construídas no sertão, sofreu maiores intempéries decorrente principalmente pelas condições climáticas, mostrando degradação diferenciada nas diferentes direções cardeais, sendo as maiores degradações registradas nas fachadas voltadas para direção preponderante dos ventos (ESE), associada a enorme diferença entre precipitações pluviométricas(Z8~2.200mm/ano contra Z7~600mm/ano).

As manifestações patológicas registradas no protótipo, ver item 4.3, corroboram com o fim da VUE, com degradação acentuada na fachada sudeste, infiltrações pelas paredes da fachada, perda de componentes de contorno da janela, fissuras generalizadas sobre portas e encontros de paredes.

4. CONCLUSÕES

A metodologia fatorial utilizada para determinação da Vida Útil Estimada (VUE) das edificações construídas em componentes de gesso, associando os modelos de quantificação de falhas e do grau de severidade como modelo mostrou resultados bastante coerentes com o comportamento apresentado nas casas investigadas.

O modelo de determinação dos níveis de degradação por quantificação de falhas (odl), aplicados às casas construídas na mesma zona bioclimática (Z7), mostrou aderência (R^2 = 77%) similar ao modelo de quantificação por grau de severidade S1 (R^2 = 72%) . Quando utilizados para a determinação da VUR para casas construídas em alvenaria de componentes de gesso, independente do tipo, o indicador odl é de mais fácil aplicação, porém mostra menor sensibilidade às intensidades das manifestações patológicas.

Dos fatores modificadores analisados, o fator referente à influência do ambiente externo foi o que mais ponderou na determinação da VUE, já que considerou os aspectos da influência deste nas amostras pertencentes às três zonas bioclimáticas bastante diferenciadas: (Z7~600 mm/ano; Z3~400 mm/ano; e Z8~2200 mm/ano).

Os resultados obtidos da VUE para as edificações investigadas mostraram resultados bastante aderentes às expectativas de vida útil das edificações, sendo identificadas as influêncas do padrão construtivo (qualidade dos blocos e do sistema de revestimento empregado), do comportamento cultural e das condições climáticas no comportamento das edificações.

Este artigo focou apenas o comportamento das fachadas como elemento de exposição as intempéries associadas as regiões estudadas, poderia ser extendido a demais regiões bioclimáticas do Brasil e ou do exterior, buscando correlações e validação.

Estudos laboratoriais, como realizados em Sobrinho(2021), mostram correlações enre ensaios acelerados e exposição natural da influência de alguns fatores analisados, havendo necessidade de investigação mais aprofundada.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15220:2005- Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social, 2003

Architectural Institute of Japan (AIJ) (1993) – "The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings", AIJ, Japão, 1993

GASPAR, P.; de BRITO, J. (2008a) - Quantifying environment effects on cement-rendered facades: a comparison between different degradation indicators. Building and Environment, vol. 4, n 11, pp 1818-1828.

GASPAR, P.; de BRITO, J. (2008b). Service life estimation of cement-renders facades, Building Research & information, Vol. 36 (1), pp, 44-55. DOI:10.1080 / 09613210701434164

GASPAR, P,; de BRITO, J.(2011). Limit states and service life of cement renders facades Journal of Materials in Civil Engineering.

ISO 15686-1:2011 - Buildings and constructed assets-Service life planning-Part 1-General principle and framework.

MOSER, Konrad, (2002) Engineering design methods for service life prediction. CIB W80 / Rilem 175 - SLM (Service Life Methodologies) TG 'Performance Based Methods of Service Life Prediction' Report, Zurich, 30 pg.

OPER (2019) - Sistema de análise de dados. www.operdata.com.br.

SOBRINHO, C.W.A.P (2021) - Durabilidade das Alvenarias de Blocos de Gesso- Limites de sua Utilização. Tese de Doutorado, FEUP 218pg (2021) *https://hdl.handle.net/10216/136064*

SOBRINHO, C.W.A.P, RAMOS, N.M.M (2018) - Estanqueidade de paredes em blocos de gesso. Construção2018, FEUP, Porto-PT (http://www.itep.br/images/img_noticias/pdf/artigo-carlos.pdf)

UNIFAC (2019). *https://www.unifac.edu.br.imagensmateriaisdeapoiadmestatisticaapostila_%**20estatística***. Acesso em 2019. Acesso em 2019.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO DE BETÕES PRODUZIDOS COM ÁGUA RESIDUAL APÓS TRATAMENTO TERCIÁRIO E AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Adelmar de Oliveira [a]; Jorge de Brito [b]; Miguel Bravo [c]

[a] IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, adelmardeoliveira1@gmail.com

[b] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

[c] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, miguelnbravo@gmail.com

RESUMO

Nesta investigação, foi estudado o comportamento de betões produzidos com agregados naturais e reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição, e com diferentes tipos de água residual após tratamento terciário, provenientes das estações de tratamento de água residual de Beirolas e de Alcântara. Com a crescente pressão sobre os recursos hídricos, a utilização de água residual tratada surge como uma alternativa à água potável na produção de betão.

Com o objectivo de estudar o efeito da incorporação destes materiais, foram produzidos betões com incorporação individual e simultânea de água residual tratada e 50% de agregados grossos reciclados. A caracterização do comportamento mecânico envolveu a avaliação da resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultra-sons. Por sua vez, a caracterização do comportamento em termos de durabilidade envolveu a avaliação da absorção de água por imersão, resistência à carbonatação e penetração de iões cloreto.

Obteve-se resultados aceitáveis para os betões com agregados naturais e reciclados, não se observando variações muito significativas relativamente aos betões com água potável. Por outro lado, concluiu-se que a incorporação de água residual tratada tem um efeito ligeiramente diferente sobre os betões com agregados reciclados, por comparação com agregados naturais.

Palavras-chave: betão, água residual após tratamento terciário, agregados reciclados, resíduos de construção e demolição, comportamento global.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), a população mundial, que atingiu a marca de 8 mil milhões de pessoas em 2022, poderá chegar a 10 mil milhões até 2050. Este aumento exponencial da população coloca uma pressão adicional sobre os recursos hídricos e sobre a indústria da construção. Globalmente, cerca de 30 mil milhões de toneladas de betão são produzidas anualmente, consumindo cerca de mil milhões de toneladas de água potável (Atakan *et al.*, 2016). O betão, por ser o material de construção mais utilizado globalmente, possui uma elevada pegada ecológica. Portanto, surge a necessidade de adoptar práticas sustentáveis na sua produção, como a utilização de materiais recicláveis de modo a reduzir o seu impacte ambiental.

Sendo assim, a fim de promover a conservação dos recursos hídricos e contribuir para mitigar a escassez de água em regiões de alta procura, o uso de águas não potáveis surge como alternativa à utilização de água potável na produção de betão. Contudo, é importante garantir que o betão produzido com estas águas possua as condições necessárias para utilização, nomeadamente um bom comportamento em termos mecânicos e de durabilidade. Neste contexto, a presente investigação visou avaliar um conjunto de propriedades que permitem caracterizar o comportamento do betão produzido com água residual após tratamento terciário (ATT). Por outro lado, visto que actualmente existe um consenso relativamente à utilização de agregados reciclados (AR) na produção de betão, estudou-se o comportamento de betões produzidos conjuntamente com estes materiais.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades físicas dos agregados utilizados. Os agregados naturais (AN) utilizados foram: areia fina (0,125/1 mm), areia grossa (0,125/4 mm), brita 1 (9,5/19 mm) e brita 2 (4/22,4 mm). Os agregados grossos reciclados (AGR), constituídos essencialmente por agregados de betão (76,5%) e materiais cerâmicos (19,3%), foram recolhidos de uma central de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Para a produção de betão, utilizou-se o cimento Portland CEM I 42,5 R da empresa SECIL e o superplastificante SikaPlast 717 da empresa SIKA.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos agregados

Agregado	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	AR
Massa volúmica seca [kg/dm³]	2583,2	2581,4	2609,3	2599,4	1977,0
Absorção de água [%]	0,3	0,7	1,3	1,5	11,0
Baridade [kg/m³]	1530,0	1540,0	1350,3	1360,0	1250,0
Desgaste de *Los Angeles* [%]	-	-	26,5	27,8	46,0

Nesta investigação, utilizou-se água potável (AP) e quatro tipos distintos de ATT. Dois destes tipos foram recolhidos da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Beirolas (BCA e BCB), e os restantes dois da ETAR de Alcântara (ACA e ACB). Complementarmente aos tratamentos padrão aos quais os efluentes são submetidos (preliminar, primário e secundário), a ATT é sujeita a tratamentos adicionais de modo a atingir um nível de qualidade mais elevado. Paralelamente a este estudo, foi realizado um outro, onde se estudou o comportamento do betão produzido com água residual após tratamento secundário (ATS) das ETARs de Beirolas e Alcântara (BCS e ACS, respectivamente). Na Tabela 2, são apresentados os tratamentos da ATT e as características das várias águas, assim como da

ATS, para uma melhor compreensão dos resultados.

Tabela 2 - Tipo de tratamento terciário e parâmetros de qualidade avaliados

Designação	AP	BCA	BCB	BCS	ACA	ACB	ACS
Tipo de tratamento terciário	-	Filtração + ultrafiltração	Filtração + Desinfecção por radiação UV	-	Coagulação-floculação e flotação + Adição de NaClO	Coagulação -floculação e flotação	-
pH	7,8	7,8	7,8	8,2	6,2	7,0	7,3
Condutividade [µS/cm]	139,9	872,0	971,0	927,0	1292,0	1210,0	1757,0
Sólidos totais [mg/l]	90,0	556,0	624,0	574,0	946,0	906,0	1161,0
Carbono orgânico total [mg/l]	8,7	24,3	25,0	28,7	36,1	24,8	27,4
Carbono inorgânico [mg/l]	48,4	147,4	149,9	168,7	15,5	60,1	91,8
Indicador de carbonatação	0,5	0,7	0,8	0,7	1,0	0,9	0,9
Cálcio [mg/][1]	-	93,5	126,0	-	-	146,0	-
Cloretos [mg/l][1]	-	-	294,0	-	393,0	386,0	565,0
Massa volúmica [kg/dm³]	1,0	1,0	1,0	-[2]	1,0	1,0	-[2]

[1]Os equipamentos utilizados para medir estes constituintes apenas permitem detectá-los a partir de determinadas quantidades.
[2]Estas águas foram analisadas no âmbito de uma investigação que não envolveu a realização deste ensaio.

2.2 COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Foram produzidos dez betões, incluindo um betão de referência com AN (AP-0), um betão de referência com 50% de AGR (AP-50) e oito betões que incorporam os vários tipos de ATT mencionados, com e sem AR. Todos os betões foram produzidos com 300 kg/m³ de cimento e 3 kg/m³ de superplastificante. No betão com AR, foi incorporada uma quantidade adicional de água para compensar a elevada absorção de água dos AR e manter uma relação água / cimento (A/C) efectiva constante de 0,55 em todos os betões. Como resultado, os betões com AN apresentam uma relação A/C total de 0,55, enquanto os com AR apresentam uma relação A/C total de 0,62.

2.3 ENSAIOS

Na Tabela 3, são apresentados os vários ensaios realizados, assim como as respectivas normas.

Tabela 3 - Ensaios realizados e respectivas normas

Ensaios aos agregados	
Análise granulométrica	NP EN 933-2 (1999)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Baridade	NP EN 1097-3 (2003)
Desgaste de *Los Angeles*	NP EN 1907-2 (2002)
Ensaios ao betão fresco	
Abaixamento do cone de Abrams	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica	NP EN 12350-6 (2002)
Ensaios ao betão endurecido	
Resistência à compressão	NP EN 12390-3 (2011)
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6 (2011)
Módulo de elasticidade	LNEC E 397 (1993)
Velocidade de propagação de ultra-sons	NP EN 12504-4 (2007)
Absorção de água por imersão	LNEC E394 (1993)
Resistência à carbonatação	LNEC E391 (1993)
Resistência à penetração de iões cloreto	LNEC E463 (2004)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Os betões foram produzidos de modo a possuir a mesma trabalhabilidade e um abaixamento contido no intervalo 170 ± 20 mm. Esta premissa foi cumprida em todos os betões. Por outro lado, não se observou variações significativas relativamente aos respectivos betões de referência (AP-0 e AP-50). Portanto, foi possível concluir que a incorporação da ATT das ETARs de Beirolas e Alcântara não tem um efeito significativo sobre a trabalhabilidade do betão, com AN ou AR.

No que concerne à massa volúmica, o seu valor variou entre 2317,2 e 2340,5 kg/m³ nos betões com AN e entre 2223,8 e 2262,4 kg/m³ nos betões com AR. Assim, concluiu-se que a incorporação dos vários tipos de ATT não tem um efeito significativo nesta propriedade do betão. Estes resultados podem ser explicados pela proximidade entre a massa volúmica dos diversos tipos de ATT e da AP.

3.2 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Resistência à compressão

Na Tabela 4, são apresentados os valores da resistência média à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias dos diversos betões produzidos, assim como as variações relativas aos respectivos betões de referência. Adicionalmente, na Figura 1, é apresentada a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo destes betões.

Tabela 4 - Resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias e variações relativas aos respectivos betões de referência

Betão	$f_{cm,7}$ [MPa]	Δ [%]	$f_{cm,28}$ [MPa]	Δ [%]	$f_{cm,91}$ [MPa]	Δ [%]
AP-0	39,6 ± 0,9	-	44,3 ± 0,7	-	48,0 ± 0,1	-
BCA-0	38,6 ± 1,2	-2,7	45,3 ± 0,7	2,4	48,8 ± 0,1	1,5
BCB-0	35,5 ± 0,6	-10,5	45,2 ± 1,7	2,2	47,2 ± 1,2	-1,8
ACA-0	36,4 ± 0,3	-8,2	44,7 ± 0,7	1,0	48,5 ± 0,4	1,0
ACB-0	35,9 ± 0,1	-9,3	44,1 ± 0,3	-0,4	48,6 ± 0,5	1,3
AP-50	30,3 ± 0,9	-23,7	35,5 ± 0,1	-19,8	39,1 ± 0,1	-18,6
BCA-50	30,0 ± 1,0	-1,0	35,0 ± 0,7	-1,4	40,2 ± 0,9	2,7
BCB-50	29,2 ± 1,2	-3,4	34,0 ± 0,8	-4,4	36,9 ± 0,8	-5,6
ACA-50	27,7 ± 0,1	-8,5	33,4 ± 0,9	-5,8	37,8 ± 0,4	-3,3
ACB-50	28,8 ± 0,5	-4,7	35,5 ± 1,3	0,0	38,2 ± 1,6	-2,3

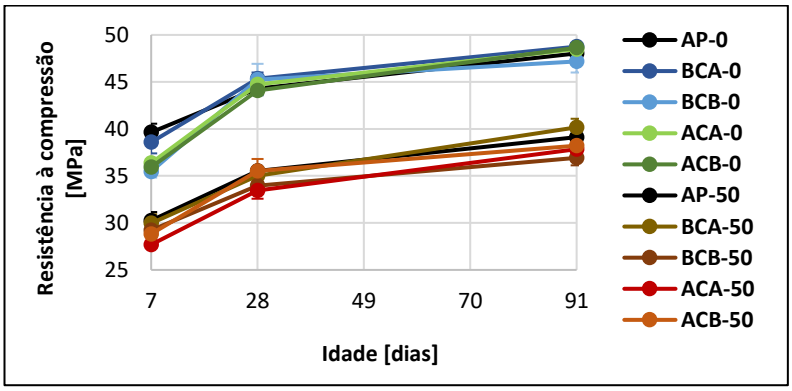


Figura 1 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos vários betões

Quanto aos betões com AN, observou-se que, a 7 dias de idade, comparativamente ao betão AP-0, os betões produzidos com ATT apresentam uma menor resistência à compressão, com reduções compreendidas entre 2,7 e 10,5%. Esta redução deveu-se muito provavelmente à formação de etringite tardia. Segundo Abushanab e Alnahhal (2021), a presença de zinco e sais fosfato na ATT provoca um atraso na hidratação do aluminato tricálcico (C_3A, um dos compostos do cimento), resultando na formação de etringite tardia. A etringite, devido às suas propriedades expansivas, quando formada numa fase tardia, deteriora a estrutura do betão, afectando as suas propriedades mecânicas. A redução da resistência também pode ser atribuída aos sólidos em suspensão e à matéria orgânica (medida pelo carbono orgânico total) na ATT (Asadollahfardi *et al.*, 2016; Abushanab e Alnahhal, 2021), que afectam a estrutura do betão. A 28 dias, os resultados obtidos apontam para uma manutenção da resistência à compressão com a incorporação dos vários tipos de ATT. Os betões apresentaram um desempenho semelhante ao do betão AP-0, com variações, relativamente a este, compreendidas entre -0,4 e +2,4%. A mesma tendência foi observada a 91 dias, apresentado os betões com ATT variações pouco expressivas, compreendidas entre -1,8 e +1,5%, em relação ao betão AP-0. Estes resultados permitiram concluir que a utilização de ATT provoca um atraso nas reacções de hidratação do betão.

No que concerne à diferença entre os betões com AR e ATT e o betão AP-50, a 7 dias, observou-se uma tendência para a manutenção da resistência à compressão com a utilização da água BCA e uma ligeira redução com a utilização das águas BCB, ACA e ACB, sendo esta mais acentuada com a utilização das duas últimas. A 28 dias, enquanto os betões BCA-50 e ACB-50 apresentaram uma resistência similar ao betão AP-50, os betões BCB-50 e ACA-50 apresentaram ligeiras reduções, de 4,4 e 5,8%, respectivamente, em relação ao AP-50. Observou-se as mesmas tendências a 91 dias.

Os resultados obtidos demonstram que a ATT tem uma influência diferente sobre a resistência à compressão dos betões com e sem AR. Em idade precoce, verificou-se que os betões com AN, na sua maioria, foram os mais afectados pela incorporação de ATT. Todavia, com o endurecimento do betão, passaram a ser os betões com AR os mais afectados. Deste modo, foi possível concluir que os compostos orgânicos e inorgânicos contidos na ATT, assim como as partículas sólidas, têm um efeito diferente sobre os betões com e sem AR.

Na Figura 2, é apresentada a relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros, a 91 dias. Constatou-se a existência de uma forte relação linear entre estas propriedades, demonstrada pelo coeficiente de determinação (R^2) obtido (0,92).

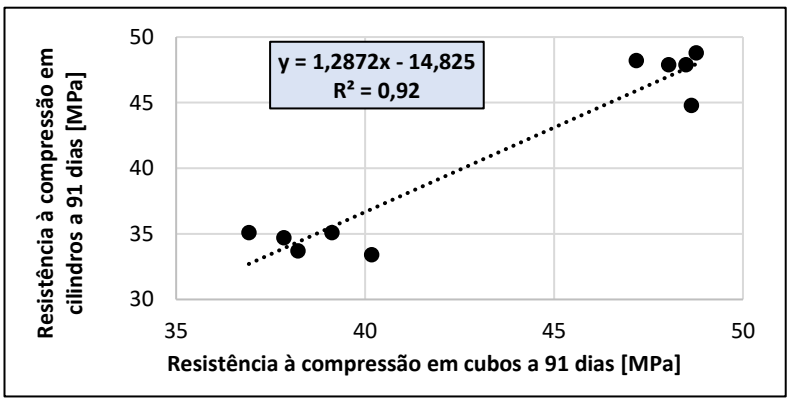


Figura 2 - Relação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros, a 91 dias

3.2.2 Resistência à tracção

Na Figura 3, são apresentados os resultados da resistência à tracção, e também são indicadas as variações relativas aos respectivos betões de referência (AP-0 e AP-50). Nos betões com AN, foi identificada uma tendência para a manutenção desta propriedade com a utilização das águas de Beirolas e ligeiras reduções (inferiores a 0,6 MPa) com a utilização das águas de Alcântara, relativamente ao betão AP-0. Por outro lado, observou-se que os betões produzidos com as águas dos tipos A e B de cada ETAR apresentam uma resistência à tracção semelhante, o que pode ser explicado pela proximidade entre os parâmetros de qualidade destas águas. Estes resultados demonstram que, no que se refere à ATT destas ETARs, a incorporação de águas com um nível de tratamento superior não aumenta significativamente a resistência à tracção do betão com AN.

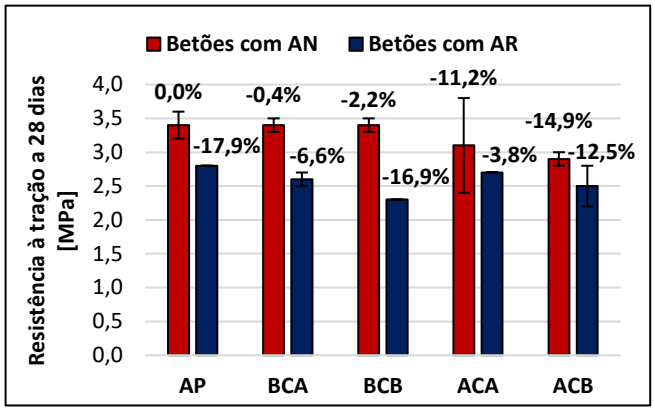


Figura 3 - Resistência à tracção a 28 dias e variações relativas aos betões de referência

Através destes resultados, foi possível perceber a influência negativa da incorporação de AR na resistência à tracção do betão. Como referido por Bravo (2016), a composição destes AR, e o impacte que têm sobre a zona de transição interfacial (ZTI), afectam negativamente o comportamento mecânico do betão. Por outro lado, observou-se que, com a utilização dos AR, há uma diferença mais expressiva entre a resistência à tracção dos betões produzidos com águas do tipo A e B de ambas as ETARs, do que nos betões com AN. Constatou-se que a incorporação de ATT do tipo A resultou em betões com uma resistência à tracção ligeiramente superior à do tipo B. Para as águas de Beirolas, observou-se melhorias de 12,4% e para as de Alcântara melhorias de 9,7%. Deste modo, como ocorrido para resistência à compressão, foi possível concluir que a incorporação de ATT tem um efeito diferente sobre a resistência à tracção de betões com AN e AR.

3.2.3 Módulo de elasticidade

Na Figura 4, são apresentados os resultados do módulo de elasticidade (ME) a 91 dias dos vários betões e são indicadas as variações relativas aos respectivos betões de referência. Os resultados dos betões com AN apontam para uma manutenção do ME com a utilização de ATT. No entanto, observou-se uma diminuição muito ligeira em alguns dos betões. Por sua vez, a incorporação dos AR provocou uma redução do ME, relativamente aos betões com AN, que pode ser atribuída à menor rigidez dos AR face aos AN (Silva *et al.*, 2016). No que concerne à incorporação de ATT e AR, observou-se ligeiras reduções, compreendidas entre

2,0 e 3,4%, relativamente ao betão AP-50.

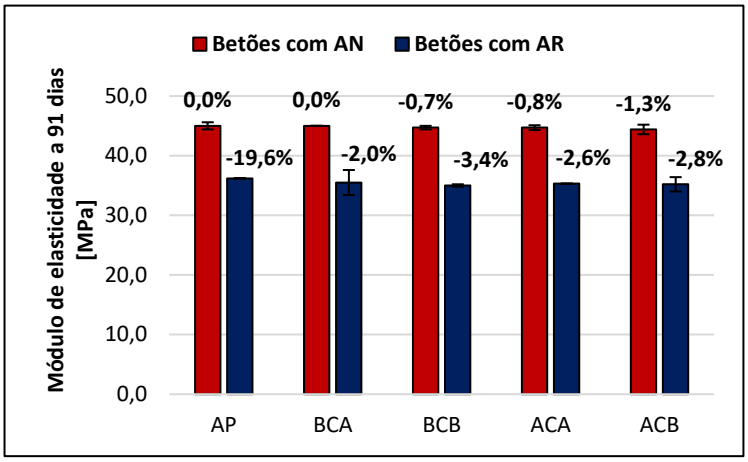


Figura 4 - Módulo de elasticidade a 91 dias e variações relativas aos betões de referência

Os resultados sugerem que a incorporação de ATT não tem um efeito significativo sobre esta propriedade dos betões com e sem AR. Contudo, foi possível constatar que a incorporação de ATT tem um efeito negativo mais acentuado nos betões com AR. Provavelmente, as partículas sólidas presentes na ATT têm um impacte maior sobre a ZTI entre os AR e a matriz cimentícia. Também se verificou uma tendência para os betões com águas do tipo A apresentarem um ME superior ao dos betões com águas do tipo B, tanto para as águas de Beirolas como as de Alcântara. No entanto, salienta-se que as variações obtidas entre estes betões foram sempre muito pouco expressivas, o que pode ser explicado pela similaridade entre os parâmetros de qualidade das respectivas águas.

3.2.4 Velocidade de propagação dos ultra-sons

Na Figura 5, são apresentados os resultados da velocidade de propagação de ultra-sons a 28 dias dos vários betões e são indicadas as variações relativas aos respectivos betões de referência. Observou-se, para os betões com AN e AR, variações pouco expressivas desta propriedade relativamente aos respectivos betões de referência. Portanto, concluiu-se que a incorporação de ATT não tem um efeito relevante sobre esta propriedade e afecta de forma similar os betões com AN e AR.

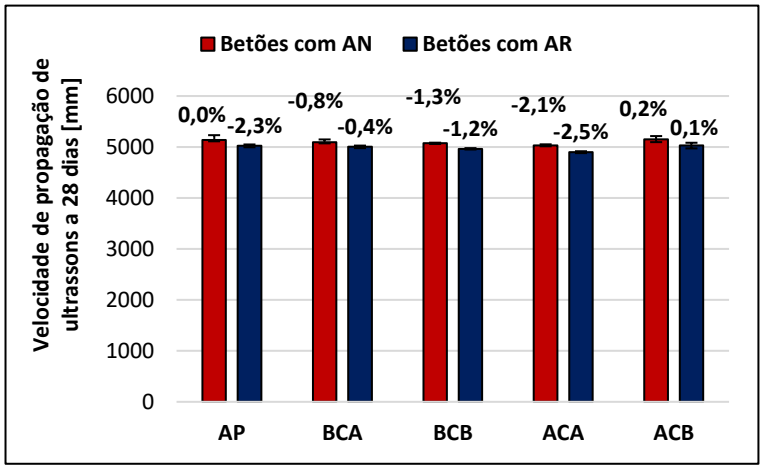


Figura 5 - Velocidade de propagação de ultra-sons a 28 dias e variações relativas aos betões de referência

3.2.5 Absorção de água por imersão

Na Figura 6, são apresentados os resultados da absorção de água por imersão a 28 dias dos vários betões e são indicadas as variações relativas aos respectivos betões de referência. Nos betões com AN, observou-se que, com a incorporação das águas de Alcântara, os betões apresentam uma absorção de água praticamente igual à do betão AP-0. Por sua vez, os betões produzidos com as águas de Beirolas apresentaram ligeiras reduções desta propriedade, relativamente ao AP-0. Por outro lado, constatou-se que os betões produzidos com as águas dos tipos A e B, de ambas as ETARs, exibem um comportamento muito similar. Esta semelhança pode ser atribuída à proximidade entre os valores do carbono orgânico total que as águas de cada ETAR apresentam.

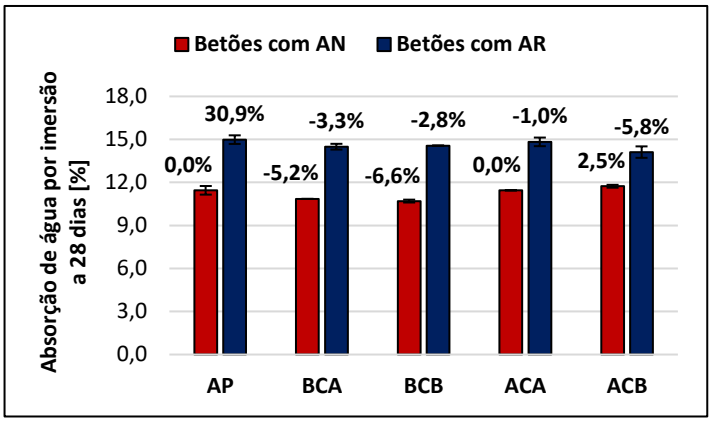


Figura 6 - Absorção de água por imersão a 28 dias e variações relativas aos betões de referência

No que concerne aos betões com AR, como esperado, observou-se um claro aumento da absorção de água por imersão, relativamente aos betões com AN. Este aumento pode ser atribuído à maior absorção de água dos AR face aos AN (Bravo *et al.*, 2015). Contudo, observou-se que a utilização dos vários tipos de ATT provoca uma ligeira redução da absorção de água, relativamente ao betão AP-50. À semelhança dos betões com AN, obteve-se valores muito similares para a absorção de água dos betões, todos compreendidos entre 14,1 e 14,8%. Assim sendo, concluiu-se que a incorporação dos vários tipos de ATT tem um efeito similar sobre os betões com AN e AR.

3.2.6 Resistência à carbonatação

Na Figura 7, são indicados os resultados do ensaio de resistência à carbonatação (profundidade de carbonatação) a 28 dias dos vários betões e as variações relativas aos respectivos betões de referência.

Verificou-se existirem ligeiras reduções da profundidade de carbonatação, nos betões BCA-0, BCB-0 e ACB-0, relativamente ao betão AP-0. Entre as várias águas, a BCA conduziu à menor profundidade de carbonatação (3,4 mm). Segundo Bertolini *et al*. (2004), a carbonatação aumenta com o acréscimo da permeabilidade do betão, pelo que as tendências observadas podem ser explicadas com os resultados da absorção de água dos correspondentes betões. Quanto aos AR, devido à sua maior porosidade face aos AN, a sua incorporação provocou um aumento da profundidade de carbonatação. Por sua vez, comparando os betões com ATT e AR com o betão AP-50, verificou-se que, à semelhança dos betões com AN, há uma tendência para a redução da profundidade de carbonatação com a incorporação de ATT. Novamente, o betão produzido com a água BCA apresentou a menor profundidade de carbonatação (4,7 mm).

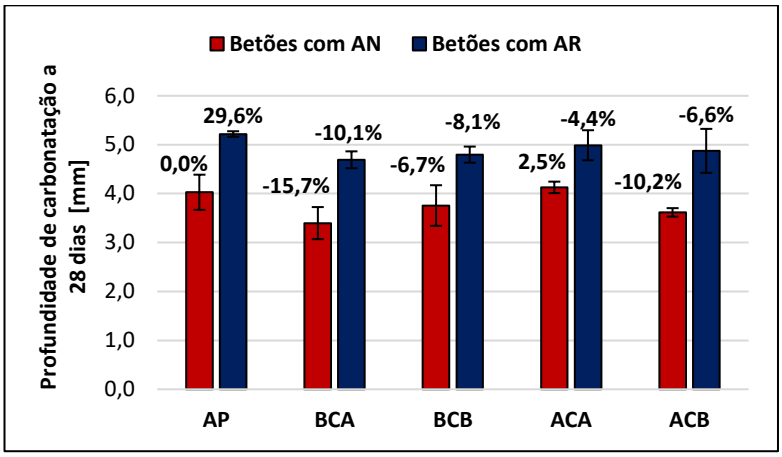


Figura 7 - Profundidade de carbonatação a 28 dias e variações relativas aos betões de referência

Para os betões com e sem AR, não foram identificadas variações significativas entre os betões produzidos com as águas do tipo A e B de cada uma das ETARs. Destaca-se apenas para as águas de Alcântara um incremento da profundidade de carbonatação, de cerca de 14%, do betão ACB-0 para o betão ACA-0. Assim sendo, foi possível concluir que a utilização dos vários tipos de ATT analisados não tem um efeito negativo sobre a resistência à carbonação destes betões.

3.2.7 Resistência à penetração de iões cloreto

Na Figura 8, são indicados os resultados da resistência à penetração de iões cloreto (coeficiente de difusão de iões cloreto, CDIC) a 28 dias dos vários betões e as variações relativas aos respectivos betões de referência. Observou-se que, nos betões com AN, com a utilização das águas BCA, BCB e ACB, há uma ligeira redução no CDIC, indicando um incremento na resistência à penetração de iões cloreto, relativamente ao betão AP-0. De outro modo, a incorporação da água ACA levou à uma ligeira redução na resistência à penetração de iões cloreto, relativamente ao betão AP-0. Esta redução pode ser explicada pela quantidade de cloretos presente na água ACA (393,0 mg/l) ou pela sua condutividade (1292,0 µS/cm).

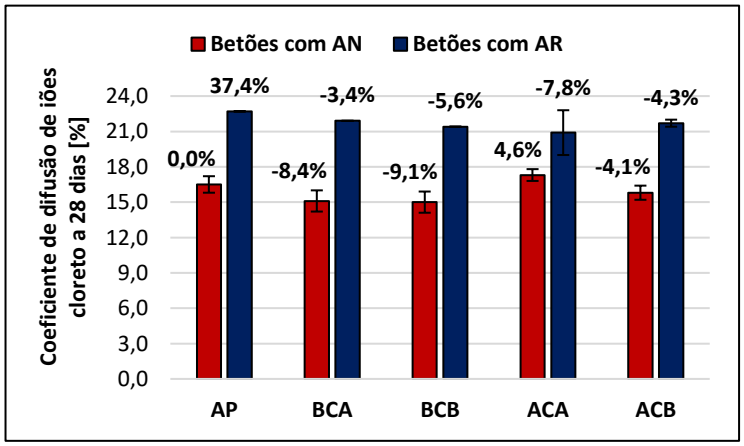


Figura 8 - CDIC a 28 dias e variações relativas aos betões de referência

Também foi possível observar que, devido à natureza permeável dos AR, a sua incorporação teve um efeito negativo sobre esta propriedade. Contudo, comparando o betão AP-0 com os betões produzidos com ATT e AR, constatou-se uma tendência para a diminuição do CDIC, tal como nos betões com AN. Ao contrário do

que era esperado, o betão ACA-50 apresentou o menor CDIC. No entanto, é importante mencionar que este resultado possui uma margem de erro relativamente elevada. Por outro lado, como nos betões com AN, observou-se para os demais betões valores muito similares para o CDIC, com variações pouco expressivas entre si. Deste modo, estes resultados permitem concluir que, de uma forma geral, a ATT tem uma influência similar nos betões com AN e AR.

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE ÁGUA RESIDUAL APÓS TRATAMENTO SECUNDÁRIO E TERCIÁRIO

Na Tabela 5, é apresentada a comparação entre as propriedades do betão fresco dos betões com ATT e ATS. Os resultados obtidos revelaram que não há variações expressivas entre os resultados dos betões com ATS e ATT.

Tabela 5 - Comparação entre as propriedades do betão fresco dos betões com ATT e ATS

Tipo de água		AP	BCA	BCB	BCS	ACA	ACB	ACS
Abaixamento [mm]	**AN**	172	177	169	180	183	175	172
	AR	164	150	165	175	150	160	173
Variação da massa volúmica relativamente aos betões AP-0 e AP-50 [%]	**AN**	2320,5 kg/m³	0,3	0,4	0,9	-0,1	-0,1	1,1
	AR	2243,1 kg/m³	-0,5	0,3	0,9	-0,1	-0,5	-1,3

Na Tabela 6, é apresentada a comparação entre as propriedades do betão endurecido dos betões com ATT e ATS. No que concerne ao comportamento mecânico, para a utilização das águas de ambas as ETARs, observou-se variações similares nos betões com ATT e ATS. Todavia, na resistência à tracção, observou-se reduções ligeiramente mais acentuadas nos betões com ATS. Contudo, em termos absolutos, estas variações foram sempre inferiores a 0,2 MPa. Quanto ao comportamento em termos de durabilidade, apesar de não se verificar variações significativas na absorção de água, notou-se para todos os casos uma tendência para a diminuição da resistência à carbonatação e à penetração de iões cloreto nos betões com ATS, relativamente aos com ATT.

Tabela 6 - Comparação entre as propriedades do betão endurecido dos betões com ATT e ATS

Tipo de água	**Variação da resistência à compressão a 28 dias [%]**		**Variação da resistência à tracção a 28 dias [%]**		**Variação do módulo de elasticidade a 28 dias [%]**		**Variação da absorção de água por imersão a 28 dias [%]**		**Variação da profundidade de carbonatação a 28 dias [%]**		**Variação do coeficiente de difusão de iões cloreto [%]**	
	AP-0	**AP-50**	**AP-0**	**AP-50**	**AP-0**	**AP-50**	**AP-0**	**AP-50**	**AP-0**	**AP-50**	**AP-0**	**AP-50**
AP	44,3 MPa	35,5 MPa	3,4 MPa	2,8 MPa	45,0 GPa	36,2 GPa	11,5%	15,0%	4,0 mm	5,2 mm	16,5 x 10^{-12} m^2/s	22,7 x 10^{-12} m^2/s
BCA	2,4	-1,4	-0,4	-6,6	0,0	-2,0	-5,2	-3,3	-15,7	-10,1	-8,4	-3,4
BCB	2,2	-4,4	-2,2	-16,9	-0,7	-3,4	-6,6	-2,8	-6,7	-8,1	-9,1	-5,6
BCS	-0,2	0,5	-7,6	-20,4	-2,1	-1,0	0,2	-6,0	6,5	11,3	6,8	-4,5
ACA	1,0	-5,8	-11,2	-3,8	-0,8	-2,6	0,0	-1,0	2,5	-4,4	4,6	-7,8
ACB	-0,4	0,0	-14,9	-12,5	-1,3	-2,8	2,5	-5,8	-10,2	-6,6	-4,1	-4,3
ACS	-2,4	1,4	-36,6	-25,7	0,1	-4,4	1,7	-2,7	3,7	10,8	45,4	0,2

4 CONCLUSÕES

A presente investigação visou estudar o efeito da incorporação de ATT em betões produzidos com AN e com 50% de AGR.

Em síntese, para os betões com AN, tendo em conta o seu comportamento global, concluiu-se que as

águas provenientes da ETAR de Beirolas são as que demonstram um maior potencial de aplicação. Por sua vez, os resultados obtidos revelaram que a utilização de ATT sujeita a níveis de tratamento superior não se traduz numa melhoria significativa do comportamento do betão. Adicionalmente, os resultados obtidos com a utilização das águas da ETAR de Alcântara mostraram que, mesmo possuindo a mesma proveniência, o tipo de tratamento adoptado pode alterar as características da água tornando-a menos adequada para a produção de betão. No que se refere à utilização de AR, observou-se que incorporação de ATT tem um efeito ligeiramente diferente sobre o betão com e sem AR, sobretudo ao nível do desempenho mecânico. Não obstante, à semelhança dos betões com AN, não houve melhorias muito significativas com a utilização da água sujeita a um nível de tratamento superior. Por fim, no que concerne à ATS, foi possível concluir que a sua incorporação tem um efeito negativo mais notável no comportamento em termos de durabilidade do betão, tanto nos betões com AN como nos com AR.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Abushanab, A. e Alnahhal, W. (2021). *Combined effects of treated domestic wastewater, fly ash, and calcium nitrite toward concrete sustainability*. Journal of Building Engineering, 44, 16 p. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103240

Asadollahfardi G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V. e Ghonabadi, N. (2016). *Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete*. Construction and Building Materials, 105, pp. 253-261. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.039

Atakan V., Jain J., Ravikumar D., McCandlish, L. e DeCristofaro, N. (2016). *Technologies that reduce water use in cement and concrete help global industry address mounting concerns of water scarcity*. Masterbuilder. Disponível em <https://assets.ctfassets.net/jv4d7wct8mc0/5u5Kg441tfr7cn9ZcTsE2w/a5000d45e215f576656cafd80fecd753/Masterbuilder_-_Technologies_that_Reduce_Water_use_in_Cement_and_Concrete.pdf>. Visitado pela última vez em 26 de Outubro de 2023.

Bravo, M. (2016). Desempenho de betões produzidos com agregados reciclados obtidos a partir de RCD de centrais de reciclagem portuguesas. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. 391 p.

Bravo, M., Brito, J. de, Pontes, J., e Evangelista, L. (2015). *Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants*. Construction and Building Materials, 77, pp. 357-369. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103

Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P. e Polder, R. (2004). *Corrosion of steel in concrete - Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VHC, ISBN 9783527603374, 380 p.

Especificação LNEC E391 (1993). Betões: Determinação da resistência à carbonatação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2 p.

Especificação LNEC E394 (1993). Betões: Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. LNEC, Lisboa, Portugal, 2 p.

Especificação LNEC E397 (1993). Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC, Lisboa, Portugal, 2 p.

Especificação LNEC E463 (2004). Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC, Lisboa, Portugal, 8 p.

NP EN 1097-2 (2000). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 36 p.

NP EN 1097-3 (2003). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: determinação da baridade e do volume de vazios. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 16 p.

NP EN 1097-6 (2003). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 33 p.

NP EN 12350-2 (2002). Ensaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 11 p.

NP EN 12350-6 (2002). Ensaios do betão fresco. Parte 6: massa volúmica. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 13 p.

NP EN 12390-3 (2009). Ensaios do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 21 p.

NP EN 12390-6 (2003). Ensaios de betão endurecido. Parte 6: resistência à tracção por compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 14 p.

NP EN 12504-4 (2007). Ensaios de betão nas estruturas. Parte 4: determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 18 p.

NP EN 933-2 (1999). Ensaios para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 7 p.

ONU (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of results.* 2022 Edition, United Nations, ISBN 978-92-1-148373-4, 52 p.

Silva, R., Brito, J. de e Dhir, R. (2016). *Establishing a relationship between the modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 112, pp. 2171-2186. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DE BETÕES CORRENTES E COM AGREGADOS RECICLADOS PRODUZIDOS COM ÁGUA RESIDUAL TRATADA

João Morgado [a]; Jorge de Brito [b]; Miguel Bravo [c]

[a] IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.m.morgado@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

[c] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, miguelnbravo@gmail.com

RESUMO

A presente investigação tem como objectivo analisar a viabilidade de utilizar águas residuais tratadas como substituto da água potável na produção de betões correntes e de betões com 50% de agregados reciclados. Desta forma, foi avaliado o desempenho mecânico e de durabilidade de betões com águas residuais tratadas, face a betões com água potável.

Devido ao crescente problema da escassez de água potável em todo o mundo e à elevada procura de água potável na produção de betão, a água residual tratada surge como uma alternativa adequada e sustentável. Nesta investigação, foi avaliado o efeito da utilização de águas residuais tratadas na composição de betão com agregados naturais e reciclados. A primeira composição inclui apenas agregados naturais, enquanto a segunda inclui 50% de agregados grossos naturais e 50% de agregados grossos reciclados. Em ambas, as taxas de substituição das águas residuais tratadas foram de 0, 50 e 100%.

Constatou-se que a utilização de águas residuais tratadas na composição não afectou o comportamento mecânico da maioria das propriedades, com excepção da resistência à tracção, que pode ser reduzida, dependendo da qualidade das águas residuais tratadas. Em termos de durabilidade do betão, verificou-se que tanto a absorção por imersão como a resistência à carbonatação não foram influenciadas pela utilização de águas residuais tratadas. No entanto, verifica-se que a resistência à penetração de cloretos parece diminuir em função da qualidade das águas residuais tratadas.

Palavras-chave: betão, água residual tratada, comportamento mecânico, durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A escassez global de água está a afectar actualmente aproximadamente metade da população mundial, conforme indicam dados das Nações Unidas (ONU). Esta fonte prevê também que a população global atingirá cerca de 10 mil milhões de pessoas até 2050. Um crescimento populacional tão significativo implica um aumento generalizado no consumo industrial e doméstico, o que intensifica significativamente a pegada ecológica e, consequentemente, o stress hídrico. A indústria da construção produz anualmente cerca de 30 mil milhões de toneladas de betão (Monteiro et al., 2017), com Miller et al. (2018) a reportar o uso de 16,6 × 10^6 metros cúbicos de água potável na produção de betão. Estes factos destacam a necessidade de encontrar soluções para mitigar o impacte ambiental causado por este sector. Ao longo das últimas décadas, várias alternativas ambientalmente sustentáveis têm sido estudadas, e esta dissertação insere-se nesse âmbito temático. Como alternativa ao uso de água potável (AP) na produção de betão, sugere-se o uso de águas residuais tratadas (ART), e simultaneamente, está em investigação a substituição de agregado natural (AN) por agregado reciclado (AR). O objectivo é avaliar o desempenho mecânico e de durabilidade do betão com ART e explorar a possibilidade de utilizar betão com estas águas. Assim, esta investigação procura estudar o desempenho mecânico e de durabilidade do betão com agregados naturais e do betão com 50% de agregados grossos reciclados, produzidos com ART.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS E NORMAS

A Tabela 1 apresenta as características definidas para o betão de referência.

Tabela 1 - Características do betão de referência

Classe de resistência	C30/37
Classe de exposição ambiental	XC3
Classe de consistência	S4 (150 *mm* a 190 *mm*)
Máxima dimensão dos agregados	22,4 *mm*

Foram utilizados três tipos de água na composição do betão: água potável da rede pública, água residual tratada proveniente da estação de tratamento de Alcântara e água residual tratada proveniente da estação de tratamento de Beirolas. Os agregados finos naturais utilizados foram areia fina (0.125/1 mm) e areia grossa (0.125/4 mm). Os agregados grossos naturais utilizados foram brita 1 (9.5/19 mm) e brita 2 (19/22.4 mm). Os agregados grossos reciclados são provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), recolhidos de uma central de reciclagem de RCD (4/22.4 mm). Os principais constituintes dos agregados reciclados são resíduos de betão (76.5%) e materiais cerâmicos (19.3%). Para manter a trabalhabilidade constante em todas as misturas, a absorção de água dos agregados reciclados após 10 minutos (9.5%) foi determinada, de forma a ajustar a relação água/cimento total das misturas com agregados reciclados. A Tabela 2 apresenta as características físicas dos agregados. O ligante utilizado foi cimento Portland tipo CEM I 42.5 R da SECIL, e foi utilizado um superplastificante SikaPlast 717 da SIKA.

A Tabela 3 apresenta os testes realizados ao betão nos estados fresco e endurecido, juntamente com as normas correspondentes, para avaliar o efeito do uso de águas residuais tratadas na composição do betão, em termos de resistência mecânica e desempenho de durabilidade.

Tabela 2 - Características físicas dos agregados

Propriedades físicas	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	Agregados reciclados
Densidade de partículas secas (kg/m^3)	2583	2581	2609	2599	1977
Absorção de água (%)	0.3	0.7	1.3	1.5	11.0
Baridade (kg/m^3)	1530	1540	1350	1360	1250
Desgaste de *Los Angeles* (%)	-	-	26.5	27.8	46.0

Tabela 3 - Normas seguidas nos ensaios realizados ao betão

Ensaios aos agregados	
Análise granulométrica	NP EN 933-2 (1999)
Módulo de elasticidade	NP EN 1097-6 (2003)
Baridade	NP EN 1097-3 (2003)
Desgaste de *Los Angeles*	LNEC E-237 (1970)
Análise da composição	-
Ensaios no estado fresco	
Abaixamento do cone de *Abrams*	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica	NP EN 12350-6 (2002)
Ensaios no estado endurecido	
Resistência à compressão em cubos	NP EN 12390-3 (2011)
Resistência à compressão em cilindros	NP EN 12390-3 (2011)
Resistência à tracção	NP EN 12390-6 (2011)
Velocidade de propagação de ultra-sons	NP EN 12504-4 (2007)
Módulo de elasticidade	LNEC E 397 (1993)
Absorção de água por imersão	LNEC E394 (1993)
Resistência à carbonatação	LNEC E391 (1993)
Resistência à penetração de iões cloreto	LNEC E463 (2004)

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Os betões foram formulados com a finalidade de manter consistência uniforme, com um intervalo de abaixamento entre 170±20 mm, mantendo-se essa premissa em todos os betões, incluindo os de controlo (BC e BC-50). A introdução da ART proveniente das estações de tratamento de águas residuais em Beirolas e Alcântara não mostra ter uma influência expressiva na trabalhabilidade do betão, quer se utilizasse AN quer AR. No que diz respeito à massa volúmica, variando entre 2317,2 e 2340,5 kg/m³ para betões com AN e entre 2223,8 e 2262,4 kg/m³ para betões com AR, observou-se que a introdução de diferentes ART não teve um efeito substancial nessa propriedade, sugerindo uma semelhança de massa volúmica entre a ART e a água potável (AP) utilizada no betão de controlo.

3.2 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Resistência à compressão em cubos

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão a 7, 28 e 91 dias. Também

é apresentada a variação entre os respectivos betões de controlo e os betões produzidos com ART.

Tabela 4 - Resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias

Resistência	7 DIAS [MPa]	Δ_{RC}^{7} / Δ_{RC-50}^{7}	28 DIAS [MPa]	$\Delta_{RC}^{28}/\Delta_{RC-50}^{28}$	91 DIAS [MPa]	$\Delta_{RC}^{91}/\Delta_{RC-50}^{91}$
BC	39.6 ± 0.9	-	44.3 ± 0.7	-	48.0 ± 0.1	-
B50	37.1 ± 0.5	-6%	44.7 ± 2.7	1%	47.6 ± 1.0	-1%
A50	36.7 ± 0.6	-7%	43.0 ± 0.3	-3%	47.5 ± 0.3	-1%
B100	35.1 ± 0.5	-11%	44.2 ± 1.1	0%	49.7 ± 0.3	3%
A100	36.1 ± 0.8	-9%	43.2 ± 1.0	-2%	48.4 ± 1.3	1%
BC-50	30.3 ± 0.9	-	35.5 ± 0.1	-	39.1 ± 0.1	-
B50-50	29.2 ± 0.1	-4%	35.0 ± 0.6	-1%	37.9 ± 0.0	-3%
A50-50	29.0 ± 0.2	-4%	34.5 ± 1.1	-3%	38.5 ± 0.3	-2%
B100-50	29.7 ± 0.1	-2%	35.7 ± 0.5	0%	38.0 ± 1.0	-3%
A100-50	29.3 ± 1.0	-3%	36.0 ± 0.4	1%	39.8 ± 0.0	2%

A tabela mostra a evolução da resistência do betão em idades precoces, observando-se um aumento significativo nos primeiros 7 dias, como esperado. No entanto, foi observado que, a 7 dias de idade, as misturas com ART revelam uma ligeira redução na resistência à compressão que não é observada a 28 ou 91 dias. Vale realçar que Abushanab e Alnahhal (2021) relataram que a presença de zinco e fosfato na ART retarda os processos de hidratação da pasta de cimento. Conforme visto nos resultados das propriedades da água, a ART apresenta valores elevados de condutividade, sugerindo uma alta presença de sais e minerais. Deste modo, é sugerido que os sais e minerais na ART podem ter sido responsáveis por retardar as reacções de hidratação da pasta de cimento a 7 dias.

Em relação ao impacte da incorporação de 50% de AR em comparação com misturas com AN, há uma redução média na resistência à compressão de 25%, 20% e 19% a 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Bravo et al. (2015b) ao incorporar 50% de AR. Essa redução pode ser atribuída à composição dos AR, que contém cerca de 20% de material cerâmico com alta absorção de água, baixa densidade e menor módulo de elasticidade e resistência ao desgaste em comparação com AN. Esse material não apenas dificulta as reacções de hidratação ao absorver água essencial, mas também leva a uma resistência à compressão significativamente menor do que à do betão com AN. A necessidade de aumentar a relação água-cimento total para compensar a alta absorção de água de AR pode ter afectado negativamente a resistência à compressão.

3.2.2 Resistência à compressão em cilindros

A Figura 1 mostra os resultados de resistência à compressão em cilindros a 91 dias para (a) misturas com AN (agregado natural) e (b) misturas com 50% de AR (agregado reciclado). Observou-se uma redução na resistência à compressão ao incorporar ART (água residual tratada) em ambas as composições. Para misturas com 100% de AN, a incorporação de 50% de ART resultou em reduções variando de 5% a 10%, enquanto a de 100% de ART levou a reduções de 6% a 12%. O impacte da ART nas misturas com 50% de AR variou de 5% a 6% para incorporação de 50% de ART e de 9% a 13% para as misturas com 100% de ART, confirmando a tendência observada nas misturas com AN.

Além disso, a incorporação de 50% de AR causou uma redução significativa na resistência à compressão em cilindros em comparação com as misturas de controlo, variando de 24% a 29%. Isso indicou reduções de cerca de 25% na resistência. Notavelmente, houve uma correlação entre o aumento da incorporação de ART e a diminuição da resistência à compressão em cilindros. Essa tendência não foi observada nos testes de resistência à compressão a 91 dias em cubos, onde a incorporação de ART não teve influência nos resultados.

Por fim, foi feita uma análise da relação entre os resultados de resistência à compressão em cilindros e cubos a 91 dias. A maioria das misturas mostrou uma relação mais alta entre as duas propriedades em comparação com o que foi proposto pelo CEB-FIP. As misturas de controlo para cada composição apresentaram relações superiores nos resultados obtidos. Em geral, o estudo revelou que a resistência à compressão em cilindros para misturas produzidas com ART é superior àquela definida pelo CEB-FIP (1978).

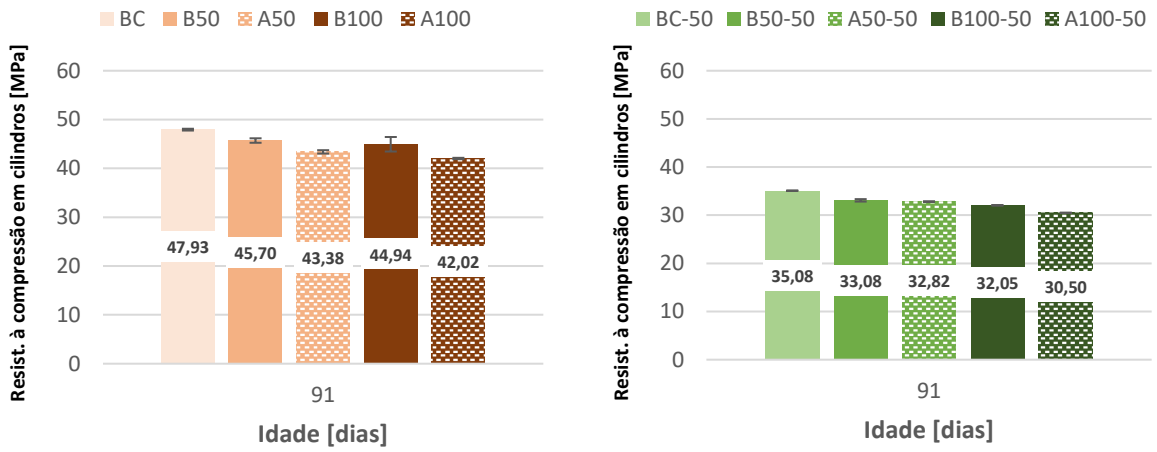
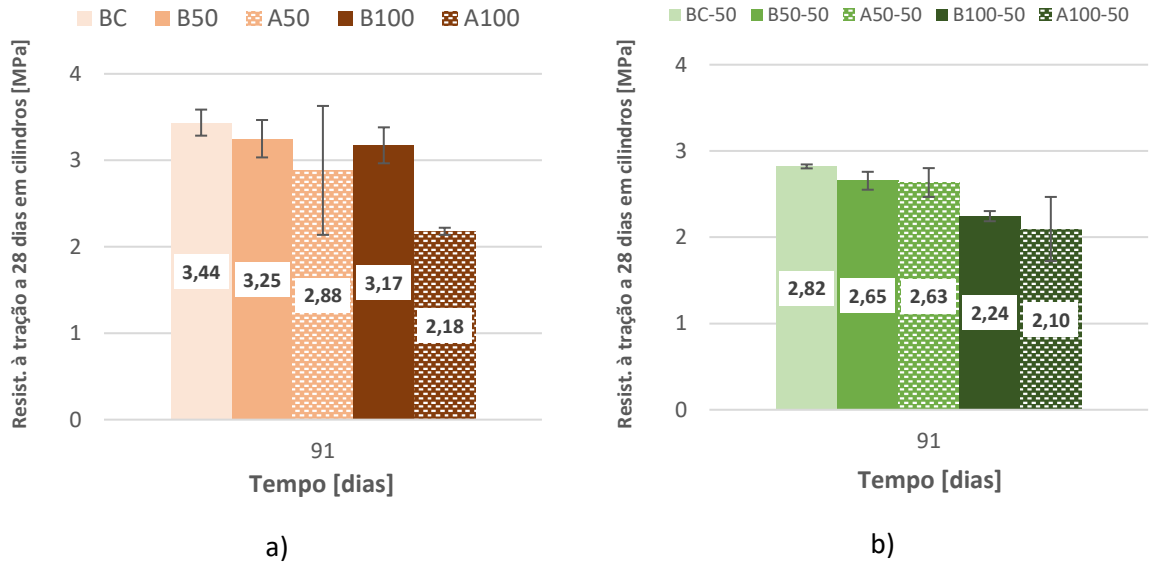


Figura 1 - Resistência à compressão em cilindros a 91 dias

3.2.3 Resistência à tracção

A Figura 2 mostra os resultados para a resistência à tracção a 28 dias para (a) misturas com AN e (b) misturas com 50% de AR.



a) b)

Figura 2 - Resistência à tracção a 91 dias em cilindros para a) betões com 100% AN e b) betões com 50% de AR

Esses resultados mostram que a incorporação de ART resultou em uma perda de resistência à tracção que, para as misturas com ART (Alcântara - A), foi ainda mais impactante do que nas misturas com ART (Beirolas - B). A ART (A) também contém uma quantidade muito maior de partículas sólidas totais do que a ART (B). Conclui-se que a presença de partículas sólidas afecta a zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e os agregados, sugerindo que maiores quantidades de partículas sólidas

levam a maiores perdas na resistência à tracção. Observa-se que as misturas com ART (B) tendem a apresentar resultados melhores do que aquelas com ART (A), como visto para diversas propriedades.

3.2.4 Velocidade de propagação de ultra-sons

A Figura 3 apresenta os resultados da velocidade de propagação ultra-sónico a 28 dias obtidos para (a) misturas com AN e (b) misturas com 50% de AR. Observa-se que a incorporação de ART não influencia nos resultados obtidos em ambas as composições. Em relação à incorporação de 50% de AR, foi observada uma leve influência nos resultados obtidos, como esperado.

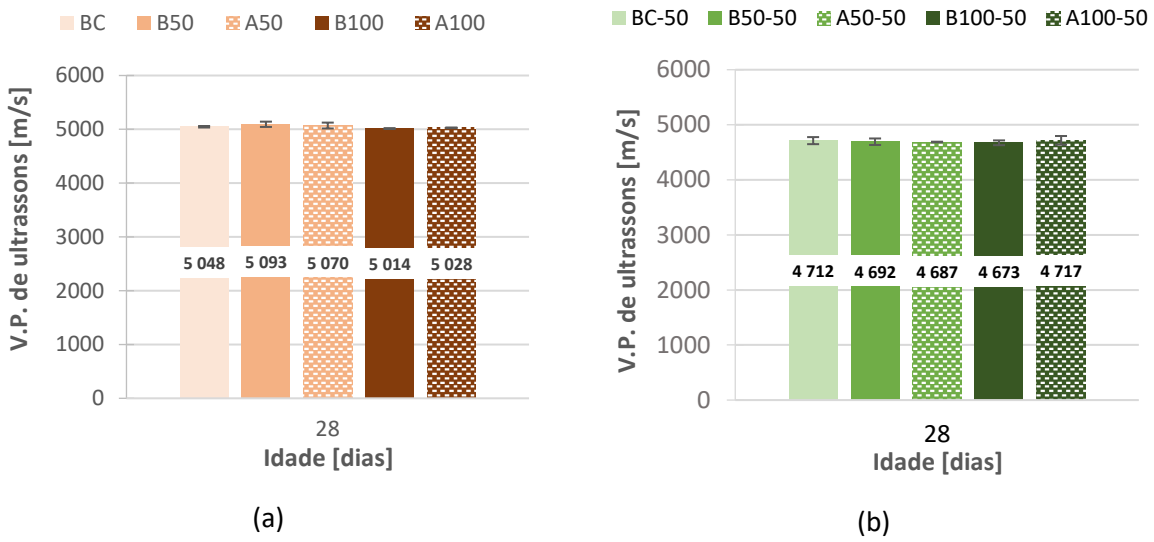


Figura 3 - Variação da velocidade de propagação de ultra-sons em betões com ART e (a) com 100% de AN e (b) com 50% de AR

3.2.5 Módulo de elasticidade

A Tabela 5 apresenta os resultados do módulo de elasticidade a 91 dias para todos os betões testados.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade

Referência	Média [GPa]	D.P.	Δ_{BC}
BC	45,0	0,6	-
B50	44,2	0,0	-2%
A50	43,1	1,6	-4%
B100	44,1	0,7	-2%
A100	45,0	0,2	0%
BC-50	36,2	0,0	-19%
B50-50	35,8	0,0	-20%
A50-50	35,5	0,0	-21%
B100-50	35,9	0,7	-20%
A100-50	34,6	0,0	-23%

Observa-se que, em ambas as composições, a incorporação de ART não influenciou essa propriedade, sendo também notado que os resultados para os betões com ambas as ART foram muito semelhantes. No entanto, a ART (B) mostra resultados melhores mais uma vez. A incorporação de 50% de AR tem um impacte significativo nesta propriedade, uma vez que o próprio AR possui um módulo de elasticidade menor, em comparação com AN. A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência

à compressão em cubos foi analisada e comparada com os valores propostos no Eurocódigo 2. Observa-se que, para todas as misturas testadas, a relação entre essas propriedades é maior do que a sugerida no Eurocódigo 2.

3.2.6 Absorção de água por imersão

A Figura 4 mostra os resultados de absorção de água a 28 dias. Conclui-se que a incorporação de ART não afecta essa propriedade e também foi observado que, em misturas com 50% de AR, adicionar ART à composição diminuiu ligeiramente a absorção de água, em comparação com o BC-50. Asadollahfardi et al. (2016) também concluíram que a adição de ART não afectou os resultados dessa propriedade. O impacte da incorporação de 50% de AR é considerado significativo e é atribuído à porosidade de AR. O facto de AR também ter uma elevada quantidade de materiais cerâmicos contribui para o aumento da absorção de água.

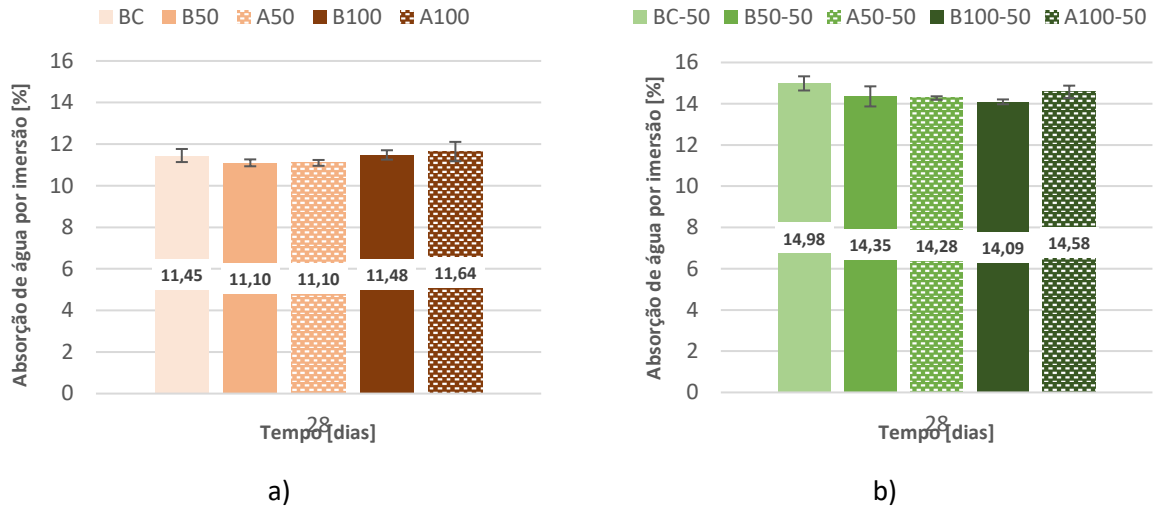


Figura 4 - Absorção de água por imersão a 28 dias dos betões a) com 100% AN e b) com 50% de AR

3.2.7 Resistência à carbonatação

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos testes de resistência à carbonatação a 28 e 56 dias. Conclui-se que a incorporação de ART aumenta a profundidade de carbonatação. A incorporação de 50% de ART não afecta significativamente essa propriedade em misturas com 100% de AN. No entanto, em misturas com 50% de AR, a incorporação de 50% de ART afecta significativamente a profundidade de carbonatação. A incorporação de 100% de ART apresenta um ligeiro aumento na profundidade de carbonatação em comparação com as misturas com 50% de ART, excepto para a profundidade de carbonatação a 56 dias em misturas com 100% de AN.

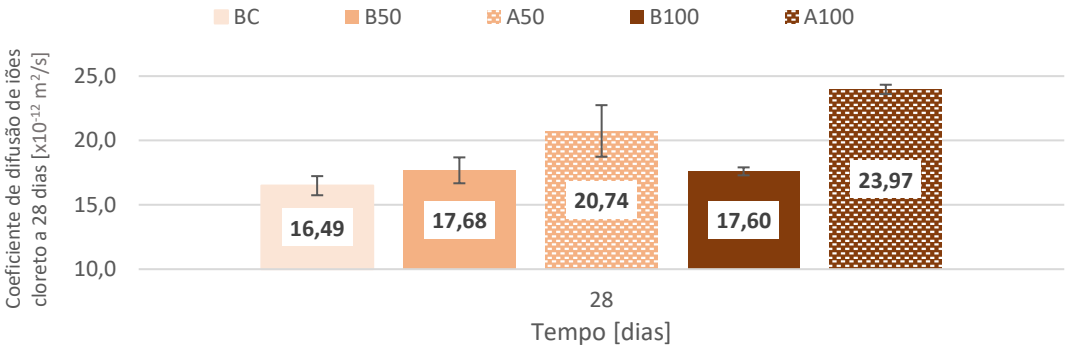
A incorporação de 50% de AR mostrou ser muito prejudicial para a profundidade de carbonatação, resultando em um aumento na faixa de 30% a 50% em comparação com o controlo de referência com 100% de AN.

Tabela 6 - Profundidade de carbonatação a 28 e 56 dias

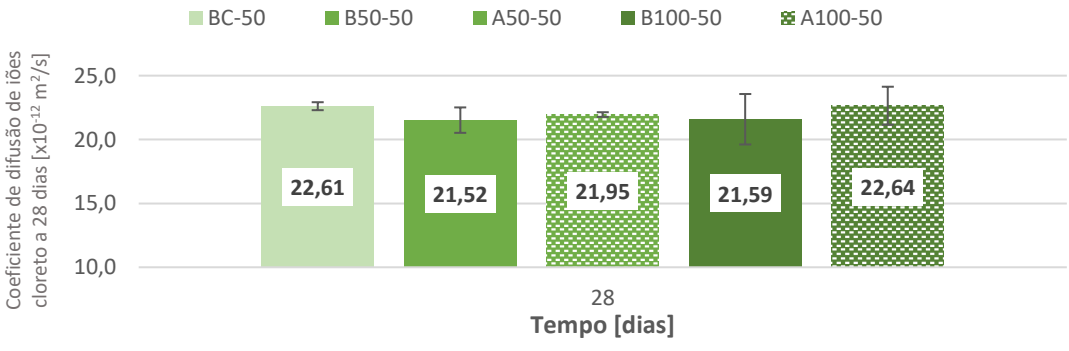
Referência	Profundidade de carbonatação a 28 dias [mm]	Δ_{BC}^{28}	Profundidade de carbonatação a 56 dias [mm]	Δ_{BC}^{56}
BC	4,0 ± 0,4	-	5,0 ± 0,1	-
B50	4,1 ± 0,4	2%	5,0 ± 0,1	0%
A50	4,2 ± 0,8	3%	5,3 ± 0,1	6%
B100	4,3 ± 0,5	6%	6,6 ± 0,4	33%
A100	4,2 ± 0,8	4%	6,8 ± 0,4	37%
BC-50	5,2 ± 0,6	30%	7,4 ± 0,2	49%
B50-50	5,9 ± 0,4	46%	7,7 ± 0,7	55%
A50-50	5,7 ± 0,8	42%	7,6 ± 1,0	52%
B100-50	5,8 ± 0,6	44%	8,1 ± 0,7	63%
A100-50	5,8 ± 0,5	44%	7,7 ± 1,2	54%

3.2.8 Resistência à penetração de iões cloreto

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no teste de migração de cloretos a 28 dias para (a) misturas com AN e (b) misturas com 50% de AR.



a)



b)

Figura 5 - Coeficiente de difusão de iões cloreto a 28 dias em betões a) com 100% de AN e b) com 50% de AR

Observa-se uma clara divergência entre os resultados obtidos para misturas com AN e para aquelas com AR. Em misturas apenas com AN, a incorporação de ART foi, em alguns casos, muito prejudicial a essa propriedade, e concluiu-se que as misturas com ART (A) são muito mais influenciadas do que aquelas com ART (B). Isso também é apoiado pelas propriedades químicas da ART, uma vez que foi

observado que a ART (A) tem uma concentração muito maior de cloretos do que a ART (B). A incorporação de 50% de AR tem um impacte significativo nesta propriedade, com diminuições registradas de até 40% na resistência aos iões de cloreto.

4 CONCLUSÕES

Em resumo, a caracterização da ART revelou que os valores de pH atendiam aos padrões para a produção de betão, enquanto a ART de Alcântara apresentava condutividade eléctrica significativamente mais alta do que a ART de Beirolas, que, por sua vez, excedia a da água potável. As concentrações totais de sólidos suspensos foram mais altas na ART de Alcântara, seguida pela ART de Beirolas e pela água potável. Quanto aos agregados, AR tinha menor densidade, maior absorção de água, menor densidade e maior desgaste em comparação com AN. AR consistia em 77% de resíduos de betão e 20% de materiais cerâmicos. Nos testes de betão fresco, a trabalhabilidade permaneceu inalterada pela incorporação parcial ou total de ART em ambas as composições de AN e 50% AR. No entanto, 50% de incorporação de AR levou a uma ligeira redução na trabalhabilidade. A incorporação de ART não afectou a densidade a granel das misturas, mas 50% de incorporação de AR reduziu ligeiramente a densidade a granel.

Em relação às propriedades mecânicas, a resistência à compressão de cubos a 7 dias foi ligeiramente menor para o betão com ART, indicando uma hidratação retardada nas misturas com ART em comparação com as misturas de controlo. No entanto, a 28 e 91 dias, o betão com ART exibiu resistência à compressão semelhante. No betão com 50% de AR, a resistência à compressão dos cubos foi consistentemente menor do que a do betão com AN. A resistência à compressão em cilindros foi ligeiramente afectada pela incorporação de ART, com uma correlação entre a redução na resistência do cilindro e o aumento da substituição de água potável por ART. A incorporação de 50% de AR causou reduções significativas na resistência à compressão do cilindro. A resistência à tracção foi mais afectada pela ART, com a ART de Beirolas levando a pequenas reduções e a ART de Alcântara causando reduções substanciais. No betão com 50% de AR, a resistência à tracção foi significativamente reduzida. A velocidade de propagação ultra-sónica não foi afectada pela incorporação de ART, enquanto 50% de AR teve um leve impacte. Os resultados do módulo de elasticidade não foram influenciados pela ART, mas 50% de AR levou a uma redução significativa.

Quanto ao desempenho da durabilidade, a ART não teve influência significativa na absorção de água por imersão em ambas as composições. No entanto, a incorporação de 50% de AR aumentou a absorção. A ART teve um efeito limitado na profundidade de carbonatação a 28 dias, mas a 56 dias, os betões A100 e B100 apresentaram um aumento substancial na profundidade de carbonatação. Por outro lado, a incorporação de 50% de AR levou a um aumento significativo na profundidade de carbonatação. Os valores do coeficiente de difusão de iões de cloreto diminuíram ligeiramente para o betão com ART de Beirolas, mas aumentaram significativamente para o betão com ART de Alcântara. No betão com 50% de AR, os coeficientes de difusão de iões de cloreto também aumentaram significativamente.

Conclui-se que o uso de ART na produção de betão é viável, dependendo da qualidade da ART em questão. As principais preocupações dessa incorporação estão relacionadas com a resistência à tracção e a resistência aos iões de cloreto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Abushanab, A., Alnahhal, W. (2021) "Combined effects of treated domestic wastewater, fly ash, and calcium nitrite toward concrete sustainability." Journal of Building Engineering, v. 44.

Asadollahfardi, G., Delnavaz, M., Rashnoiee, V., Fazeli, A., Gonabadi, N. (2016) - "Dataset of producing and curing concrete using domestic treated wastewater." Data in Brief, v.6, pp. 316-325.

Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015b) - "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." Journal of Cleaner Production, v. 99, pp. 59-74.

Cabral, A. E. B. (2013) - "Concrete with construction and demolition wastes (CDW)". Eco-Efficient Concrete. Woodhead Publishing Limited, pp. 340-367.

CEB-FIP (1978) - "Model code for concrete structures". Comité Euro-international du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte, 3rd edition.

LNEC E 394 (1993) - "Betões: Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica". LNEC, Lisbon, Portugal.

LNEC E 397 (1993) - "Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão". LNEC, Lisbon, Portugal.

Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018) - "Impacts of booming concrete production on water resources worldwide." Nature Sustainability, v. 1, n. 1, pp. 69-76.

Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). "Towards sustainable concrete." Nature Materials, v.16, n.7, pp. 698-699

NP EN 1097-2 (2000) - "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 36 p.

NP EN 1097-3 (2003) - "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: determinação da baridade e do volume de vazios". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 16 p.

NP EN 1097-6 (2003) - "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 33 p.

NP EN 12350-2 (2002) - "Ensaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12350-6 (2002) - "Ensaios do betão fresco. Parte 6: massa volúmica". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 13 p.

NP EN 12390-1 (2003) - "Ensaios do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12390-2 (2003) - "Ensaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12390-3 (2009) - "Ensaios do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão de provetes". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 21 p.

NP EN 12390-6 (2003) - "Ensaios de betão endurecido. Parte 6: resistência à tracção por compressão de provetes". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12504-4 (2007) - "Ensaios de betão nas estruturas. Parte 4: determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 1992-1 (2010) - "Eurocode 2 - Design of concrete structures; Part 1-1: General rules and rules for buildings". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 259 p.

NP EN 206:2013+A1. (2017) - "Concrete specification, performance, production, and compliance". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 933-1 (2000) - "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica Método de peneiração". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 16 p.

NP EN 933-2 (1999) - "Ensaios para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 7 p.

NP EN 933-3 (2014) - "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: determinação da forma das partículas. Índice de achatamento". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal. 12

NP EN 933-4 (2002) - "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: determinação da forma das partículas. Índice de forma". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 14 p.

UN. (2022). Website of United Nations, https://unric.org/pt/agua/ accessed 25th October 2023.

United Nations Environment Programme (2020) - "Global Status Report for Building and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector". Executive summary.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO EM TERMOS DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM ÁGUA E AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DA LAVAGEM DE AUTOBETONEIRAS

José Parreira [a]; Jorge de Brito [b]; Miguel Bravo [c]

[a] IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.parreira@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

[c] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, miguelnbravo@gmail.com

RESUMO

O objectivo desta investigação é avaliar o desempenho em termos de durabilidade de betões produzidos com água e agregados reciclados provenientes da lavagem de autobetoneiras, analisando a sua viabilidade. Este estudo aborda questões de sustentabilidade, como a escassez de água e o consumo de recursos, no sector da produção de betão.

Na campanha experimental, os agregados grossos naturais foram substituídos por agregados grossos reciclados em proporções de 0, 50 e 100%, e a água potável foi substituída por água reciclada proveniente da lavagem de autobetoneiras nas mesmas proporções. Foram produzidas nove misturas diferentes, mantendo uma relação água / cimento efectiva constante de 0,55 para garantir uma trabalhabilidade constante em todos os betões.

As misturas de betão foram avaliadas tanto no estado fresco como no estado endurecido, considerando diversas propriedades. No estado fresco, as características foram ligeiramente afectadas pela incorporação de agregados reciclados e água reciclada. No estado endurecido, foram observadas pequenas reduções de desempenho nas misturas produzidas com água reciclada, em contraste com reduções mais notáveis nas misturas com agregados reciclados. É importante destacar que a incorporação de agregados reciclados resultou em melhorias no ensaio de retracção. Em geral, a adição de agregados reciclados e de água de lavagem resultou numa pequena deterioração do desempenho em termos de durabilidade na maioria dos ensaios, mas a sua aplicabilidade permanece viável em circunstâncias específicas.

Palavras-Chave: betão, água reciclada, agregados reciclados, durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água está cada vez mais reconhecida como uma questão global. A falta de água adequadamente limpa, devido à exaustão de recursos e à contaminação por poluentes, resulta em problemas ambientais e socioeconómicos. A procura humana por água aumentou seis vezes no último século, como resultado de um aumento de quatro vezes na população global e do aumento dos padrões de vida (Wang et al., 2019).

De acordo com Vajnhandl e Valh (2009), estima-se que o consumo global de água para actividades industriais aumentará de 800 bilhões de m^3 em 2009 para 1500 bilhões de m^3 até 2030. Nesse contexto, a investigação tem sido direccionada para encontrar soluções alternativas ao uso desse recurso essencial.

Numerosos estudos foram conduzidos com o objectivo de reduzir as emissões de poluentes na produção de cimento e mitigar os impactes da extracção de agregados nesta indústria. No entanto, dada a extensa produção global de betão e, consequentemente, o elevado consumo de água potável nesse processo, aliado à escassez desse recurso, há uma necessidade urgente de identificar uma alternativa viável para a produção de betão que possa proporcionar benefícios substanciais em várias frentes.

Esta investigação concentrou-se nos potenciais benefícios e desafios associados ao uso de água de lavagem de camiões misturadores de betão na produção de betão. A investigação pretende contribuir para um sector de construção mais sustentável que esteja alinhado com as crescentes exigências ambientais.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS

Na composição do betão, foram utilizados dois tipos de água: água doce, proveniente da rede pública, e água reciclada, colectada durante a limpeza dos camiões betoneira. Os agregados finos consistiram em areia fina e grossa de origem natural. Quanto aos agregados grossos, foram empregues dois tamanhos diferentes de brita, designados como brita 1 e brita 2, juntamente com agregados reciclados obtidos no processo de limpeza dos camiões betoneira. O ligante utilizado foi cimento Portland do tipo CEM I 42.5 R, e o superplastificante empregado foi o SikaPlast 717.

Para manter a trabalhabilidade consistente em todas as misturas, foi determinada a absorção de água dos agregados reciclados, permitindo o ajuste adequado da relação água-cimento nas misturas. A Tabela 1 apresenta as características físicas dos agregados, enquanto a Tabela 2 mostra os resultados dos testes químicos realizados nas águas utilizadas.

Tabela 1 - Propriedades dos agregados

Propriedades físicas	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	Agregado reciclado
Baridade (kg/dm^3)	1530	1540	1350	1360	1340
Massa volúmica (kg/dm^3)	2604	2626	2697	2705	2790
Absorção de água (%)	0,3	0,7	1,3	1,5	3,7
Desgaste Los Angeles (%)	-	-	26,45	27,82	31,3

Tabela 2 - Propriedade das águas

Origem	*pH*	Condutividade (us/cm)	Total de sólidos (g/L)	Carbono total (mg/L)	Carbono orgânico total (mg/L)	Carbono inorgânico (g/L)	Índice de carbonatação
Autobetoneiras	9,10	2310,0	1,55	1258,20	88,20	1,17	0,25
Água potável	7,78	139,9	1,16	57,02	8,66	0,09	0,92

2.2 COMPOSIÇÃO

Foram formuladas nove misturas de betão, variando a taxa de substituição de agregados naturais (AN) por agregados reciclados (AR) em 0%, 50% e 100%, assim como a substituição de água potável por água reciclada em 0%, 50% e 100%. As diversas misturas são definidas por "BX-Y", onde X corresponde à percentagem de água substituída e Y corresponde à percentagem de agregados substituídos.

Foi estabelecido que todas as misturas deveriam apresentar uma classe de consistência S4 (150 mm a 190 mm). As misturas produzidas exclusivamente com água potável e água reciclada mantiveram uma relação água / cimento efectiva de 0,55, enquanto as formuladas com AR tiveram uma relação água / cimento de 0,56. Este ajuste na relação água / cimento é atribuído à maior absorção de água por parte dos AR em comparação com os AN.

2.3 ENSAIOS

Todos os testes realizados nesta campanha experimental estão resumidos na Tabela 3. Esta possibilitou uma caracterização abrangente dos componentes, incluindo agregados, assim como do betão em seus estados fresco e endurecido.

Tabela 3 - Ensaios realizados

Agregados	
Análise Granulométrica	NP EN 933-1 (2000), NP EN 933-2 (1999)
Baridade	NP EN 1097-3 (2003)
Densidade e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Desgaste de Los Angeles	NP EN 1097-2 (2000)
Betão no estado fresco	
Cone de Abrams	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica	NP EN 12350-6 (2002)
Betão no estado endurecido	
Absorção de água por imersão	LNEC E394 (1993)
Absorção de água por capilaridade	LNEC E393 (1993)
Resistência à carbonatação	LNEC E391 (1993)
Resistência à penetração de cloretos	LNEC E463 (2004)
Retracção	LNEC E398 (1993)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

O betão no estado fresco foi submetido a testes de trabalhabilidade e de massa volúmica. O teste de

abatimento com cone de Abrams foi utilizado para avaliar a trabalhabilidade das misturas produzidas, garantindo uma classe de consistência S4 (150 a 190 mm). Todas as misturas testadas apresentaram valores dentro da faixa desejada.

A massa volúmica no estado fresco das misturas variou de 4333 a 4424 kg/m³. A incorporação de água reciclada nas misturas causou variações mínimas (até 2%). De acordo com Bodur et al. (2021), esse pequeno aumento é atribuído às partículas em suspensão na água preenchendo os poros das misturas. Por outro lado, o uso de agregados reciclados também resultou em pequenos aumentos na densidade das misturas (até 2%). Bravo et al. (2015) observaram um efeito oposto, atribuído à menor densidade dos agregados reciclados em comparação com os agregados naturais. Dada a semelhança entre os agregados naturais e reciclados utilizados neste estudo, tal efeito não foi observado.

3.2 PROPRIEDADES DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Compressão

Embora esta investigação analise o comportamento do betão em termos de durabilidade, essa análise não pode ser realizada com precisão sem também realizar uma análise de sua resistência à compressão. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no teste de resistência à compressão a 7, 28 e 91 dias.

A substituição de água potável por água reciclada resultou numa pequena diminuição (4%) na resistência à compressão do betão. Estudos conduzidos por Yao et al. (2022) e Matos et al. (2019) observaram uma tendência semelhante. Eles argumentam que elementos suspensos na água reciclada tendem a absorver água de hidratação da mistura, levando a um aumento na porosidade e, consequentemente, a uma redução na resistência à compressão.

Tabela 4 - Resistência à compressão a 7, 28 e 91 dias

Betões	Resistência à compressão								
	7 dias (MPa)	σ	Δ_{B0-0}	28 dias (MPa)	σ	Δ_{B0-0}	91 dias (MPa)	σ	Δ_{B0-0}
B0-0	38,3	1,0	-	44,7	1,1	-	51,2	0,1	-
B50-0	38,0	0,7	-1%	45,6	0,5	2%	47,4	0,9	-8%
B100-0	37,6	0,7	-2%	45,5	1,3	2%	49,4	0,1	-4%
B0-50	35,2	0,3	-8%	40,3	1,2	-10%	46,2	0,9	-10%
B50-50	33,6	1,4	-12%	39,4	1,6	-12%	44,0	0,1	-14%
B100-50	34,9	0,2	-9%	38,8	0,9	-13%	40,3	0,0	-21%
B0-100	26,9	1,0	-30%	31,5	1,2	-29%	36,8	0,7	-28%
B50-100	30,3	0,1	-21%	33,3	2,7	-25%	36,8	0,4	-28%
B100-100	28,3	0,4	-26%	33,0	0,2	-26%	35,6	0,8	-31%

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados resultou numa clara deterioração (31%) na resistência à compressão do betão. De acordo com Kwan et al. (2011), a perda de resistência à compressão é atribuída à argamassa aderida nos agregados reciclados, o que causa um aumento na porosidade do betão. Além disso, Eguchi et al. (2007) acrescentam que, além da argamassa aderida, a sua qualidade também influencia essa propriedade. Argamassas de maior qualidade tendem a ter menor porosidade.

3.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A Figura 1 apresenta os resultados do teste de absorção de água por imersão a 28 dias. Este teste permitiu a avaliação da permeabilidade do betão à água sob pressão atmosférica, medindo a sua porosidade.

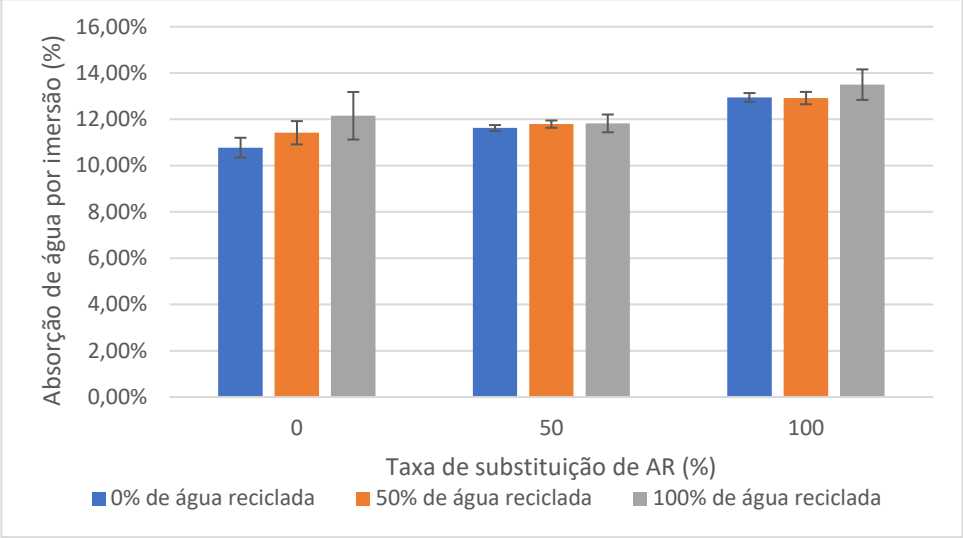


Figura 1 - Absorção de água por imersão a 28 dias

A utilização de água reciclada na produção de betão com AN causou um pequeno aumento na absorção de água por imersão a 28 dias. A substituição de 50% e 100% de água potável por água reciclada resultou em aumentos de 6% e 13%, respectivamente. Resultados contraditórios foram obtidos por Sandrolini et al. (2001) e Bodur et al. (2023) nas suas investigações. Ambos argumentaram que as variações observadas são uma consequência de partículas em suspensão na água, que afectam os poros da mistura. O efeito dessas variações pode ser tanto positivo quanto negativo, dependendo da composição dessas partículas.

Nas misturas produzidas com AR, foi observado um aumento mais significativo (20%) na absorção de água por imersão em comparação com as misturas produzidas com água reciclada. De Brito et al. (2016) obtiveram resultados semelhantes, justificando que o aumento na absorção de água por imersão se deve à permeabilidade da argamassa aderida no AR, que pode variar com a qualidade da argamassa.

A combinação de agregados reciclados com água reciclada resultou na maior absorção de água entre todas as misturas produzidas.

A correlação linear entre a absorção de água e a resistência à compressão pode ser explicada pela influência directa da porosidade do material em ambas as propriedades. Esse fenómeno é confirmado pelo alto coeficiente de determinação (R^2=0,77). Essa tendência foi observada nas investigações conduzidas tanto por Bravo et al. (2015) como por Caracol (2022).

3.2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A Figura 2 apresenta os resultados do teste de absorção capilar de água a 28 e 56 dias. Na análise inicial dos resultados, observa-se que tanto o uso de água reciclada como a substituição de AN por AR levaram a aumentos na absorção capilar de água no betão.

O uso de água reciclada não causou variações significativas na absorção capilar de água. A substituição de 50% e 100% de água potável resultou em aumentos de 4% e 14%, respectivamente, a 28 dias. No teste a 56 dias, houve um aumento máximo de 5,5%. Os estudos de Sandrolini et al. (2021) e Bodur et al. (2022) também observaram variações muito baixas na capacidade de absorção de água das misturas produzidas com água reciclada, indicando que seu uso não tem um impacte significativo nesta propriedade.

Nas misturas produzidas com agregados reciclados, foi observado um aumento mais significativo na

absorção capilar de água em comparação com as misturas produzidas apenas com água reciclada. A substituição de 50% e 100% de agregados naturais por agregados reciclados resultou, a 28 dias, em aumentos de 14% e 42%, e a 56 dias, de 23% e 32%, respectivamente.

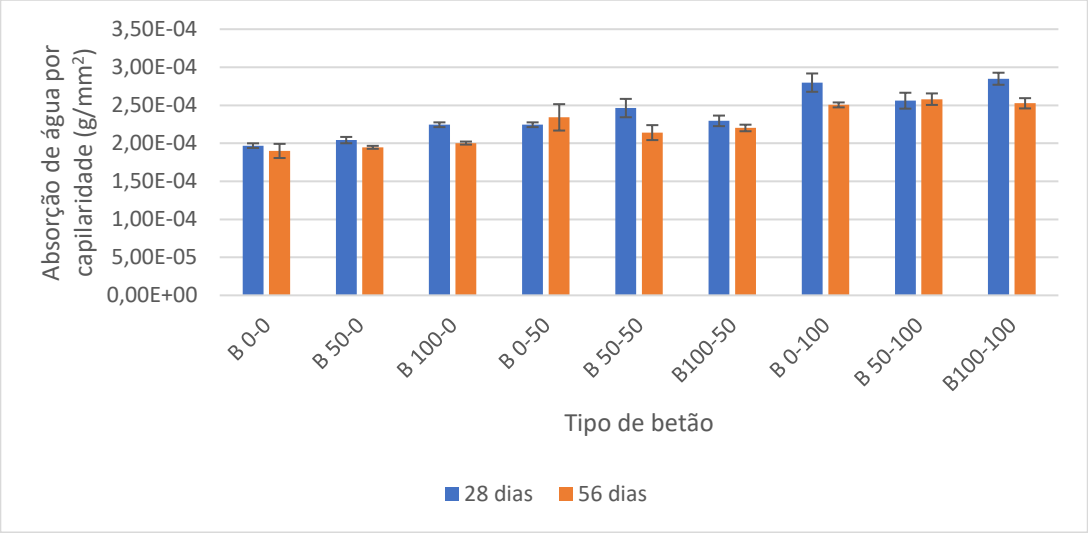


Figura 2 - Absorção de água por capilaridade a 28 e 56 dias

De Brito et al. (2016) também observaram aumentos na absorção de água com a incorporação de agregados reciclados no betão. Os autores constataram que, com a substituição de 25% e 100% de agregados naturais por agregados reciclados, houve aumentos de 11% e 42%, argumentando que essas diferenças advêm da qualidade da argamassa aderida nos agregados reciclados. Evangelista (2014) acrescenta que esses aumentos estão associados a um aumento significativo na porosidade aberta dentro das misturas.

Os resultados obtidos a 56 dias mostram variações menores em comparação com aqueles obtidos a 28 dias. A principal razão para esses valores é o tempo de cura prolongado, permitindo que as misturas a 56 dias sejam mais coesas e menos porosas.

A correlação linear entre a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade, ambos a 28 dias, pode ser explicada pela influência directa da porosidade da pasta de cimento ou agregados reciclados em ambas as propriedades. Esse fenómeno é confirmado pelo alto coeficiente de determinação (R^2=0,87). Essa tendência foi observada nas investigações conduzidas tanto por Bravo et al. (2015) quanto por Caracol (2022).

3.2.4 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Na Figura 3, a profundidade de carbonatação a 7, 28 e 56 dias em diferentes misturas é ilustrada. Os resultados demonstram que tanto a substituição de AN por AR como a substituição de água doce por água reciclada levaram a um aumento na profundidade de carbonatação no betão.

Na análise das misturas produzidas com água reciclada e agregados naturais (AN), foram observadas variações mais significativas na profundidade de carbonatação a 7 dias, em comparação com o betão de referência, do que a 28 e 56 dias. A 28 dias, a substituição de 50% e 100% resultou em aumentos de 14% e 26%, respectivamente. A 56 dias, a substituição de 50% e 100% resultou em aumentos de 6% e 23%, respectivamente, em comparação com o betão de referência. Yao et al. (2022) também obtiveram, no seu estudo, uma redução na resistência à carbonatação, atribuindo-a às partículas presentes na água que possuem micróporos que permitem a entrada e difusão de carbono no betão.

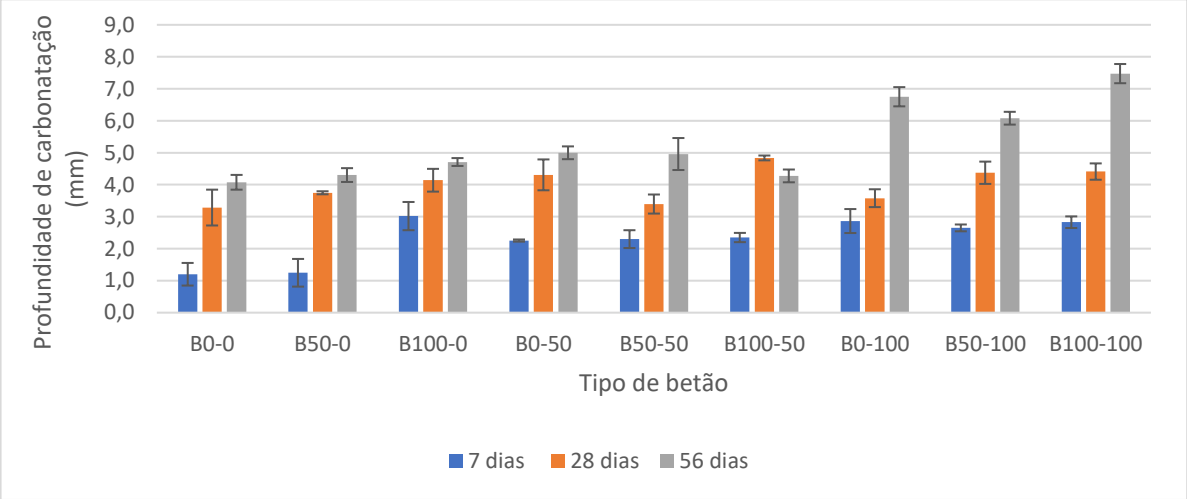


Figura 3 – Resistência à carbonatação

Por outro lado, a substituição de AN por AR levou a um aumento na profundidade de carbonatação a 7, 28 e 56 dias. A 7 dias, o aumento foi superior a 80%. Essas variações significativas podem ser atribuídas à maior porosidade de AR em comparação com AN, permitindo uma maior difusão de carbonatação num curto período. A 28 dias, foi observado um aumento na profundidade de carbonatação com a substituição de 50% e 100% de AR, resultando num aumento de 31% e 25%, respectivamente. A 56 dias, a substituição de 50% e 100% de AR causou um aumento de 23% e 66%, respectivamente. Mahmood et al. (2021) também observaram um aumento na profundidade de carbonatação no betão de 60 ± 10%. Os autores argumentam que a argamassa aderida nos agregados reciclados e sua porosidade contribuem para esse aumento.

A resistência à carbonatação a 56 dias e a absorção de água por capilaridade a 28 dias mostram uma correlação linear significativamente alta, como evidenciado pelo coeficiente de correlação (R^2=0,86). Essa correlação é atribuída ao facto de ambas as propriedades serem altamente influenciadas pela porosidade da pasta de cimento e dos agregados reciclados. Bravo et al. (2015) observaram uma relação semelhante em sua investigação, obtendo um coeficiente de correlação de R^2=0,81.

Uma relação linear entre a resistência à carbonatação a 56 dias e a resistência à compressão a 28 dias pode ser observada. Com um coeficiente de determinação de R^2=0,76, há uma correlação confirmada entre essas propriedades. Essa é mais uma vez atribuída à influência da porosidade do betão nas propriedades testadas. Em resumo, como a porosidade afecta tanto a resistência à compressão como a resistência à carbonatação, observa-se uma forte correlação entre essas propriedades.

3.2.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A Figura 4 apresenta os resultados do teste de migração de iões de cloreto a 28 dias. Numa análise preliminar, pode-se observar que a substituição de água doce por água reciclada teve um impacte menor nesta propriedade do que a substituição de AN por AR.

O uso de água reciclada resultou num aumento de 10% na difusão de iões de cloreto em comparação com o betão de referência. Ali et al. (2021) observaram reduções entre 20% e 40% na resistência à penetração de cloretos, justificando que essa redução ocorreu devido à menor formação de produtos hidratados durante as reacções de hidratação do betão. Yao et al. (2022) acrescentaram que a classe de resistência à compressão também influencia essa propriedade, explicando que um aumento na classe torna a mistura mais coesa e, consequentemente, menos porosa.

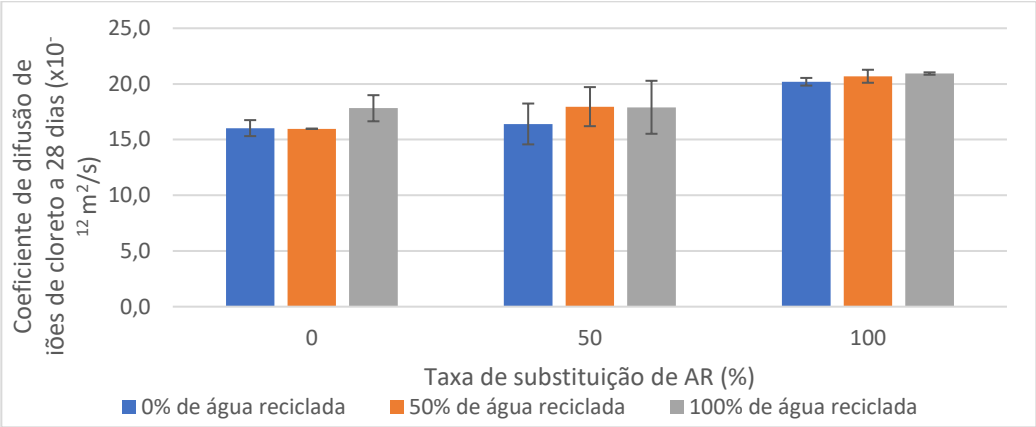


Figura 4 - Influência da variação de água reciclada no coeficiente de difusão de iões de cloretos a 28 dias

Nas misturas produzidas com agregados reciclados e água potável, foi observado um aumento mais significativo no coeficiente de dispersão de iões de cloreto em comparação com as misturas produzidas apenas com água reciclada. A substituição de AN por AR até 50% resultou num aumento de até 3%, enquanto a substituição total de AN por AR mostrou um aumento de 26%. Mahood et al. (2021) e de Brito et al. (2016) obtiveram diferentes reduções na resistência em suas investigações (40% e 10%, respectivamente). Os autores correlacionam essas variações com a qualidade dos AR utilizados, já que estes são derivados de diferentes tipos de betão.

A correlação entre a profundidade de carbonatação e o coeficiente de difusão de iões de cloreto é ilustrada, indicando uma forte relação entre vários mecanismos de transporte, como a difusão de gases e a difusão iónica. Basheer et al. (2001) correlacionaram de maneira semelhante essas duas propriedades, obtendo um coeficiente de correlação de R^2=0,77.

A relação entre o coeficiente de difusão de iões de cloreto e a absorção de água por capilaridade a 28 dias foi testada, revelando uma substancial correlação linear. Essa correlação é confirmada por um alto coeficiente de correlação (R^2 de 0,87). Caracol (2022) correlacionou de maneira semelhante essas propriedades e confirmou os resultados obtidos nesta investigação.

3.2.6 RETRACÇÃO

A Tabela 5 apresenta os valores de retracção do betão a 7, 28 e 91 dias de idade, juntamente com o desvio padrão e a variação relativa ao betão de referência.

Tabela 5 - Retracção a 7, 28 e 91 dias

Betão	Retracção a 7 dias (µm/m)	Δ_{B0-0}	Retracção a 28 dias (µm/m)	Δ_{B0-0}	Retracção a 91 dias (µm/m)	Δ_{B0-0}
B0-0	-67,6 ± 1,7	-	-144,7 ± 3,7	-	-197,9 ± 6,8	-
B50-0	-70,4 ± 0,0	4%	-163,2 ± 0,0	13%	-217,9 ± 0,0	10%
B100-0	-80,1 ± 9,4	18%	-176,5 ± 17,1	22%	-223,7 ± 18,9	13%
B0-50	-56,0 ± 3,1	-17%	-151,9 ± 14,9	5%	-201,7 ± 15,0	2%
B50-50	-57,4 ± 48,1	-15%	-153,3 ± 32,8	6%	-204,7 ± 44,2	3%
B100-50	-56,0 ± 1,0	-17%	-150,5 ± 0,7	4%	-201,6 ± 7,5	2%
B0-100	-42,2 ± 0,4	-38%	-141,9 ± 0,7	-2%	-181,5 ± 6,6	-8%
B50-100	-55,4 ± 0,0	-18%	-138,0 ± 0,0	-5%	-182,9 ± 0,0	-8%
B100-100	-43,4 ± 2,5	-36%	-117,4 ± 8,4	-19%	-188,6 ± 0,8	-5%

A Tabela 5 e a Figura 5 mostram que a substituição de água potável por água reciclada teve um impacte negativo nesta propriedade, ao contrário da substituição de AN por AR. A substituição de 50% de água potável por água reciclada resultou em variações baixas a 7, 28 e 91 dias, levando a um aumento na retracção de 4%, 13% e 10%, respectivamente. A substituição total de água potável por água reciclada resultou em aumentos de 18%, 22% e 13% nos mesmos intervalos de tempo. Yao et al. (2022) obtiveram valores mais baixos a 28 dias para substituições de 50% e 100% de água potável por água reciclada, resultando em aumentos de 4,5% e 8,9%, respectivamente. Segundo os autores, partículas sólidas presentes na água reciclada absorveram parte da água de hidratação, levando a uma diminuição da humidade interna. Chatveera et al. (2006) acrescentaram que a presença de etringite instável pode resultar no aumento de poros capilares, contribuindo para o aumento da retracção.

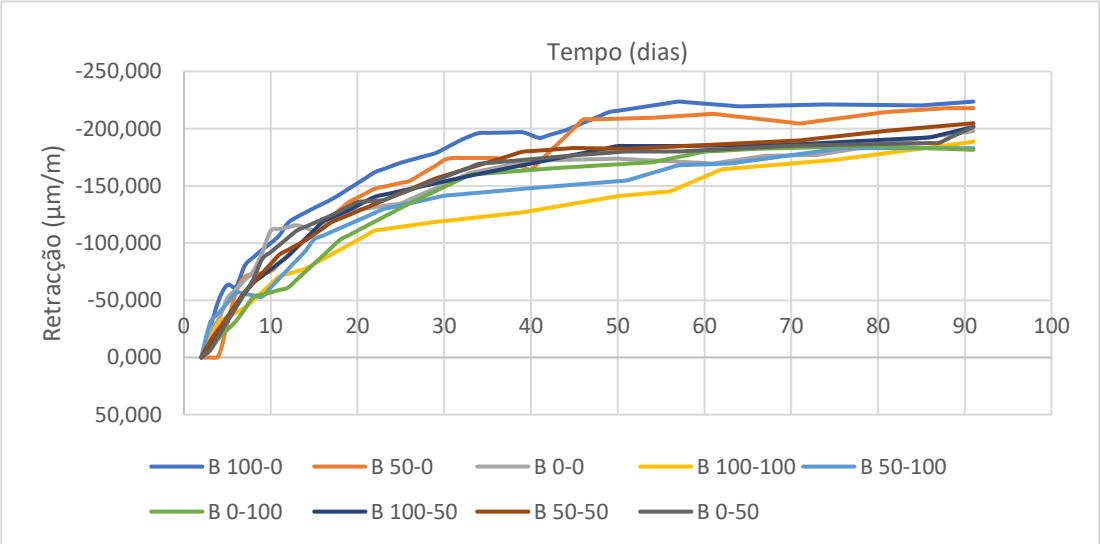


Figura 5 - Evolução da retracção dos diferentes betões ao longo do tempo

A incorporação de AR nas misturas, substituindo AN, resultou numa melhoria na retracção em comparação com as misturas produzidas exclusivamente com água reciclada. Especificamente, o betão com 50% de AR mostrou uma retracção a 7 dias menor do que a do betão de referência, em cerca de 17%, enquanto a 91 dias apresentou um valor mais alto (em 2%). A substituição total de AN por AR levou a valores ainda melhores de retracção em comparação com o betão de referência, com reduções de 38% e 8% a 7 e 91 dias, respectivamente. Os resultados obtidos contradisseram as observações feitas por de Brito et al. (2016) e Ozbakkaloglu et al. (2017). Isso pode ter ocorrido porque os AR usados nesta pesquisa estavam hidratados durante a produção do betão, o que pode ter desencadeado um processo oposto ao observado nas investigações acima. Em vez dos agregados absorverem água após as primeiras horas, libertaram-na, compensando assim a água perdida durante o teste.

A incorporação simultânea de água reciclada e AR nas misturas de betão piorou ligeiramente o seu comportamento. Isso ocorre porque, por um lado, as partículas encontradas na água reciclada absorveram uma pequena quantidade de sua água de hidratação e, por outro, o AR libertou água durante esse processo. Essa combinação de factores levou ao uso simultâneo de AR e água reciclada, tendo pouco impacte e resultando em variações entre -8% e +3% na retracção a 91 dias, em relação ao betão de referência.

Na ausência de agregados reciclados (AR), o comportamento do betão se assemelha ao do betão de referência tanto a 7 quanto a 91 dias. No entanto, com a incorporação de 50% de AR, observa-se uma variação na retracção, variando de -15% a -17% a 7 dias em comparação com a do betão de referência.

A 91 dias, essa variação diminuiu em 3%. Com a incorporação de 100% de AR, a retracção a 7 dias varia entre -18% e -38%, enquanto a 91 dias varia de -5% a -8%. Esses resultados indicam claramente que, no betão com AR, a retracção é significativamente menor do que no betão de referência a 7 dias, aumentando gradualmente ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser explicado pelo facto de os AR estarem saturados durante o processo de mistura do betão, onde a água de compensação foi adicionada para atingir essa saturação. Sendo saturados durante a produção do betão, esses agregados libertaram água nos primeiros dias de cura. Assim, nos primeiros dias, essa libertação de água compensou as perdas usuais de água no processo de cura do betão, reduzindo a retracção no betão com AR durante esse período inicial.

4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objectivo analisar o efeito da utilização de agregados e água provenientes da lavagem de betoneiras na composição do betão, produzido com diferentes taxas de incorporação (0%, 50% e 100%). Desta forma, foi possível obter conclusões sobre o comportamento do betão em termos de durabilidade.

É relevante destacar que o uso dessa água reciclada não teve um impacte significativo na maioria das propriedades estudadas. No entanto, é importante notar que, apesar de não causar um impacte significativo, houve uma degradação em todas as propriedades. Por outro lado, a utilização de agregados reciclados também resultou numa deterioração geral na durabilidade do betão, apresentando resultados promissores apenas em relação ao comportamento de retracção.

Este estudo contribui para a compreensão dos efeitos da incorporação de água reciclada e agregados reciclados na produção de betão, destacando que, embora possam ocorrer degradações em algumas propriedades, há potencial para melhorias, especialmente no que diz respeito à retracção. Essas conclusões são fundamentais para orientar práticas mais sustentáveis na indústria de produção de betão, considerando a reutilização de recursos e a redução do impacte ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Ali, B.; Kurda, R.; de Brito, J.; Alyousef, R. (2021) - “A review on the performance of concrete containing non-potable water”, Applied Sciences, v. 11.

Bodur, B.; Bayraktar, O.; Benli, A.; Kaplan, G.; Tobbala, D.; Tayeh, B. (2023) - “Effect of using wastewater from the ready-mixed concrete plant on the performance of one-part alkali-activated GBFS/FA composites: Fresh, mechanical and durability properties”, Journal of Building Engineering, V. 76

Basheer, L., Kropp, J., Cleland, D. (2001) - “Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review”, Construction and Building Materials, v.15, Issues 2–3, pp. 93-103.

Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015) - “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”, Construction and Building Materials, v. 77, pp. 357-369.

Caracol, C. (2022) - “Durability behaviour of sustainable concrete produced with seawater and recycled aggregates”, Final Course Project in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, 110 p.

Chatveera, B., Lertwattanaruk, P., Makul, N. (2006) - “Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete”, Cement and Concrete Composites, v. 28, n. 5.

De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D., & Guerreiro, M. (2016) - “Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete”, Journal of Building Engineering, v. 6, pp. 1-16.

Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., Narikawa, M. (2007) - “Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction”, Construction and Building Materials, v. 21, Issue 7

Evangelista, L. (2014) - "Behaviour of concrete with fine recycled aggregates”, Instituto Superior Técnico, Ph.D. Dissertation in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Portugal, 479 p.

Fang, W., Siqi, W., Zhiwei, L., Huixian, Y., Kathleen, A., Raymond, T., Xiaoping, J. (2019) - “Water footprint sustainability assessment for the chemical sector at the regional level”, Resources, Conservation and Recycling, v. 142, pp. 69-77.

Kwan, W., Ramli, M., Jhun Kam, K., Zailan Sulieman, M. (2012) - “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties”, Construction and Building Materials, v. 26, Issue 1.

LNEC E-237 (1970) - “Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-391 (1993) - “Betões. Determinação da resistência à carbonatação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-393 (1993) - “Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-394 (1993) - “Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E-398 (1993) - " Betões. Determinação da retração e da expansão". Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

LNEC E463 (2004) - “Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

Mahmood, W., Khan, A., Ayub, T. (2022) - “Mechanical and durability properties of concrete containing recycled concrete aggregates”, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering v. 46, pp. 2111–2130.

Matos, P., Prudêncio, L., Pilar, R., Gleize, P., Pelisser, F. (2020) - “Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties”, Construction and Building Materials, v. 230.

Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A., Xie, T. (2017) - “Mechanical and durability properties of recycled

aggregate concrete: Effect of recycled aggregate properties and content", Journal of Materials in Civil Engineering. V. 30.

Sandrolini, F., Franzoni, E. (2001) - "Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants", Cement and Concrete Research, v. 31, Issue 3, pp. 485-489.

Vajnhandl, S., Volmajer Valh, J. (2014) - "The status of water reuse in European textile sector", Journal of Environmental Management, v. 141, pp. 29-35

Yao, X.; Xu, Z.; Guan, J.; Liu, L.; Shangguan, L.; Xi, J. (2022) - "Influence of wastewater content on mechanical properties, microstructure, and durability of concrete", Buildings, v.12.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Comportamento mecânico de betões produzidos com água e agregados reciclados provenientes da lavagem de autobetoneiras

Afonso Pessoa [a]; Jorge de Brito [b]; Miguel Bravo [c]

[a] IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, afonso.sergio.pessoa@gmail.com

[b] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

[c] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, miguelnbravo@gmail.com

RESUMO

O objectivo desta investigação foi avaliar o desempenho mecânico de betões produzidos com agregados reciclados (AR) e água reciclada da lavagem de autobetoneiras, analisando assim a sua viabilidade.

Os AR e a água de lavagem substituíram os agregados naturais (AN) grossos e a água potável, respectivamente, em proporções de 0, 50 e 100%. Desta forma, foram produzidas nove misturas diferentes, cuja relação água / cimento (a/c) total foi variando consoante a percentagem de AR incorporados. Os betões foram avaliados no estado fresco e no estado endurecido, através dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tracção, ultra-sons, módulo de elasticidade e abrasão.

Relativamente às propriedades no estado fresco, concluiu-se que estas não foram significativamente afectadas pela incorporação de AR e/ou água de lavagem. Na resistência à compressão e à tracção e no módulo de elasticidade, verificou-se uma degradação do desempenho nos betões produzidos com estes constituintes. No ensaio de resistência à abrasão se verificou uma melhoria. Desta forma, concluiu-se que, na maioria dos ensaios, a incorporação de AR e água reciclada de lavagem provocou uma queda do desempenho mecânico dos betões, sendo, no entanto, ainda viável a sua aplicação na maioria das circunstâncias.

Palavras-chave: betão, água reciclada, agregados reciclados, resistência mecânica.

1 INTRODUÇÃO

Actualmente, com o aumento exponencial da população, juntamente com o consequente crescimento do sector industrial e do consumo no geral, a boa gestão de recursos limitados como água potável é crucial. O consumo de água está a crescer duas vezes mais rápido do que a taxa de população mundial, sendo que aproximadamente 20% das necessidades de água ocorrem no sector industrial (Miller *et al*., 2018). O sector da construção tem um impacte ambiental bastante significativo, quer no consumo de água e recursos naturais, quer também na criação de resíduos. Desta forma, é essencial arranjar novas alternativas sustentáveis, que permitam responder a estes desafios e alterações.

Na indústria da construção, o betão é o material mais utilizado em todo o mundo. Globalmente, cerca de 30 mil milhões de toneladas de betão são produzidas anualmente (Nature Journal, 2021). Isto equivale a cerca de 2,6 mil milhões de toneladas de água, que são consumidas na produção de betão anualmente (Sustainable Concrete, 2020).

Desta forma, muitos estudos foram desenvolvidos com o objectivo de encontrar alternativas sustentáveis para estes problemas. Ainda existem poucos estudos sobre a utilização de agregados reciclados (AR) e água reciclada provenientes da lavagem de autobetoneiras. A utilização destes dois constituintes reciclados, em separado, mostra ser uma alternativa viável. No entanto, o foco desta investigação foi analisar detalhadamente o desempenho mecânico dos betões produzidos com este tipo de água e agregados reciclados, separada e simultaneamente, em diferentes proporções, e a sua viabilidade.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

No Quadro 1, são apresentadas as características definidas para o betão de referência (BR). Os materiais utilizados na campanha experimental foram os seguintes: cimento Portland (CEM I 42.5 R); agregados naturais grossos e finos; agregados reciclados grossos provenientes da lavagem de autobetoneiras; água potável; água reciclada proveniente da lavagem de autobetoneiras; superplastificante SikaPlast 717.

Quadro 1 - Características do betão de referência

Classe de resistência	C30/37
Classe de consistência	S4 (150 a 190 mm)
Dimensão máxima dos agregados	22,4 mm
Relação a/c efectiva	0,55

Os agregados utilizados incluíram agregados finos, compostos por areia fina e areia grossa (de 0 a 2 mm e de 0 a 4 mm, respectivamente), e agregados grossos, compostos por brita 1 e brita 2 (de 9,5 a 19 mm e de 19 a 25 mm, respectivamente). Os agregados reciclados foram peneirados de forma a corresponder à distribuição granulométrica dos agregados naturais grossos e apresentaram dimensões que variavam de 4 a 22,4 mm. No Quadro 2, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios aos agregados.

Quadro 2 - Propriedades dos agregados

Propriedades	Areia fina	Areia grossa	Brita 1	Brita 2	Agregados reciclados
Baridade (kg/m^3)	1530	1540	1350	1360	1340
Massa volúmica (kg/m^3)	2603,9	2626,3	2697,4	2704,5	2789,7
Absorção de água (%)	0,3	0,7	1,3	1,5	3,7
Desgaste de *Los Angeles* (%)	-	-	26,45	27,82	31,3

No que diz respeito à água de lavagem, esta foi recolhida numa central de produção de betão, seguindo sempre o processo de recolha prescrito. Esta água foi submetida a vários testes químicos, que são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades das águas

Origem	Água de lavagem	Água potável
pH	9,10	7,78
Condutividade (uS/cm)	2310	139,9
Teor de sólidos (g/l)	1,55	0,09
Teor de carbono (mg/l)	1258,20	57,02
Teor orgânico de carbono (mg/l)	88,20	8,66
Teor inorgânico de carbono (g/l)	1,17	0,05
Índice de carbonatação	0,25	0,46

2.2 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

A composição do betão de referência é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Composição do betão de referência

Betão de referência		kg/m^3
Cimento		300
Água		165
Agregados grossos	Brita 1	306
	Brita 2	707
Agregados finos	Areia fina	584
	Areia grossa	291
Superplastificante		3

Foram produzidas nove misturas com diferentes proporções de AR e/ou água de lavagem (0, 50 e 100%). O teor de cimento foi mantido constante a 300 kg/m^3. A relação efectiva água-cimento (a/c) também foi mantida constante para todas as misturas a 0,55. No entanto, a relação a/c total foi ajustada com base na percentagem de AR na mistura, uma vez que estes agregados absorvem uma quantidade maior de água. Este ajuste permitiu atingir a classe de trabalhabilidade predefinida em todas as misturas, com o abaixamento do cone de Abrams variando de 150 a 190 mm.

2.3 ENSAIOS

Todos os ensaios realizados durante a campanha experimental estão apresentados no Quadro 5, juntamente com as respectivas normas seguidas. A combinação destes ensaios permitiu a avaliação do desempenho mecânico das misturas de betão e as tendências causadas pelos seus constituintes.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

No Quadro 6, são apresentados os valores obtidos para estes ensaios, juntamente com a relação a/c total aplicada em cada mistura.

Quadro 5 - Ensaios realizados durante a campanha experimental

Ensaios aos agregados	
Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000), NP EN 933-2 (1999)
Baridade	NP EN 1097-3 (2003)
Massa volúmica e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Desgaste de *Los Angeles*	NP EN 1097-2 (2000)
Ensaios no estado fresco	
Abaixamento do cone de Abrams	NP EN 12350-2 (2002)
Massa volúmica	NP EN 12350-6 (2002)
Ensaios no estado endurecido	
Resistência à compressão em cubos	NP EN 12390-3 (2011)
Resistência à compressão em cilindros	NP EN 12390-3 (2011)
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6 (2011)
Velocidade de propagação de ultra-sons	NP EN 12504-4 (2007)
Módulo de elasticidade	BS EN 12390-13 (2013)
Resistência à abrasão	DIN 52108 (2002)

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams permitiu controlar a trabalhabilidade de cada mistura. O objectivo foi manter o abaixamento entre 150 e 190 mm para todas as misturas. Para o conseguir, a relação a/c total foi ajustada de acordo com a percentagem de AR incorporada na mistura, uma vez que estes consumiam uma maior quantidade de água, como verificado pelos ensaios aos agregados. Os resultados obtidos indicaram que, para todas as misturas, a classe de consistência desejada foi alcançada. Com a incorporação de AR e água de lavagem, ao analisar os resultados, foi possível estabelecer uma tendência de manutenção desta propriedade.

Quanto ao ensaio de massa volúmica no estado fresco, os valores para as diferentes misturas variaram de 2297,6 a 2359,0 kg/m³. Estas variações não foram muito significativas, uma vez que os AR utilizados apresentaram uma massa volúmica muito semelhante à dos AN devido à sua natureza e propriedades semelhantes (Ferrari *et al.,* 2014).

Quadro 6 - Resultados para os ensaios nos estado fresco

Betão	Abaixamento (mm)	Massa volúmica (kg/m³)	Relação a/c total
BR (Betão de referência)	165,0	2312,5	
B50/0 (Betão com 50% de água reciclada e 0% de AR)	160,0	2317,1	0,550
B100/0 (Betão com 100% de água reciclada e 0% de AR)	165,5	2345,3	
B0/50 (Betão com 50% de AR)	157,5	2359,0	
B50/50 (Betão com 50% de água reciclada e 50% de AR)	150,5	2297,6	0,556
B100/50 (Betão com 100% de água reciclada e 50% de AR)	173,5	2320,2	
B0/100 (Betão com 100% de AR)	176,5	2341,9	
B50/100 (Betão com 50% de água reciclada e 100% de AR)	182,5	2299,9	0,562
B100/100 (Betão com 100% de água reciclada e 100% de AR)	162,5	2316,9	

3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Resistência à compressão em cubos

No Quadro 7, são apresentados os valores de resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias de idade, juntamente com as variações correspondentes comparativamente ao betão de referência (BR).

Quadro 7 - Resistência à compressão em cubos a 7, 28 e 91 dias

Betões	$f_{cm\ 7\ dias}$ (MPa)	Δ (%)	$f_{cm\ 28\ dias}$ (MPa)	Δ (%)	$f_{cm\ 91\ dias}$ (MPa)	Δ (%)
BR	38,3	-	44,7	-	51,2	-
B50/0	38,0	-1	45,6	2	47,4	-8
B100/0	37,6	-2	45,5	2	49,4	-4
B0/50	35,2	-8	40,3	-10	46,2	-10
B50/50	33,6	-12	39,4	-12	44,0	-14
B100/50	34,9	-9	38,8	-13	40,3	-21
B0/100	26,9	-30	31,5	-29	36,8	-28
B50/100	30,3	-21	33,3	-25	36,8	-28
B100/100	28,3	-26	33,0	-26	35,6	-31

A incorporação de AR resultou numa diminuição da resistência à compressão. Esta diminuição tornou-se mais pronunciada à medida que uma maior proporção de AR foi incorporada, chegando até -30%. Isto pode ser justificado pela maior absorção de água dos AR (Correia *et al*., 2008). Com o tempo, observou-se um aumento da resistência, como era esperado, mas a tendência de redução da resistência, em comparação com o BR, tornou-se mais pronunciada.

O uso de água de lavagem levou a uma ligeira diminuição da resistência à compressão, tanto com 50% como com 100% de água de lavagem, com ocasionais casos de ligeiro aumento. Concluiu-se que existiu uma tendência para uma ligeira diminuição da resistência à compressão com o uso de água de lavagem. No entanto, ao longo do tempo, observou-se que, nos primeiros dias de idade, houve uma tendência para manter a resistência, enquanto que a 91 dias, pareceu ocorrer uma diminuição da resistência. A presença de hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio nestas águas aumentou a

alcalinidade da água, o que posteriormente acelerou o processo de hidratação do cimento e levou a ganhos de resistência mecânica precoce (Matos *et al*., 2020).

Finalmente, ao analisar o efeito combinado da utilização de AR e água de lavagem no betão, foi possível concluir que os efeitos resultantes do uso de água reciclada e AR podem ser considerados cumulativos, mas o seu uso simultâneo resultou num efeito ligeiramente mais negativo.

3.2.2 Resistência à compressão em cilindros

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em cilindros para cada mistura de betão.

Os resultados obtidos exibiram tendências muito semelhantes às obtidas no ensaio de resistência à compressão em cubos. Com a incorporação de AR, uma clara tendência de diminuição da resistência à compressão foi visível. Esta diminuição tornou-se mais pronunciada à medida que uma maior proporção de AR foi incorporada, atingindo valores de -24% em comparação com o BR. Esta tendência tem a mesma explicação do que na resistência em cubos, ou seja, devido à maior absorção de água dos AR (Correia *et al*., 2008).

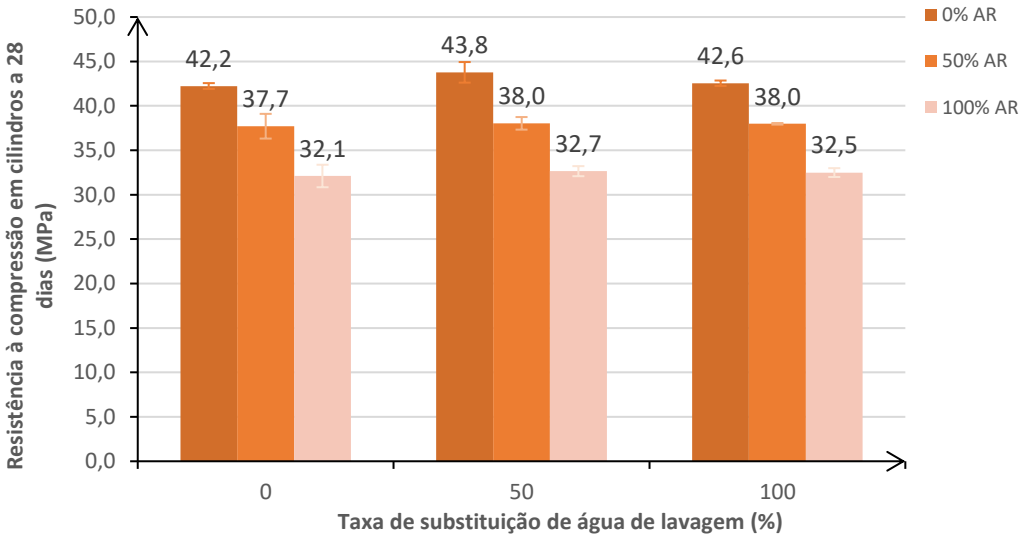


Figura 1 - Resistência à compressão em cilindros a 28 dias

Com o uso de água de lavagem, houve uma tendência para manter esta propriedade, com valores a variar entre 1 e 4% em comparação com o BR. Esta manutenção, tal como na resistência à compressão, pode ser justificada pelo ganho de resistência mecânica precoce, que compensa a baixa qualidade dos agregados. Esta perda de resistência mecânica precoce deveu-se à elevada alcalinidade da água, como observado nos ensaios químicos realizados, que causou um elevado grau de reacções exotérmicas nos primeiros dias de idade (Matos *et al*., 2020). Estes resultados confirmam as descobertas de Wasserman (2012), onde foram observadas variações de 1% com o uso de água de lavagem. Além disso, foi também possível concluir que os efeitos negativos resultantes do uso de água de lavagem e AR são acumulados, mas o seu uso simultâneo não causou qualquer efeito negativo adicional.

Além disso, foi realizada uma regressão linear entre os ensaios de resistência à compressão em cubos e em cilindros. Os resultados foram comparados com os valores teóricos obtidos através do CEB-FIP (1978)

e os valores obtidos por Bravo *et al*., (2016), que utilizaram AR de resíduos de construção e demolição (RCD). Através da Figura 2, foi possível confirmar que os valores obtidos nesta investigação excederam os valores esperados, ultrapassando 80% dos valores da resistência à compressão de cubos.

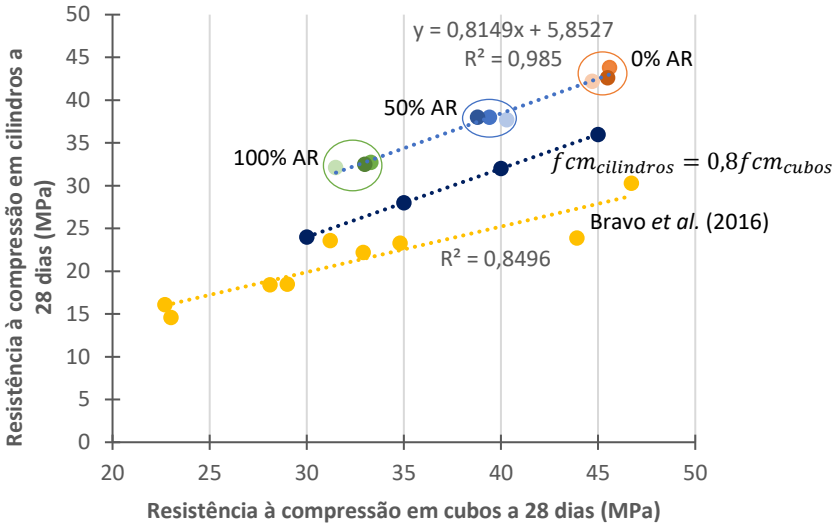


Figura 2 - Correlação entre a resistência à compressão em cubos e cilindros a 28 dias de idade

3.2.3 Resistência à tracção por compressão diametral

No Quadro 8, é possível encontrar os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral. A análise destes resultados levou à conclusão de que a incorporação de AR resultou numa diminuição bastante linear desta resistência. Essas diminuições podem ser atribuídas à menor qualidade do AR usado em comparação com os AN. Os AR provenientes da lavagem de autobetoneiras apresentam uma massa volúmica ligeiramente inferior e absorvem mais água do que os AN, uma vez que são mais porosos, como evidenciado nos ensaios aos agregados. Estes factores influenciam directamente o desempenho mecânico do betão, resultando numa redução da resistência à tracção (Pacheco *et al*., 2019).

Quadro 8 - Resistência à tracção a 28 dias

Betões	$f_{ck\ 28\ dias}$ (MPa)	σ (MPa)	Δ (%)
BR	3,2	0,4	-
B50/0	3,1	0,3	-3
B100/0	2,9	0,1	-8
B0/50	2,7	0,2	-16
B50/50	2,5	0,1	-21
B100/50	2,6	0,3	-18
B0/100	2,0	0,2	-39
B50/100	1,8	0,3	-45
B100/100	1,9	0,2	-41

Com o uso de água de lavagem, foi evidente que houve uma ligeira deterioração da resistência à tracção para todas as misturas (de -2,0 a -10,5%). Esta diminuição na resistência à tracção pode ser atribuída à maior concentração de sólidos na água de lavagem. Isso foi observado nos ensaios químicos realizados

na água, onde o teor de sólidos obtido foi de 1,55 g/l, causando assim uma diminuição na relação a/c real. Bahraman *et al*. (2021) obtiveram resultados semelhantes em misturas de betão produzidas com água de lavagem com elevado teor de sólidos, com diminuições na resistência à tracção de até -8,6% atribuídas a essa característica. No entanto, essa perda de resistência não foi linear e variou consideravelmente, independentemente da proporção de água de lavagem utilizada (50 ou 100%). Estes resultados foram semelhantes aos de Sandrolini e Franzoni (2001) e Chatveera *et al.* (2006), que observaram perdas entre -4 a -9% e -10 a -12%, respectivamente, para 50 e 100% de água de lavagem.

Finalmente, concluiu-se que a introdução simultânea de água de lavagem e AR teve um efeito positivo mais significativo em algumas misturas. No entanto, noutras misturas, o uso simultâneo destes constituintes teve um efeito negativo, embora não tão significativo quanto o positivo.

3.2.4 Velocidade de propagação de ultra-sons

No Quadro 9, são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons a 7, 28 e 91 dias de idade.

Após analisar os resultados observou-se que, em quase todas as misturas houve um aumento da velocidade de propagação de ultra-sons à medida que o tempo passou. Consequentemente, concluiu-se que esta propriedade melhora com o tempo. No entanto, pareceu haver uma tendência para uma manutenção da velocidade de 28 dias para 91 dias. Isto ocorreu devido ao aumento das reacções de hidratação com a idade, resultando numa melhoria geral na qualidade do betão. Com a incorporação de AR, surgiu uma tendência para manter a velocidade de propagação de ultra-sons em todas as idades. Nas misturas produzidas com água de lavagem e AN, pareceu haver uma ligeira melhoria desta propriedade a 28 e 91 dias. No entanto, nas misturas com água de lavagem e AR, este não foi o caso, já que em todas as idades pareceu haver uma deterioração muito ligeira desta propriedade, que pode ser interpretada como uma manutenção da velocidade de propagação de ultra-sons. De acordo com Kwan *et al*. (2012), à medida que AN são substituídos por AR, os valores da velocidade de propagação de ultra-sons diminuem devido à estrutura porosa e à menor qualidade destes últimos. Portanto, esta ligeira diminuição pode ser atribuída à qualidade inferior dos AR em comparação com os AN. Também foi possível concluir que, com o uso simultâneo de água de lavagem reciclada e AR, houve um efeito positivo nesta propriedade.

Quadro 9 - Velocidade de propagação de ultra-sons a 7, 28 e 91 dias

Betões	Velocidade de propagação de ultra-sons (m/s)					
	7 dias	Δ (%)	28 dias	Δ (%)	91 dias	Δ (%)
BR	4902,1	-	4969,2	-	4994,5	-
B50/0	4873,1	-0,6	4978,1	0,2	5158,0	3,3
B100/0	4789,9	-2,3	4989,0	0,4	5276,9	5,7
B0/50	5019,5	2,4	5085,4	2,3	5146,2	3,0
B50/50	4978,8	1,6	5079,5	2,2	5084,8	1,8
B100/50	5092,2	3,9	5050,8	1,6	5059,1	1,3
B0/100	4941,2	0,8	5013,6	0,9	5169,9	3,5
B50/100	4751,1	-3,1	5014,3	0,9	5015,8	0,4
B100/100	4997,1	1,9	5110,1	2,8	5104,2	2,2

3.2.5 Módulo de elasticidade

Na Figura 3, é possível observar os resultados obtidos neste ensaio. Estes resultados permitiram concluir que este ensaio foi menos afectado pelo uso de água de lavagem e AR. Apesar disso, houve uma ligeira diminuição com a incorporação de AR, o que pode ser atribuído à menor rigidez dos AR (Pacheco *et al.*, 2019). O uso de água de lavagem causou uma diminuição ainda mais ligeira neste ensaio, atribuída aos sólidos presentes na água, que contribuíram para a descontinuidade entre o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e os agregados (Chatveera *et al.*, 2006).

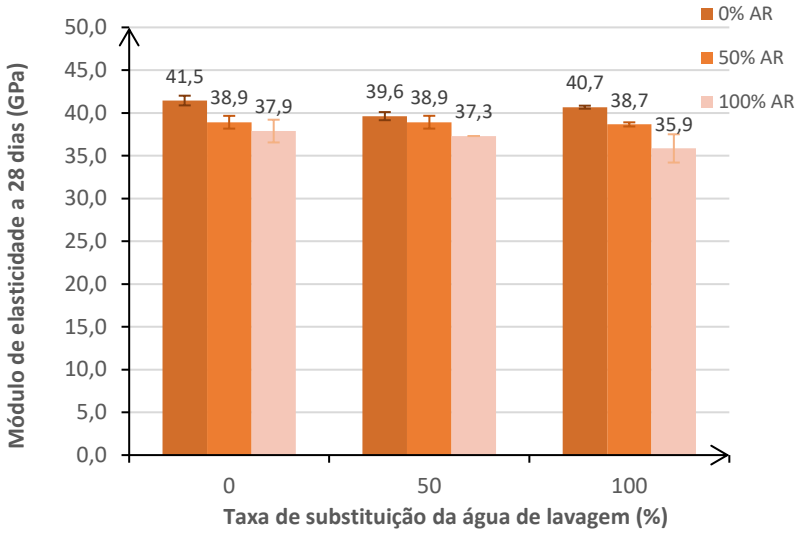


Figura 3 - Módulo de elasticidade a 28 dias

Posteriormente, foi estabelecida uma correlação entre esta propriedade e a resistência à compressão em cubos, através de uma regressão exponencial. Concluiu-se que estas duas propriedades estão intimamente relacionadas, dado o valor obtido para o coeficiente de regressão exponencial (R^2=0,96).

3.2.6 Resistência à abrasão

No Quadro 10, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio para cada betão.

Quadro 10 - Perda de massa devido à abrasão a 91 dias

Betões	Perda de massa devido à abrasão a 91 dias (%)	σ	Δ (%)
BR	-4,3	0,3	-
B50/0	-4,6	0,3	5,6
B100/0	-4,6	0,3	6,8
B0/50	-4,3	0,8	-1,6
B50/50	-4,1	0,2	-4,4
B100/50	-4,4	0,0	2,0
B0/100	-4,4	0,0	1,2
B50/100	-4,3	0,2	-1,4
B100/100	-4,0	0,4	-7,2

Estes resultados mostram uma ligeira melhoria no desempenho do betão com a incorporação de AR na mistura, atingindo valores de perda de massa até -13,1%. Esta melhoria foi atribuída à maior absorção de água e rugosidade por parte dos AR, que proporcionaram maior resistência ao desgaste do betão (Matias *et al*., 2013). Com o uso de água de lavagem, houve pouco ou nenhum efeito nesta propriedade do betão, tornando impossível estabelecer uma tendência clara.

4 CONCLUSÕES

O principal objectivo desta investigação foi estudar o desempenho mecânico de misturas produzidas com agregados e água de lavagem de autobetoneiras. Para o conseguir, foram realizados vários ensaios tanto aos constituintes do betão como às diferentes misturas produzidas, nos estados fresco e endurecido. Isto permitiu adquirir conhecimento diversificado sobre a influência desses constituintes no desempenho mecânico do betão e tirar conclusões sobre sua potencial viabilidade em cenários do mundo real. As conclusões obtidas foram as seguintes:

- a água de lavagem apresentou um pH mais elevado do que a água potável (pH = 9,1). Isto foi atribuído ao alto teor alcalino do cimento Portland, que influenciou propriedades como a resistência à compressão. A água de lavagem também apresentou um teor significativamente mais elevado de sólidos totais (1,55 g/l), afectando a trabalhabilidade e outras propriedades também;
- os agregados reciclados grossos apresentaram baridade e massa volúmica ligeiramente mais baixas do que os agregados naturais grossos. Os valores de desgaste por abrasão de *Los Angeles* foram mais elevados. Estes agregados reciclados absorveram mais água, impactando significativamente a composição das misturas em que este tipo de agregados foi incorporado;
- no que diz respeito à resistência à compressão, observou-se uma diminuição com a incorporação de AR, até -30%. Com o uso de água de lavagem, houve uma manutenção nos primeiros dias de idade, seguida de uma ligeira diminuição da resistência ao longo do tempo;
- ao analisar a resistência à tracção por compressão diametral, concluiu-se que a incorporação de AR causou uma diminuição maior do que a observada na resistência à compressão, até -43,7%. O uso de água de lavagem também levou a uma ligeira diminuição nesta resistência (-10,5%);
- no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, a incorporação de AR causou uma ligeira melhoria na velocidade. Com o uso de água de lavagem na mistura, pareceu haver uma tendência para manter a velocidade em todas as idades;
- no ensaio ao módulo de elasticidade, a incorporação de AR levou a uma ligeira diminuição, atribuída à menor rigidez dos AR (até -12%). O uso de água de lavagem causou uma diminuição ainda mais ligeira neste ensaio (até -5%);
- no ensaio de resistência à abrasão, observou-se uma ligeira melhoria no desempenho do betão com a incorporação de AR na mistura. Com o uso de água de lavagem, não foi possível identificar uma tendência clara.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Bahraman, M., Asadollahfardi, G., Salehi, A., Yahyaei, B. (2021). "Feasibility study of using wash water from ready mixed concrete plant and synthetic wastewater based on tap water with different total dissolved solid to produce self-compacting concrete", Journal of Building Engineering, v. 41.

Bravo, M. (2016). "Desempenho de betões produzidos com agregados reciclados obtidos a partir de RCD de centrais de reciclagem Portuguesas", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

BS EN 12390-13 (2013). "Testing hardened concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression", British Standards Institution, London, UK.

CEB-FIP (1978). "Model code for concrete structures", Comité Euro-international du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte, 3rd edition.

Chatveera, B., Lertwattanaruk, P., Makul, N. (2006). "Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete", Cement and Concrete Composites, v. 28, n. 5.

Correia, L., Souza, F.L., Dienstmann, G., Folgueras, M., Hotza, D. (2008). "Use of aggregates from recycled concrete mixer trucks waste in concrete", Materials Science Forum, v. 591-593, pp. 854-859.

DIN 52108 (2002). "Testing of inorganic non-metallic materials - Wear test using the grinding wheel according to Boehme", Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.

Ferrari, G., Miyamoto, M., Ferrari, A. (2014). "New sustainable technology for recycling returned concrete", Construction and Building Materials, v. 67, Part C, pp. 353-359.

Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., Sulieman, M. (2012). "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties", Construction and Building Materials, v. 26, pp. 565-573.

Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., Pedro, D. (2013). "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers", Construction and Building Materials, v. 44, pp. 101-109.

Matos, P., Prudêncio, L., Pilar, R., Gleize, P., Pelisser, F. (2020). "Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties", Construction and Building Materials, v. 230.

Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). "Impacts of booming concrete production on water resources worldwide", Nature Sustainability, v. 1, n. 1, pp. 69-76.

Nature Journal. (2021). Website of Nature Journal, https://www.nature.com/ accessed 13 October 2023.

NP EN 1097-2 (2000). "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação". Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 36.

NP EN 1097-3 (2003). "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: determinação da baridade e do volume de vazios", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 16.

NP EN 1097-6 (2003). "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 33.

NP EN 12350-2 (2002). "Ensaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12350-6 (2002). "Ensaios do betão fresco. Parte 6: massa volúmica", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 13.

NP EN 12390-3 (2011). "Ensaios do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão de provetes", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 21.

NP EN 12390-6 (2011). "Ensaios de betão endurecido. Parte 6: resistência à tracção por compressão de provetes", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 12504-4 (2007). "Ensaios de betão nas estruturas. Parte 4: determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 933-1 (2000). "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: análise granulométrica. Método de peneiração", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 16.

NP EN 933-2 (1999). "Ensaios para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas", Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, pp. 7.

Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., Evangelista, L. (2019). "Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates", Construction and Building Materials, v. 201, pp. 110-120.

Sandrolini, F., Franzoni, E. (2001). "Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants", Cement and Concrete Research, v. 31, n. 3, pp. 485-489.

Sustainable Concrete. (2020). Website of Sustainable Concrete, https://www.sustainableconcrete.org.uk/ accessed 13 October 2023.

Wasserman, B. (2012). "Wash water in the mix: Effects on the compressive strength of concrete", International Journal of Construction Education and Research, v. 8, n. 4, pp. 304-316.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS SUJEITOS A CARBONATAÇÃO FORÇADA E ACELERADA - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Ricardo Infante Gomes [a, b]; Catarina Brazão Farinha [a, b]; Cinthia Maia Pederneiras [b, c]; David Bastos [c]; Rosário Veiga [a]; Jorge de Brito [b]; Paulina Faria [d]

[a] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. rigomes@lnec.pt; cfarinha@lnec.pt; rveiga@lnec.pt

[b] CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

[c] c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Lisboa, Portugal. cpederneiras@c5lab.pt; dbastos@c5lab.pt

[d] CERIS, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2829-516, Caparica, Portugal; paulina.faria@fct.unl.pt

RESUMO

As indústrias da construção em geral e da produção de cimento em particular são grandes emissoras de CO_2 e responsáveis por 33% dos resíduos gerados na União Europeia, incluindo os resíduos de construção e demolição (RCD). A gestão e reciclagem adequadas destes materiais são urgentes para promover a sustentabilidade. Uma abordagem promissora é utilizar a carbonatação forçada para capturar CO_2 através de RCD, incorporando-os depois como agregados reciclados (AR) em substituição da areia natural em argamassas. Este artigo tem como objetivo avaliar o impacte da utilização de diferentes AR carbonatados no comportamento mecânico de argamassas cimentícias. Para tal, foram utilizados três AR de diferentes tipos e fontes e com diversos graus de carbonatação natural. Os resultados mostraram que as argamassas com AR misto carbonatado exibiram um aumento nas suas resistências mecânicas. No entanto, apesar de a microestrutura dos agregados ser alterada com a carbonatação, não se obteve melhorias das características mecânicas das argamassas com AR de betão. Globalmente, as resistências obtidas para as argamassas modificadas são adequadas para argamassas de revestimento. Ainda que os resultados de desempenho mecânico sejam inferiores ou semelhantes, as argamassas com agregados carbonatados deverão apresentar uma pegada de carbono menor em comparação com as argamassas com agregados não carbonatados, devido à captura de CO_2.

Palavras-chave: Cimento; Argamassa sustentável não estrutural; Resíduos de construção e demolição; Carbonatação natural; Captura e armazenamento de CO_2

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou consideravelmente, com cerca de 40% do total desse aumento atribuído às atividades humanas (Sanjuán *et al*. 2020). A concentração elevada deste gás, em conjunto com outros gases de efeito de estufa, é responsável pelo aquecimento global, uma das principais ameaças ambientais. Desta forma, são necessárias medidas urgentes para a mitigação destas emissões.

A produção de cimento é fundamental para o setor da construção, sendo, no entanto, uma das principais fontes de emissão de CO_2. Estas emissões ocorrem em todo o processo de produção, desde a extração de matérias-primas até ao transporte, resultando num impacte significativo no meio ambiente. Deste modo, o impacte ambiental desta indústria está a tornar-se uma preocupação cada vez mais premente, tendo em conta também as metas de neutralidade carbónica da União Europeia (Salvia *et al*. 2021). Adicionalmente, cerca de um terço dos resíduos produzidos na Europa são gerados pela construção, nos quais se incluem os resíduos de construção e demolição (RCD) (Directorate-General for Environment 2016). A incorporação destes resíduos como agregados reciclados (AR) em produtos de construção, como argamassas e betões, surge como uma medida de gestão e reciclagem adequada, prolongando o ciclo de vida dos resíduos e reduzindo ainda a exploração de recursos naturais (Infante Gomes *et al.* 2021).

Um estudo sobre o impacte ambiental da produção de cimento em Portugal entre 2005 e 2015 concluiu que, tendo em conta todas as emissões de CO_2 ao longo do ciclo de vida, este cimento absorveu entre 14,8 e 19,6% do CO_2 emitido (Sanjuán *et al*. 2020). Desta forma, é possível recuperar parte do CO_2 emitido na produção do cimento. Assim, uma solução para a captura de CO_2 emitida por parte da indústria cimenteira e para a gestão de RCD poderá ser a captura de CO_2 através de RCD por mecanismos de carbonatação forçada, incorporando-os depois como AR substituindo o agregado natural em argamassas e betões.

O uso de RCD como AR em argamassas e betões tem sido objeto de vários estudos, com resultados promissores. No entanto, estes agregados reduzem, geralmente, o desempenho destes compósitos. Diversos estudos (Chinzorigt *et al*. 2020; Gholizadeh-Vayghan *et al*. 2020; Muñoz *et al*. 2019; Pu *et al*. 2022; Russo e Lollini 2022) afirmam que a incorporação de agregados de RCD submetidos a carbonatação forçada em argamassas e betões melhora as suas características, nomeadamente as propriedades mecânicas, em comparação com a incorporação de agregados não carbonatados, uma vez que contribuem também para a captura e armazenamento de CO_2 (*CCS - carbon capture and storage*). No entanto, a grande maioria dos estudos focados nesta questão utiliza resíduos formulados em laboratório, o que não corresponde à realidade dos RCD disponíveis.

Desta forma, este artigo pretende estudar a incorporação de três tipos de AR distintos, de fontes e com graus de carbonatação natural diferentes (um AR misto, um AR de betão e um agregado de betão formulado em laboratório), sujeitos a carbonatação forçada em argamassas cimentícias, e avaliar o impacte no seu comportamento mecânico consoante o tipo de AR utilizado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para o estudo de argamassas com incorporação de agregados reciclados provenientes de RCD sujeitos a carbonatação forçada, foram selecionados quatro tipos de agregados diferentes: um agregado natural, um AR misto e um AR de betão provenientes de duas Operadoras de Gestão de Resíduos (OGR)

portuguesas, e um agregado de betão formulado em laboratório (CC). O agregado natural (AN) utilizado resulta da mistura de várias areias siliciosas calibradas, contendo mais de 98% de sílica, juntamente com quartzito, quartzo e minerais de feldspato, fornecidos pela Areipor - Areias Portuguesas. O agregado reciclado misto (MRA) - Figura 1a - corresponde a uma mistura de diversos materiais, sendo constituído, em massa, por cerca de 37% de produtos cimentícios, 27% de materiais cerâmicos, 16% de agregados naturais, 7% de materiais betuminosos, 7% de vidro e 7% de outros materiais tais como plástico, gesso e metais. Por sua vez, o agregado reciclado de betão (RCA) - Figura 1b - possui 89% de betão, produtos de betão, argamassas ou blocos de betão de alvenaria, e 11% de agregados naturais não ligados. O agregado de betão (CC) formulado em laboratório resulta da britagem de blocos de betão de classe C30/37 produzidos pela Betão Liz, sendo constituído por 91% de pasta de cimento e 9% de agregado natural (após britagem) - Figura 1c (REF caracterização dos agregados).

(a) (b) (c)

Figura 1 - Agregados reciclados: MRA (a), RCA (b), CC (c)

Para a caracterização dos agregados e posterior incorporação em argamassas, os três AR passaram por um processo de pré-secagem até massa constante a 40 °C numa estufa ventilada. Posteriormente, foram triturados e peneirados, utilizando-se as partículas inferiores a 2 mm.

Num estudo realizado por Bastos et *al*. (2024) , verificou-se que o período ideal de exposição ao CO_2, ou seja, o período que conduz à máxima captura, nas condições de 23 °C, 60% de humidade relativa (HR) e 25% de concentração de CO_2, é de 5 horas para o MRA e de 12 horas para os agregados RCA e CC. Neste período ideal, os agregados MRA, RCA e CC capturam cerca de 11%, 5% e 16% de CO_2 por tonelada de pasta de cimento, que corresponde a 0,2%, 1% e 5% de CO_2 por tonelada de RCD, respetivamente. Estes resultados são considerados promissores no que diz respeito à capacidade de captura de CO_2 por parte de agregados reciclados.

Os agregados foram caracterizados em termos da massa volúmica das suas partículas e absorção de água antes e após a carbonatação forçada. Para a caracterização após carbonatação, uma fração dos três AR foi carbonatada numa câmara de CO_2 durante o período ideal de cada agregado nas seguintes condições: 23 °C, 60% de HR e 25% de CO_2, seguindo o procedimento descrito por Bastos et *al*. (2024). O Quadro 1 apresenta os valores da massa volúmica das partículas e absorção de água para o AN e para os AR não carbonatados e carbonatados; o AN apresentou os valores mais elevados de massa volúmica das partículas e mais baixos de absorção de água. A carbonatação forçada e acelerada dos AR levou a uma redução da sua absorção de água e da sua porosidade e, inversamente, a um aumento da sua massa volúmica. É notória uma melhoria das propriedades dos três AR após a carbonatação, através da redução da sua absorção de água (Quadro 1). A redução da absorção de água dos agregados carbonatados em relação aos não carbonatados foi mais notória para o CC (90%), sendo de aproximadamente 43% e 36% para o MRA e o RCA, respetivamente.

As argamassas foram produzidas com uma relação volumétrica ligante: agregado de 1:4 considerada adequada para argamassas cimentícias de revestimento, com cimento tipo CEM II/B-L 32,5 N como

ligante. Foi utilizada a mesma curva granulométrica - Figura 2 - para todos os agregados estudados de forma a obter argamassas comparáveis.

Quadro 1 - Massa volúmica das partículas e absorção de água do agregado natural e dos agregados reciclados

Agregado	Massa volúmica das partículas (kg/m³)		Absorção de água (%)	
	Não carbonatado	Carbonatado	Não carbonatado	Carbonatado
AN	2633 ± 4	-	0,25 ± 0,08	-
MRA	2485 ± 52	2570 ± 40	6,89 ± 0,91	3,90 ± 0,88
RCA	2636 ± 57	2694 ± 44	3,81 ± 0,54	2,45 ± 0,13
CC	2622 ± 7	2670 ± 9	4,74 ± 0,16	0,46 ± 0,04

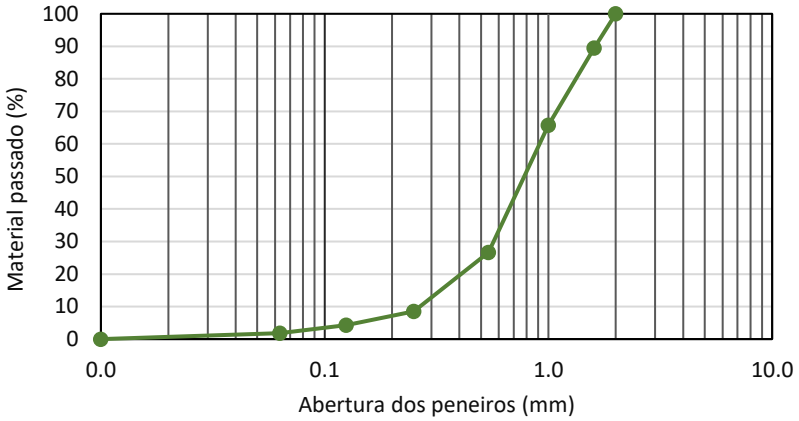


Figura 2 - Curva granulométrica dos agregados utilizados para a formulação das argamassas

Para a amassadura das argamassas, utilizou-se uma misturadora de laboratório, funcionando automaticamente a uma velocidade lenta para homogeneizar o ligante e o agregado no recipiente da misturadora. Durante os 30 segundos iniciais, foi gradualmente adicionada água (definida para atingir uma consistência por espalhamento adequada) ao recipiente com o mesmo movimento da misturadora. Foi efetuada uma pausa na mistura após 2,5 minutos para assegurar que os materiais estavam completamente misturados, raspando as bordas do recipiente. Posteriormente, com o mesmo movimento da misturadora, o processo de mistura foi reiniciado durante mais 30 segundos.

Para avaliar as características das argamassas com incorporação de AR carbonatados, foram formuladas argamassas substituindo o AN por cada AR (MRA, RCA e CC). Esta substituição por AR foi efetuada antes e após serem sujeitos a carbonatação forçada, numa câmara de carbonatação em condições de 23 °C, 60% de HR e 25% de CO_2 por 5 horas (MRA) e 12 horas (RCA e CC), em taxas de substituição de 50% e 100%, em volume. Adicionalmente, foi produzida uma argamassa apenas com AN, designada por argamassa de referência (REF).

Após a amassadura, provetes das 13 argamassas foram moldados em moldes metálicos com dimensões normalizadas (40 mm x 40 mm x 160 mm), produzindo seis provetes por argamassa. Estes foram mantidos em condições controladas a 20 ± 2 °C e 95 ± 5% de HR durante os primeiros dois dias, após os quais foram desmoldados e mantidos durante mais 5 dias nas mesmas condições. Os provetes foram então armazenados numa sala controlada com a mesma temperatura e uma HR de 65 ± 5%.

2.2 MÉTODOS

As argamassas produzidas foram caracterizadas em termos do seu estado fresco e comportamento mecânico, como observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Ensaios realizados para a caracterização das argamassas

Ensaio	**Idades analisadas (dias)**	**Norma**
Consistência por espalhamento	Estado fresco	EN 1015-3 (1999)
Massa volúmica fresca	Estado fresco	EN 1015-6 (1998)
Massa volúmica aparente	28, 90	EN 1015-10 (1999)
Módulo de elasticidade dinâmico (MED) por frequência de ressonância	28, 90	EN 14146 (2004)
Resistência à flexão	28, 90	EN 1015-11 (2019)
Resistência à compressão	28, 90	EN 1015-11 (2019)

A trabalhabilidade das argamassas foi avaliada com base na sua consistência por espalhamento. A argamassa fresca foi colocada num molde troncocónico em duas camadas, ajustadas ao molde com inserção de uma vareta. Após a remoção do molde, foram aplicados 15 golpes na mesa de espalhamento em 15 segundos. Seguidamente, o espalhamento da argamassa em duas direções perpendiculares foi medido, sendo a média dessas medidas o resultado de cada ensaio. A massa volúmica no estado fresco das argamassas foi avaliada através da sua compactação num recipiente cilíndrico de volume e massa conhecidos. Depois de retirado o excesso de argamassa, pesou-se todo o conjunto para determinar a massa volúmica da argamassa.

A determinação da massa volúmica aparente das argamassas endurecidas foi realizada através da medição das dimensões dos provetes prismáticos, determinando assim o seu volume, e da sua massa. Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MDE), foi utilizado o método de frequência de ressonância, utilizando três provetes prismáticos sujeitos a vibrações induzidas pelo equipamento (ZRM ZEUS 2005). A resistência à flexão das argamassas foi avaliada utilizando uma máquina universal (ETI-HM-S/CPC da PROETI, S.A.) com um dispositivo de flexão de três pontos e uma célula de carga de 2 kN. A força máxima aplicada durante o ensaio foi registada e a resistência à flexão foi determinada utilizando a equação da norma. Metade de cada provete ensaiado foi então utilizada para o ensaio de resistência à compressão, utilizando uma célula de carga de 200 kN e o mesmo equipamento. A força de compressão máxima antes da rotura foi registada para calcular a resistência à compressão, pelo quociente com a área de compressão.

3 RESULTADOS

3.1 ESTADO FRESCO

Para as argamassas de revestimento, a razão água/cimento (a/c) é determinada com vista a uma trabalhabilidade adequada. No caso das argamassas formuladas, essa relação foi estabelecida experimentalmente, com um valor de espalhamento de 160 ± 10 mm. Os resultados das propriedades das argamassas no estado fresco encontram-se no Quadro 3 para a REF e para as argamassas formuladas com MRA, RCA e CC, não carbonatados e carbonatados. A incorporação de AR nas argamassas provocou um ligeiro aumento da razão a/c comparativamente à argamassa de referência.

Tal significa que a incorporação de AR de um modo geral aumentou a quantidade de água necessária para obter a consistência requerida.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios realizados das argamassas em estado fresco

Argamassa	Razão a/c	Consistência por espalhamento (mm)	Massa volúmica (kg/m³)
REF	1,0	162 ± 1	2060 ± 14
MRA50	1,1	163 ± 2	1908 ± 18
MRA50C	1,1	161 ± 1	1916 ± 4
MRA100	1,2	164 ± 1	1901 ± 5
MRA100C	1,2	162 ± 1	1911 ± 10
RCA50	1,2	163 ±2	1908 ± 18
RCA50C	1,1	161 ± 1	1916 ± 4
RCA100	1,2	164 ± 1	1901 ± 5
RCA100C	1,2	162 ± 1	1911 ± 10
CC50	1,1	169 ± 1	2008 ± 4
CC50C	1,0	163 ± 3	2008 ± 6
CC100	1,2	163 ± 2	1851 ± 1
CC100C	1,1	163 ± 3	1903 ± 10

No entanto, a carbonatação teve um efeito positivo ao reduzir a absorção de água dos AR e aumentar a massa volúmica das partículas, o que implica uma redução da razão a/c.

A argamassa de referência, produzida apenas com AN, apresentou uma massa volúmica de 2060 ± 14 kg/m³, superior à das restantes argamassas. Através do Quadro 3, observa-se ainda que, quanto maior a substituição de AN por AR, menor é a massa volúmica das argamassas, devido principalmente à massa volúmica das partículas, que é superior para o AN em relação aos AR (Quadro 1). No entanto, as argamassas com AR carbonatados não sofreram alterações significativas na sua massa volúmica quando comparadas com as argamassas com agregados não carbonatados.

3.2 ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Massa volúmica aparente

Os resultados obtidos para a massa volúmica aparente das argamassas, a 28 e 90 dias de ensaio, encontram-se representados na Figura 3. Verificou-se uma redução da massa volúmica aparente das argamassas à medida que aumenta a taxa de incorporação de AR. Esta diminuição poderá ser provavelmente atribuída à maior porosidade e menor massa volúmica dos AR em relação ao AN. Não se registaram diferenças significativas na massa volúmica aparente das argamassas com AR carbonatados em comparação com as argamassas com AR não carbonatados.

3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4, estão representados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Como se pode verificar, a argamassa REF apresentou o valor mais elevado de MED, enquanto para as argamassas com AR provenientes de OGR (MRA e RCA) o MED diminuiu com o aumento do seu grau de incorporação.

Apesar da diminuição geral do MED com a incorporação de AR carbonatados, a 28 dias a argamassa RCA50C apresentou um aumento de 12%, enquanto a argamassa MRA50C apresentou a 90 dias um aumento de cerca de 15% no seu MED relativamente às respetivas argamassas com AR não carbonatados.

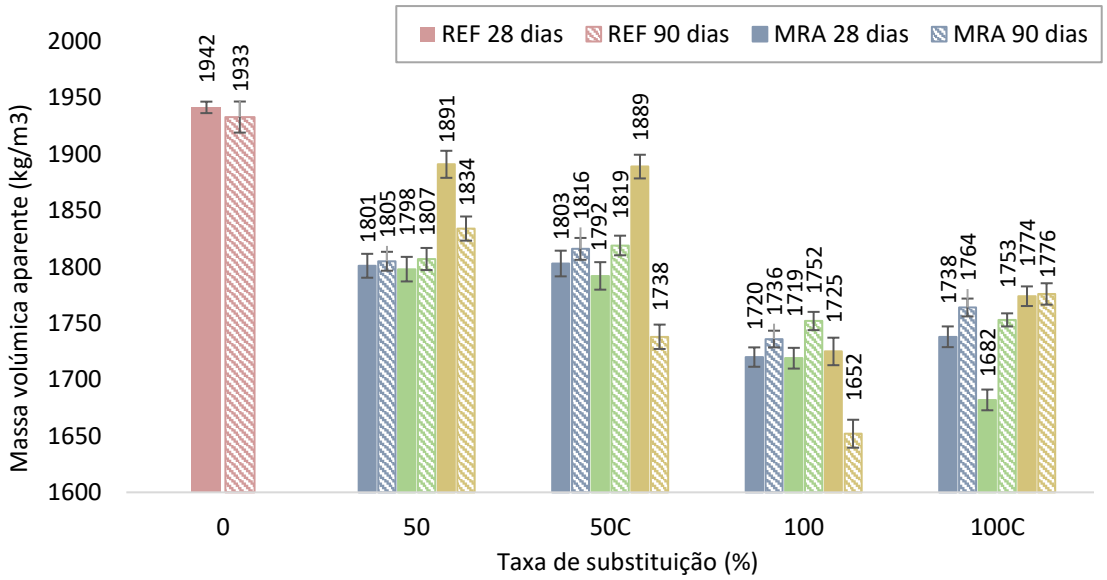


Figura 3 - Massa volúmica aparente das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

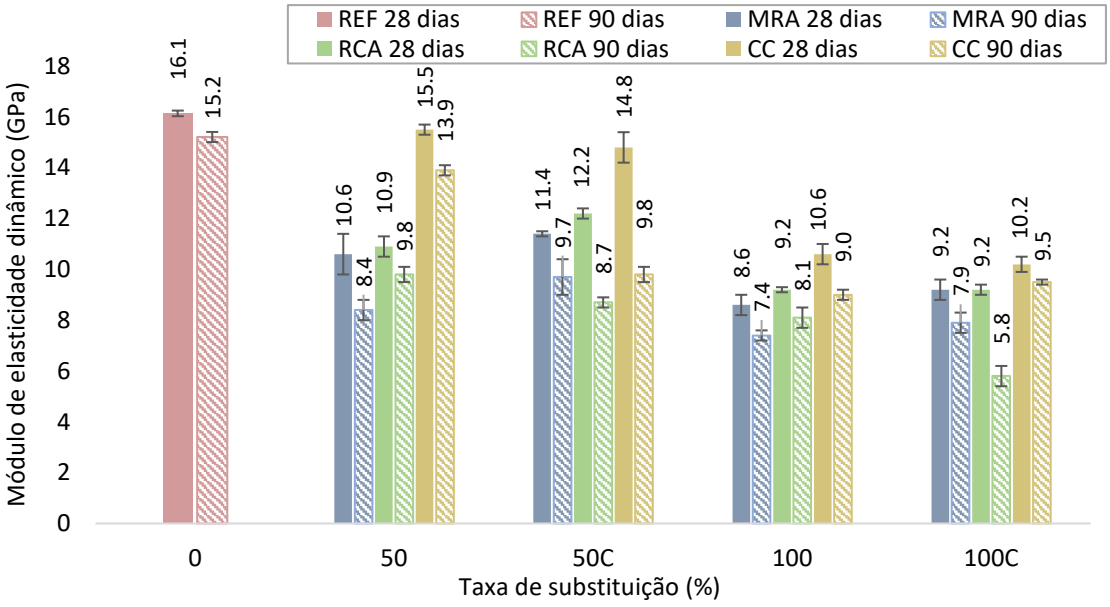


Figura 4 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

Com base nos resultados do MED obtidos para as argamassas que contêm AR carbonatados, verificou-se uma clara tendência de diminuição dos valores em comparação com as argamassas com AR não carbonatados. Este decréscimo poderá dever-se à maior microporosidade dos AR carbonatados provocada pela descalcificação do C-S-H, como resultado da carbonatação forçada, resultando em decréscimos de porosidade e MED. Este efeito é mais notório para as argamassas com RCA e CC que possuem teores de materiais passiveis de serem carbonatados superiores aos das argamassas com MRA.

3.2.3 Resistência à flexão e à compressão

As argamassas formuladas com AR apresentaram uma diminuição das suas resistências mecânicas, comparativamente à argamassa de referência (Figura 5 e Figura 6). Relativamente às argamassas formuladas com AR não carbonatados, as argamassas com CC apresentaram resistências superiores às de MRA e RCA. Tal deve-se à constituição dos AR, uma vez que o agregado CC possui um maior teor de pasta de cimento e pedra natural, agregados não ligados e ligados hidraulicamente.

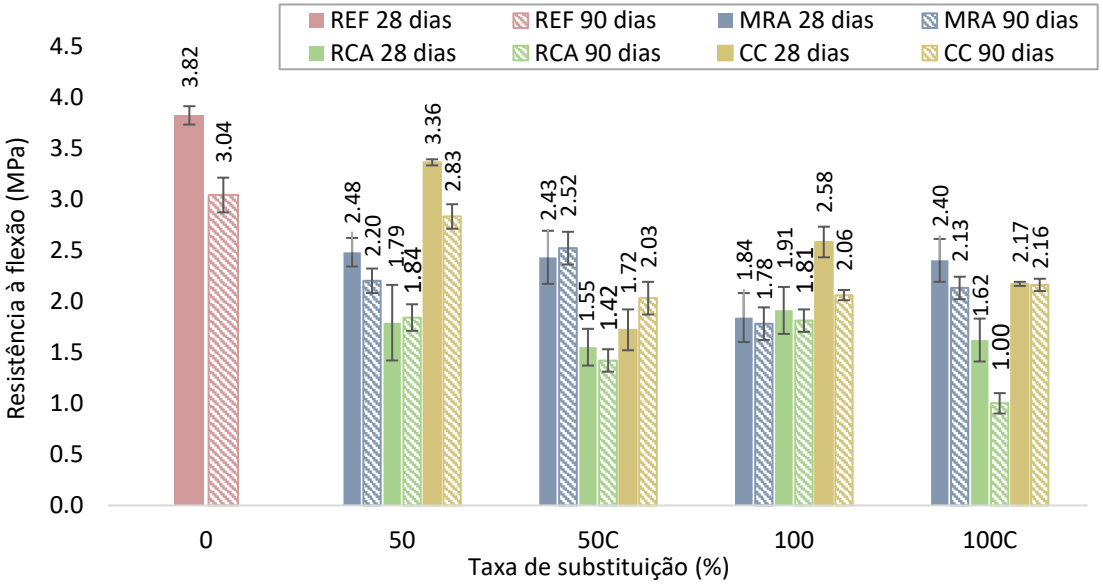


Figura 5 - Resistência à flexão das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

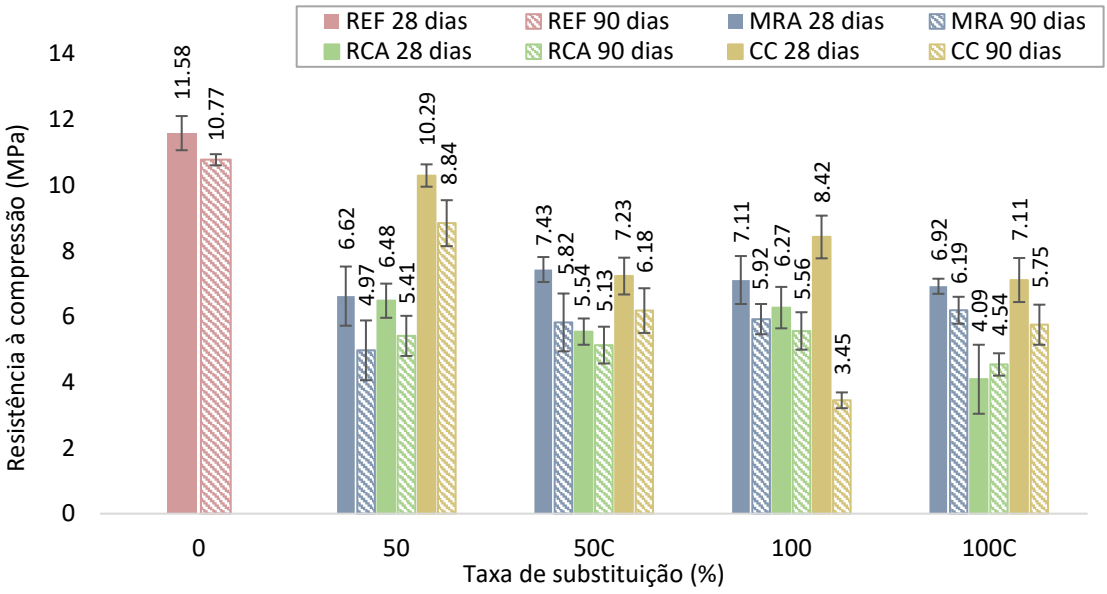


Figura 6 - Resistência à compressão das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

Comparando as argamassas com AR não carbonatados e AR carbonatados, observam-se algumas diferenças na resistência à flexão. A 28 dias, a argamassa MRA100C apresentou uma resistência à flexão 30% superior à correspondente argamassa com agregados não carbonatados (MRA100). A argamassa MRA50C apresentou uma resistência à flexão muito semelhante à da argamassa com 50%

de MRA não carbonatado. Quando ensaiadas a 90 dias, observaram-se aumentos de 15% e 20% na resistência à flexão das argamassas MRA50C e MRA100C, respetivamente, em relação às argamassas MRA50 e MRA100. Assim, as argamassas com 50% e 100% de MRA carbonatado apresentaram, em geral, ligeiras melhorias na resistência à flexão em relação às não carbonatadas, enquanto a incorporação de RCA e CC carbonatados não produziu melhorias na sua resistência à flexão em relação às argamassas com RCA e CC não carbonatados.

Tal como na resistência à flexão, apenas se verificaram melhorias da resistência à compressão das argamassas com MRA carbonatado. A 28 dias, a argamassa MRA50C apresentou uma resistência à compressão 12% superior à argamassa MRA50, enquanto a argamassa MRA100C não mostrou alterações comparativamente a MRA100. A 90 dias, a tendência é similar, ou seja, a argamassa MRA50C apresentou uma resistência à compressão 17% superior à da argamassa MRA50. À semelhança da resistência à flexão, geralmente verificaram-se reduções da resistência à compressão das argamassas de 28 para 90 dias, que se poderá dever a fenómenos de microfissuração interna.

Como resultado da alteração na microestrutura dos AR devida à carbonatação, é expectável um aumento do número de microporos e uma redução significativa dos poros capilares (Haga *et al*. 2005, Sereng *et al.* 2021). Este aumento da microporosidade dos AR deve-se aos efeitos de descalcificação dos C-S-H decorrente da carbonatação (Houst, 1997). Ainda, segundo Swenson e Sereda (1968), a carbonatação pode contribuir para a retração da pasta de cimento através da polimerização e desidratação dos C-S-H, originando microfissuras em pontos fracos da matriz cimentícia. Estas microfissuras podem desenvolver-se na zona de transição interfacial entre a antiga matriz de cimento e os antigos agregados presentes nos AR (Liang *et al.* 2020). Desta forma, o aumento dos microporos dos AR e a possível retração resultantes da carbonatação podem originar a perda global das resistências mecânicas das argamassas nas quais são incorporados os AR carbonatados (Segura *et al.* 2013). Assim, quanto maior for o teor de Portlandite ($Ca(OH)_2$) e C-S-H, maior será o aumento de porosidade dos AR carbonatados e consequente perda da resistência mecânica das argamassas nas quais estes são incorporados. Tal verifica-se pelos resultados obtidos, uma vez que as argamassas CC50C e CC100C foram as que apresentaram maiores reduções comparativamente às respetivas argamassas com CC não carbonatado. A tendência inversa verificou-se para as argamassas com o MRA carbonatado, que apresentaram resistências idênticas ou superiores (MRA50C) às argamassas com MRA não carbonatado. Tal pode dever-se a possuírem menores teores de fração cimentícia passível de carbonatar, logo os efeitos negativos da carbonatação serem menos significativos.

A resistência à compressão de argamassas (aos 28 dias) de rebocos pode ser classificada de acordo com a norma EN 998-1 (2016) em diversas classes de resistência. Comparando as classes de resistência à compressão das argamassas, todas as argamassas com AR não carbonatados estão na mesma classe do que a REF (CS IV). Apenas as argamassas com RCA carbonatado têm uma classe inferior (CS III) à das correspondentes argamassas com RCA não carbonatados, tendo as restantes argamassas com AR carbonatados (MRA e CC) a mesma classe (CS IV) que a REF e as argamassas contendo AR não carbonatados. De acordo com os requisitos da mesma norma, para uma utilização de argamassas para uso geral como rebocos exteriores e interiores, as argamassas estudadas são classificadas nas classes superiores da norma. Assim, as argamassas contendo AR não carbonatados e carbonatados cumprem os requisitos em termos de resistência à compressão.

4 CONCLUSÕES

Três agregados reciclados (AR) - um misto (MRA), um de betão obtido em obra (RCA) e um de betão produzido em laboratório (CC) - foram moídos e peneirados, tendo sido incorporados tal qual (não

carbonatados) e depois de carbonatados a 23 °C, 60% HR e 25% de CO_2, em argamassas cimentícias como substituto parcial (50%) ou total (100%) do agregado natural (AN). Avaliou-se o efeito da substituição do AN por estes AR, carbonatados e não carbonatados, no comportamento das argamassas.

A incorporação de AR nas argamassas apresentou uma tendência ligeira de aumento da relação a/c, principalmente quando não carbonatado, e levou a uma redução da sua massa volúmica aparente, devendo-se, provavelmente, à microestrutura mais porosa do AR e à sua menor massa volúmica em relação ao AN. Para além disso, não foram observadas variações significativas na massa volúmica aparente entre argamassas com AR não carbonatados e carbonatados.

O módulo de elasticidade dinâmico foi superior para a argamassa de referência, diminuindo com o aumento da incorporação de AR. Em geral, os AR carbonatados reduziram o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em relação ao AR não carbonatados. A incorporação de RCA e CC carbonatados nas argamassas conduziu a menores resistências mecânicas, em comparação com as argamassas com RCA e CC não carbonatados. No entanto, as argamassas com MRA carbonatado apresentaram resistências mecânicas superiores às argamassas com MRA não carbonatado. A diminuição de resistências verificada para as argamassas com RCA e CC carbonatados face às argamassas com RCA e CC não carbonatados foi, possivelmente, devida ao aumento da microporosidade dos AR induzido pela carbonatação e fenómenos de microfissuração, que é tanto maior quanto maior for o teor de Portlandite e C-S-H disponíveis para carbonatação, como se verificou para as argamassas com CC carbonatado.

No entanto, as resistências das argamassas modificadas são adequadas para argamassas de revestimento. Adicionalmente deve notar-se que, embora os resultados do desempenho mecânico sejam inferiores ou semelhantes, as argamassas com agregados carbonatados deverão apresentar uma menor pegada de CO_2 quando comparadas com as argamassas com agregados não carbonatados devido à captura de CO_2 por parte dos agregados reciclados e à redução de materiais virgens, devendo este aspeto ser quantificado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

Bastos, D., Brazão Farinha, C., Maia Pederneiras, C., Veiga, R., Bogas, J.A., Infante Gomes, R., Santos Silva, A. (2024). Pathway to carbon neutrality in the cement industry: CO_2 uptake by recycled aggregates from construction and demolition waste. Applied Sciences, 14:5224. https://doi.org/10.3390/app14125224

EN 998-1 (2016), Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. CEN, Brussels.

EN 1015-3 (1999), Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN, Brussels.

EN 1015-6 (1998), Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. CEN, Brussels.

EN 1015-10 (1999), Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. CEN, Brussels.

EN 1015-11 (2019), Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN, Brussels.

EN 14146 (2004), Natural stone test methods. Determination of the dynamic elastic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). CEN, Brussels.

Chinzorigt, G., Lim, M. K., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., Choi, D. (2020). Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO_2 treated recycled fine aggregate. Cement and Concrete Research 136:106062. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062

European Commission Directorate-General for Internal market, Industry, Entrepreneurship and SMEs(2016). EU Construction & Demolition Waste Management Protocol. September:1–49. file:///C:/Users/Paulina%20Faria/Downloads/Protocol%20Ares(2016)5840668-101016.pdf

Gholizadeh-Vayghan, A., Bellinkx, A., Snellings, R., Vandoren, B., Quaghebeur, M. (2020). The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. Construction and Building Materials, 257:119486. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.11948

Haga, K., Shibata, M., Hironaga, M., Tanaka, S., Nagasaki, S. (2005). Change in pore structure and composition of hardened cement paste during the process of dissolution. Cement and Concrete Research, 35(5):943–950. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.001

Houst, Y. F. 1997. Carbonation shrinkage of hydrated cement paste. Proceedings 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. CANMET, Ottawa, Canada.

Infante Gomes, R., Brazão Farinha, C., Veiga, R., de Brito, J., Faria, P., Bastos, D. (2021). CO_2 sequestration by construction and demolition waste aggregates and effect on mortars and concrete performance - An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152:111668. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111668

Liang, C., Pan, B., Ma, Z., He, Z., Duan, Z. (2020). Utilization of CO_2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. Cement and Concrete Composites, 105:103446. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446

Muñoz, A., Torres, N., Guzmán, A. (2019). Evaluación de un mortero preparado con agregados reciclados de un concreto mejorado por carbonatación. Revista Ingeniería de Construcción, 34(1):25–32. ISSN 0718-5073

Pu, Y., Li L., Shi, X.,Wang, Q., Abomohra, A. (2022). Improving recycled concrete aggregates using flue gas based on multicyclic accelerated carbonation: Performance and mechanism. Construction and Building Materials, 361:129623. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129623

Russo N., Lollini, F. (2022). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. Journal of Building Engineering, 51:104290. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104290

Salvia M., et al., (2021). Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135:110253, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110253

Sanjuán, M. Á., Andrade C., Mora, P., Zaragoza, A. (2020) Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. Applied Sciences, 10(2):646. https://doi.org/10.3390/app10020646

Segura, I., Molero, M., Aparicio, S., Anaya, J. J., Moragues, A. (2013). Decalcification of cement mortars: Characterisation and modelling. Cement and Concrete Composites, 35(1):136-150. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.015

Sereng, M., Djerbi, A., Metalssi, O. O., Dangla, P., Torrenti, J. M. (2021). Improvement of recycled aggregates properties by means of CO_2 uptake. Applied Sciences, 11(14):6571.

https://doi:10.3390/app11146571

Swenson, E. G., Sereda, P. J. (1968). Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. Journal of Applied Chemistry, 18(4):111-117. https://doi: 10.1002/jctb.5010180404

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MATERIAIS COMPÓSITOS DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS DE CASCA DE ARROZ E FIBRA DE CANA PARA PLACAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Alana da Silva [a]; Florindo Gaspar [a]; Aliaksandr Bakatovich [b]

[a] CDRSP - Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto, Instituto Politécnico de Leiria, 2430-028, Zona Industrial, Marinha Grande, Portugal, alana.silva@ipleiria.pt, florindo.gaspar@ipleiria.pt

[b]Faculty of Civil Engineering, Polotsk State University, Blokhin Str., 29, 211440 Novopolotsk, Bielorrússia, a.bakatovich@psu.by

RESUMO

Práticas sustentáveis na área da construção civil têm-se tornado frequentes nos últimos anos, impulsionadas pelo reconhecimento desta indústria como responsável por grande percentagem do consumo energético e de matérias-primas do mundo. Desta forma, procura-se utilizar novos materiais e técnicas construtivas que permitam reduzir os impactos ambientais causados pela construção civil.

Em Portugal, a casca de arroz é um resíduo agrícola gerado em grande quantidade e apresenta grande potencial para ser aplicada em materiais de isolamento térmico, assim como a cana da espécie *Arundo donax* L., considerada uma planta invasora em território português. Neste trabalho foram desenvolvidas 22 composições de placas, utilizando casca de arroz e/ou fibra de cana, e incorporando silicato de sódio como aglomerante. O objetivo deste estudo foi avaliar as características físico-mecânicas das placas desenvolvidas, através de ensaios de fluxo térmico, resistência à flexão e absorção de humidade. Os resultados obtidos para a condutibilidade térmica foram positivos nas placas testadas, apresentando valores entre 0,0602 e 0,0745 W/mK, indicando resultados promissores para aplicação enquanto isolamento térmico face ao desempenho das composições estudadas no contexto da construção civil. Os resultados de resistência à flexão e absorção de água apresentaram valores dentro da gama esperada para materiais de origem vegetal.

Palavras-chave: Isolamento térmico, construção sustentável, resíduos agrícolas, casca de arroz, fibra de cana.

1 INTRODUÇÃO

Encontrar medidas para reduzir o consumo de energia desde a construção até à demolição de edifícios é um grande desafio para o setor da construção (Asdrubali *et al*., 2015). O consumo de energia na fabricação de materiais de construção é muito elevado, por isso o uso de materiais que necessitam de menos energia no seu processo de produção é uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pela alta demanda energética deste setor. Assim, materiais de construção tradicionais podem ser substituídos por materiais de fontes renováveis, total ou parcialmente (Melo *et al*. 2011).

O uso de matérias-primas obtidas a partir de resíduos vegetais permite a adoção de um modelo de economia circular, resultando na valorização económica dos resíduos orgânicos (Dikmen *et al*. 2016). Além disso, o uso de matérias-primas naturais em materiais de isolamento térmico pode contribuir para a eficiência energética dos edifícios, reduzindo as emissões de gases, tornando esta abordagem uma forma de mitigar as alterações climáticas e os impactos ambientais (Navroski *et al*. 2010).

O uso potencial destes resíduos como fontes de matérias-primas para materiais de isolamento térmico tem sido amplamente reconhecido em diversos estudos e pode ser considerado uma das alternativas para minimizar os impactos causados pelo setor agroindustrial (Gaspar *et al*. 2020). Com crescentes preocupações sobre a disposição adequada destes resíduos e a busca por materiais de construção mais sustentáveis, existem vários estudos focados na aplicação de resíduos agrícolas como matérias-primas para materiais de isolamento térmico na indústria da construção.

No estudo de Yarbrough *et al.* (2005), foram produzidos painéis usando casca de arroz triturada. O estudo concluiu que a casca pode ser usada no seu estado natural sem a necessidade de gastar energia em processos de secagem. Rosa *et al.* (2015) utilizou casca de arroz juntamente com talos de girassol para produzir painéis de isolamento térmico para aquecedores solares de água. Rama (2014) desenvolveu eco-painéis compostos por madeira, palha e/ou casca de arroz. Muthuraj *et al.* (2019) produziram compósitos biodegradáveis utilizando subprodutos, como casca de arroz, casca de trigo, fibras de madeira e resíduos têxteis, todos os quais apresentaram boa condutibilidade térmica.

Num estudo sobre canas por Ferrández-García *et al.* (2014), foi desenvolvido um painel de isolamento térmico composto por três camadas, com as camadas externas compostas por cana triturada e a camada interna feita de canas inteiras. Andreu-Rodriguez *et al.* (2013) conduziram um estudo utilizando painéis de caule de cana com 18 composições diferentes, variando o tamanho das partículas. No estudo de Baltrushevich (2020), foram desenvolvidos painéis ecológicos de isolamento térmico baseados em cana e palha trituradas. O estudo de Benallel *et al.* (2021) foi realizado para desenvolver e caracterizar materiais de isolamento térmico a partir de resíduos de cartão e fibras vegetais.

Este trabalho apresenta uma investigação no campo dos materiais de construção sustentáveis, abordando o uso combinado de casca de arroz e fibra de cana, ambos resíduos agrícolas encontrados abundantemente no território português. A cultura do arroz é a terceira maior cultura cerealífera do mundo, e o volume da casca de arroz corresponde a cerca de 20% da massa total do grão antes de ser descascado (FAO, 2023). A cana é uma planta que consiste na principal matéria-prima para a produção de açúcar e álcool no mundo, é adaptável a diferentes climas e tipos de solo, e está presente em diversas regiões do mundo (Barreca e Fichera, 2013). O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e avaliação de soluções de materiais compósitos sustentáveis para o isolamento térmico de edifícios. O trabalho consiste especificamente na experimentação de várias composições em forma de placas com casca de arroz e/ou fibra de cana, usando silicato de sódio como material aglomerante. Estas placas foram desenvolvidas para serem aplicadas em paredes e tetos de edifícios.

Através da experimentação, o objetivo é avaliar as propriedades físicas e mecânicas das diferentes composições, como a condutibilidade térmica, resistência à flexão e absorção de água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Fibras

A casca de arroz (Figura 1) utilizada neste estudo provém da espécie *Oryza sativa*, subespécie Japonica, obtida da região da Beira Litoral, Portugal. O material não sofreu qualquer processamento ou tratamento especial, foi simplesmente armazenado em sacos protegidos da luz, calor e humidade. A casca de arroz tem dimensões que variam entre 3 e 5 mm. É um resíduo gerado em grandes volumes diários e ainda não é bem aproveitado (Walter *et al.* 2008).

A fibra de cana (Figura 2) utilizada neste estudo foi obtida dos caules da espécie *Arundo donax L.*, proveniente da região de Leiria, Portugal. É considerada uma espécie invasora no território português de acordo com o Decreto-Lei n.º 92 (2019). O material foi seco em uma estufa a 50 °C e depois passou pelo processo de moagem. Após o material foi peneirado e separado em frações com base no tamanho das partículas. As frações utilizadas foram com dimensões entre 0,25–2mm (54% do material peneirado). De acordo com um estudo anterior de Baltrushevich (2020), este tamanho de partículas apresenta o melhor desempenho para aplicações em isolamento térmico.

Figura 1 - Casca de arroz.

Figura 2 - Fibra de cana.

2.1.2 Aglomerante

A solução líquida de silicato de sódio, fornecida pela Quimialmel, foi utilizada como aglomerante. O material é um líquido viscoso e transparente. Tem pH entre 10,5 e 13, viscosidade de 135 cP e massa volúmica de 1,368 g/cm³. Uma das vantagens de utilizá-lo como aglomerante é a sua não combustibilidade, proporcionando maior segurança em caso de incêndios em edifícios, além da sua boa aderência a substratos à base de plantas (Bialosau 2017; Bakatovich *et al.* 2022).

2.2 COMPOSIÇÃO E PREPARAÇÃO DAS PLACAS

Neste estudo, foram testadas 22 diferentes composições de placas utilizando casca de arroz e/ou fibra de cana como agregados e silicato de sódio como aglomerante. Todas as placas foram preparadas utilizando um molde metálico com dimensões de 300 × 300 × 30 mm. Após a mistura das fibras com o aglomerante, o material foi colocado no molde com a tampa fixada e permaneceu fechado durante um período mínimo de 6 horas em temperatura ambiente. Em seguida, o material retirado do molde e colocado numa estufa para secagem a uma temperatura de 50 °C. A Tabela 1 mostra as dimensões finais médias das placas para cada composição. Um exemplo de uma placa acabada pode ser visto na Figura 3.

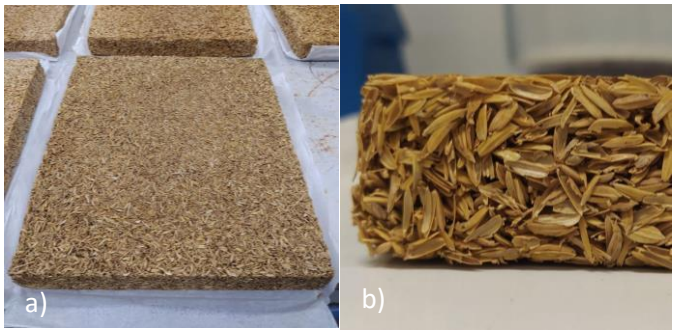


Figura 3 - Placa compósita depois de removida do molde: (a) vista superior e (b) vista lateral.

Tabela 1 - Composições, proporções, dimensões e condições das placas

Nº Composição	Composição (g)			Proporção Agregados:Silicato (%)	Dimensões (cm)
	Casca de arroz	Fibra de cana	Silicato de sódio		
1	400	-	350	53:47	29,8 × 29,8 × 3,0
2			400	50:50	29,8 × 29,8 × 2,9
3			500	44:56	29,9 × 29,8 × 2,9
4			600	40:60	29,6 × 29,6 × 3,0
5	450	-	400	53:47	30,0 × 29,9 × 3,0
6			500	47:53	29,9 × 29,9 × 3,0
7			600	43:57	29,9 × 29,9 × 3,0
8	200	300	400	56:44	29,8 × 29,7 × 3,0
9			500	50:50	29,6 × 29,7 × 3,0
10	250	250	400	56:44	30,0 × 29,9 × 3,0
11			500	50:50	30,0 × 29,9 × 3,0
12	300	200	350	59:41	29,8 × 29,8 × 3,0
13			400	56:44	29,8 × 29,8 × 3,0
14			500	50:50	29,7 × 29,8 × 3,0
15	300	300	400	60:40	29,8 × 29,8 × 3,0
16			500	55:45	30,0 × 29,9 × 3,0
17			600	50:50	29,9 × 29,9 × 3,0
18	350	50	400	50:50	29,8 × 29,8 × 3,0
19			500	44:56	29,8 × 29,8 × 3,0
20	400	100	400	56:44	29,9 × 29,9 × 3,0
21			500	50:50	29,9 × 29,9 × 3,0
22	-	800	400	67:33	30,0 × 29,9 × 3,0

2.3 MÉTODOS DE ENSAIO

2.3.1 Condutibilidade Térmica

Para determinar a condutibilidade térmica (λ) das diferentes composições, as placas foram submetidas a testes no equipamento LM.PLUS 305, em conformidade com a norma ISO 8301 (1991) e seguindo os procedimentos da norma EN 12667 (2001). O equipamento é composto por uma placa de arrefecimento na parte inferior e uma placa de aquecimento na parte superior. A temperatura da placa de arrefecimento definida para este teste foi de 10 °C, e da placa de aquecimento de 40 °C. Com as temperaturas definidas, o equipamento operou durante uma média de 120 minutos para alcançar um valor estável de condutibilidade térmica. O teste foi repetido cinco vezes para cada composição.

2.3.2 Resistência à Flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado em cinco provetes para cada composição, seguindo a norma EN 12089 (1999), utilizando o equipamento Universal Testing Machine – Instron 4505. Os provetes tinham dimensões de 300 x 50 x 30 mm. O ensaio consistiu na flexão em três pontos,

utilizando três cilindros com um diâmetro de 80 mm, onde dois cilindros serviram como suporte e um como carga. Os cilindros de suporte foram espaçados 200 mm do centro do provete, e o cilindro de carga foi posicionado no centro. A carga foi aplicada a uma velocidade de 10 mm/min.

A resistência à flexão foi calculada pela seguinte Equação 1:

$$\sigma_f = \frac{3 \times F_m \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (1)$$

onde:

σ_f é a resistência à flexão (MPa), F_m é a carga máxima (N), L é a distância entre os apoios (mm), b é a largura do provete (mm), e d é a espessura do provete (mm).

2.3.3 Absorção de Água

A absorção de água dos materiais foi determinada utilizando uma câmara climática, modelo Sunrise SU340ES 2010, que permitiu o controlo da temperatura e humidade. Para este teste, as placas foram cortadas em provetes com dimensões de 150 × 50 × 30 mm. Devido às limitações de espaço dentro da câmara, apenas 10 composições foram selecionadas para realizar este ensaio, com três provetes para cada composição. Os provetes foram colocados na câmara climática, a uma temperatura de 20 °C e humidade relativa de 60 %, até atingirem um valor de massa constante. Esta etapa garantiu que todos os provetes tivessem as mesmas condições iniciais de temperatura e humidade. Uma vez estabilizada a massa dos provetes, a humidade relativa foi aumentada para 95%, mantendo a temperatura a 20 °C.

Após a exposição ao nível elevado de humidade na câmara climática e a massa estabilizada, a absorção de água foi calculada de acordo com a Equação 2:

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

onde:

W_m é a absorção de água (%), m_1 é a massa seca (g), e m_2 é a massa húmida (g).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

3.1.1 Placas de casca de arroz

A Tabela 2 apresenta os resultados de condutibilidade térmica obtidos para as composições 1-7, compostas por casca de arroz e silicato de sódio, juntamente com as suas respetivas composições e massas volúmicas. Adicionalmente, também realizou-se uma classificação da condição das placas, sendo classificadas como não-rígida (material desprende-se facilmente), semirrígida (perde algum material superficial) e rígida (mantém a forma, sem grande perda de material). Com base nos dados da Tabela 2, o gráfico na Figura 4 ilustra as curvas para o aumento da condutibilidade térmica em relação ao aumento de silicato de sódio nas composições com 400 g e 450 g de casca de arroz.

A Composição 1 apresentou os melhores resultados de condutibilidade térmica, com a menor massa volúmica (0,213 g/cm³). No entanto, a baixa quantidade de aglomerante nesta mistura tornou a placa mais frágil. Na Composição 2 adicionou-se 50 g de silicato de sódio na mistura em relação à Composição 1, resultando num aumento de 2,1% na massa volúmica e de 2,6% no valor da condutibilidade térmica. A Composição 3, com mais 100 g de silicato de sódio em relação à Composição 2, teve um aumento de 4,9% na massa volúmica e de 4,3% na condutibilidade térmica. A Composição 4, com mais 100 g de silicato de sódio em relação à Composição 3, teve um aumento de 4,2% na massa volúmica e de 2,5% na condutibilidade térmica. Isto indica que para cada 100 g de silicato de sódio

adicionados às composições, houve um aumento na massa volúmica que variou entre 4,2% e 4,9%, e consequentemente, um aumento de 2,5% a 4,3%.na condutibilidade térmica.

Quando adicionados mais 50 g de casca de arroz às composições, também observou-se um aumento na condutibilidade térmica. A Composição 5, em relação à Composição 2, teve um aumento de 4,1% na massa volúmica e de 1,3% na condutibilidade térmica. A mesma tendência foi observada para a Composição 6 em relação à Composição 3, e para a Composição 7 em relação à Composição 4, onde a adição de 50 g de casca de arroz resultou num aumento de 6,2% e 4,4% na massa volúmica, e de 1,9% e 2,5% na condutibilidade térmica, respetivamente.

Ao comparar as composições 5, 6 e 7, pode-se observar que a adição de 100 g de silicato de sódio a estas composições levou a um aumento na massa volúmica que variou entre 2,5% e 7,1% e um aumento na condutibilidade térmica entre 2,9% e 5%.

O aumento da massa volúmica causado pela adição de silicato de sódio mostrou que para cada 100 g de aglomerante adicionados, houve um aumento de até 7,1% na massa volúmica, o que se traduz num aumento de 2,5% a 7,8% na condutibilidade térmica do material. Materiais com menor massa volúmica tendem a ter um melhor desempenho em isolamento térmico devido à presença de poros preenchidos com ar na sua estrutura, que restringem a transferência de calor. Portanto, quanto menor a massa volúmica, maior o potencial para isolamento térmico (Incropera *et al.* 2011).

Tabela 2 - Massa volúmica e condutibilidade térmica das placas com casca de arroz.

Nº	Composição (g)		Massa volúmica	Condutibilidade	Desvio Padrão	Condição da
Composição	Casca de Arroz	Silicato de Sódio	(g/cm³)	Térmica (W/mK)	Cond. Térmica	Placa
1	400	350	0,240	0,0613	0,0012	Não-rígida
2		400	0,245	0,0629	0,0010	Semirrígida
3		500	0,257	0,0656	0,0010	Rígida
4		600	0,268	0,0672	0,0010	Rígida
5	450	400	0,255	0,0637	0,0010	Semirrígida
6		500	0,273	0,0669	0,0010	Rígida
7		600	0,280	0,0689	0,0010	Rígida

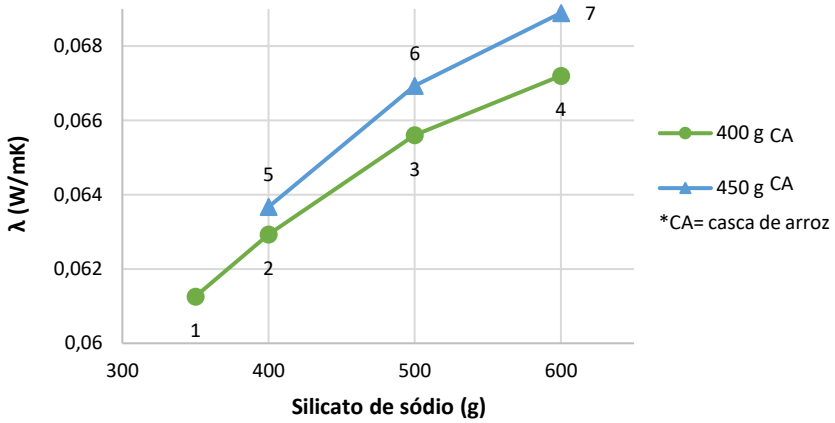


Figura 4 - Condutibilidade térmica das composições com casca de arroz.

3.1.2 Placas de casca de arroz e fibra de cana

A Tabela 3 apresenta os resultados de condutibilidade térmica obtidos para as composições 8-22, compostas por casca de arroz, fibra de cana e silicato de sódio, juntamente com a sua respetiva composição, massa volúmica e condição das placas. Com base nos dados apresentados na Tabela 3,

pode-se observar que a adição de fibra de cana às misturas resultou num aumento da condutibilidade térmica das placas em comparação com as composições somente com casca de arroz. O gráfico na Figura 5 ilustra as curvas de aumento da condutibilidade térmica em relação ao aumento de silicato de sódio nas composições com fibra de cana e casca de arroz.

Tabela 3 - Massa volúmica e condutibilidade térmica de amostras com casca de arroz e fibra de cana

Nº	Composição (g)			Massa Volúmica	Cond. Térmica	Desvio Padrão	Condição das
Composição	Casca de Arroz	Fibra de Cana	Silicato de Sódio	(g/cm³)	(W/mK)	Cond. Térmica	Placas
8	200	300	400	0,269	0,0712	0,0012	Semirrígida
9			500	0,299	0,0736	0,0010	Rígida
10	250	250	400	0,275	0,0699	0,0010	Semirrígida
11			500	0,297	0,0726	0,0012	Rígida
12	300	200	350	0,254	0,0634	0,0011	Não-rígida
13			400	0,273	0,0666	0,0012	Semirrígida
14			500	0,302	0,0681	0,0010	Rígida
15	300	300	400	0,288	0,0704	0,0012	Semirrígida
16			500	0,323	0,0732	0,0011	Rígida
17			600	0,352	0,0745	0,0010	Rígida
18	350	50	400	0,219	0,0602	0,0011	Semirrígida
19			500	0,240	0,0627	0,0012	Rígida
20	400	100	400	0,255	0,0689	0,0011	Semirrígida
21			500	0,273	0,0706	0,0012	Rígida
22	-	800	400	0,270	0,0983	0,0011	Rígida

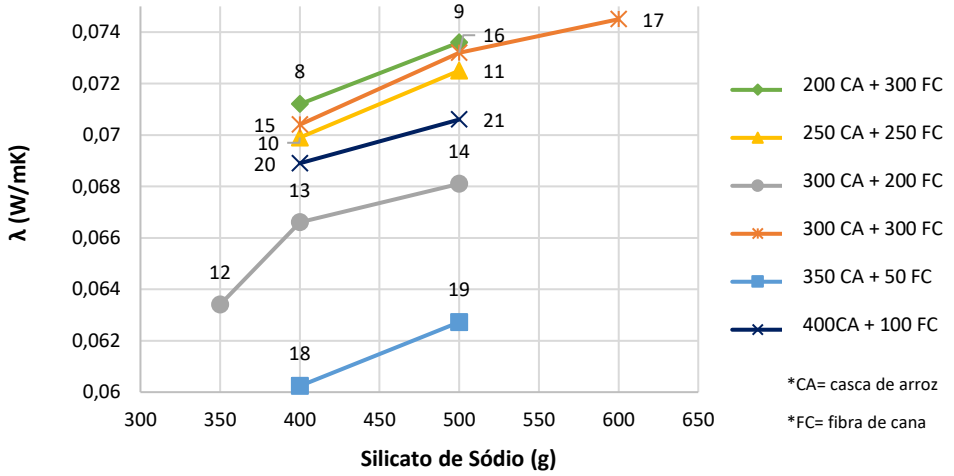


Figura 5 - Condutibilidade térmica das composições com casca de arroz e fibra de cana.

A Composição 22, constituída apenas por fibra de cana e silicato de sódio, apresentou uma massa volúmica de 0,270 g/cm³ e uma condutibilidade térmica de 0,0983 W/mK. O valor alcançado de condutibilidade térmica foi relativamente elevado quando comparado com composições com massa volúmica semelhante que apenas continham casca de arroz na sua mistura, analisadas anteriormente na Tabela 2. Por exemplo, a composição 6 apresentava uma massa volúmica muito próxima da composição 22, mas a sua condutibilidade térmica era aproximadamente 47% inferior.

Outra comparação para a mistura 22 pode ser feita com as composições 7 e 5, que possuíam a mesma quantidade de silicato de sódio na mistura, mas apresentavam condutibilidades térmicas entre 42% a 54% inferiores à composição com fibra de cana. Estas análises da composição 22 confirmam que a fibra de cana contribuiu significativamente para o aumento da condutibilidade térmica quando incorporada nas composições.

As composições com fibra de cana e casca de arroz que apresentaram melhor desempenho térmico foram as composições 18 e 19, que possuíam as massas volúmicas mais baixas e alcançaram valores de condutibilidade térmica de 0,0602 e 0,0627 W/mK. Estas composições tinham a menor quantidade de fibra de cana na mistura. De seguida, as composições 12, 13 e 14 alcançaram os valores mais baixos de condutibilidade térmica, variando entre 0,0634 e 0,0681 W/mK. Observou-se que, ao diminuir 50 g de casca de arroz e aumentar 150 g de fibra de cana em relação às composições 18 e 19, houve um aumento significativo na condutibilidade térmica na ordem de 8,6% a 10,6%, para a mesma quantidade de aglomerante.

Também é importante comparar as composições 2 e 3, que continham apensa 400 g de casca de arroz, quando comparadas com as composições 20 e 21, que continham 400 g de casca de arroz mais 100 g de fibra de cana, mostraram um aumento na condutibilidade térmica entre 7,1% e 8,7% ao adicionar fibra de cana à mistura.

3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão podem ser visualizados na Tabela 4, que apresentam os resultados médios dos cinco provetes para cada composição relativamente à força máxima suportada (Fmax), resistência à flexão (σf).

Tabela 4 - Resistência à flexão para provetes com casca de arroz e fibra de cana.

Nº Composição	Composição (g)			Fmax (N)	σ_f (MPa)	Desvio padrão σ_f
	Casca de Arroz	Fibra de Cana	Silicato de Sódio			
1	400	-	350	27,50	0,17	0,0200
2			400	33,50	0,23	0,0200
3			500	33,67	0,24	0,0200
4			600	35,67	0,25	0,0200
5	450	-	400	34,83	0,23	0,0265
6			500	33,25	0,28	0,0200
7			600	40,25	0,29	0,0200
8	200	300	400	17,50	0,12	0,0173
9			500	21,33	0,13	0,0173
10	250	250	400	19,00	0,13	0,0265
11			500	25,25	0,16	0,0200
12	300	200	350	16,83	0,12	0,0265
13			400	19,33	0,13	0,0265
14			500	25,83	0,17	0,0346
15	300	300	400	22,75	0,15	0,0265
16			500	32,33	0,22	0,0300
17			600	34,17	0,25	0,0300
18	350	50	400	18,25	0,12	0,0200
19			500	19,00	0,13	0,0321
20	400	100	400	28,50	0,18	0,0346
21			500	32,75	0,22	0,0173
22	-	800	400	16,33	0,11	0,0300

Verifica-se que os provetes compostos apenas por casca de arroz e silicato de sódio alcançaram a maior resistência, sendo o valor máximo obtido de 0,29 MPa para a composição 7. Entre todas as composições testadas, o resultado mais baixo foi obtido pela composição 22, composta apenas por fibra de cana e silicato de sódio, com um valor de 0,11 MPa, indicando que a casca de arroz foi mais resistente nestas condições. Estes valores são esperados para materiais naturais, uma vez que resultados semelhantes foram alcançados noutros estudos, variando de 0,08 a 0,26 MPa para a cana (Bakatovich e Gaspar 2019) e 0,34 MPa para a casca de arroz (Bakatovich *et al.* 2018).

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O primeiro ciclo do ensaio, no qual os provetes foram mantidos a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa de 60%, durou 14 dias. O segundo ciclo, no qual os provetes foram expostos a uma humidade relativa de 95%, durou 35 dias até estabilizar a sua massa. Para este teste, foram selecionadas 10 composições (Tabela 5), compreendendo 5 composições somente com casca de arroz e 5 composições com casca de arroz e fibra de cana. A Tabela 5 também apresenta os resultados da absorção média de água (Wm), calculada com base na variação de massa registada.

Tabela 5 - Absorção de água das composições selecionadas.

Nº Composição	Composição (g)			Wm Média (%)	Desvio Padrão Wm
	Casca de Arroz	Fibra de Cana	Silicato de Sódio		
2	400	-	400	45,03	0,7789
3			500	43,77	0,7749
4			600	40,27	0,7873
5	450	-	400	43,75	0,7835
6			500	46,83	1,3237
13	300	200	400	47,83	1,4994
14			500	48,44	1,0593
16	300	300	500	45,67	0,9613
17			600	44,33	0,9968
22	-	800	400	38,02	0,7708

No gráfico da Figura 6, pode-se observar a composição 22, que obteve o valor mais baixo de absorção de água, de 38,02%. Por outro lado, os provetes que alcançaram os valores mais elevados de absorção de água entre as composições analisadas foram os provetes das composições 14, com 48,44%, e 13, com 47,83%. A composição 4, apesar de inicialmente apresentar uma maior absorção de água, acabou por ter um dos resultados mais baixos no final do teste.

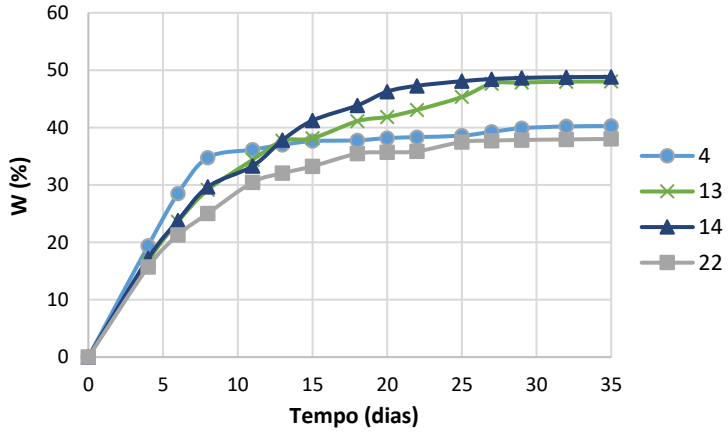


Figura 6 - Absorção de água das composições 4, 13, 14 e 22.

Como resultado, é evidente que uma maior quantidade de silicato de sódio na composição pode acelerar o processo de absorção de água. Isso pode ser atribuído à natureza higroscópica do silicato de sódio. Em geral, materiais vegetais tendem a apresentar uma absorção de água relativamente mais elevada em comparação com outros materiais de isolamento. Isto deve-se ao facto de muitos destes materiais serem porosos e possuírem uma estrutura fibrosa que pode reter água. No entanto, a absorção de água pode variar significativamente dependendo de fatores como a natureza do material, nível de compactação, massa volúmica e espessura (Kabir *et al.* 2012).

Para além de calcular o teor absorção de água, este ensaio permitiu a análise visual da degradação e suscetibilidade ao aparecimento de fungos dos provetes expostos a uma humidade relativa de 95%. Nos provetes da composição 22, constituída apenas por fibra de cana e silicato de sódio, manchas escuras começaram a aparecer espalhadas por todo o corpo do provete (Figura 7) a partir do 7º dia do ciclo com 95% de humidade relativa, indicando a presença de fungos no material. Não foram observadas manifestações fúngicas visíveis a olho nu nos outros provetes compostos por uma mistura de fibra de cana com casca de arroz ou apenas casca de arroz.

Figura 7 - Proliferação de fungos na superfície da amostra 22.

Materiais compostos por matérias-primas orgânicas são altamente suscetíveis ao aparecimento de fungos, especialmente quando expostos a uma elevada humidade relativa ou ao contacto direto com água. Isto deve-se ao facto de que a maioria dos fungos se desenvolve em ambientes quentes e húmidos, pois estas condições proporcionam um ambiente favorável para a proliferação dos seus micélios e a germinação dos seus esporos, que são estruturas que formam uma parte significativa do corpo fúngico (Vitanen *et al.* 2010). A cana é altamente sensível a ataques biológicos, permitindo o aparecimento de fungos na sua superfície, devido ao conteúdo nutritivo e à natureza higroscópica da planta (Lautkankare 2013; Vitanen *et al.* 2010).

4 CONCLUSÕES

A utilização das placas compósitas desenvolvidas neste estudo como material de isolamento térmico, pode contribuir significativamente para reduzir os impactos ambientais causados tanto pela indústria da construção, quanto da agricultura. Ao utilizar resíduos agrícolas disponíveis localmente, também é possível abordar questões relacionadas com a gestão sustentável dos recursos e a mitigação de problemas ambientais específicos. Portanto, este estudo destaca-se como uma contribuição importante para o avanço das práticas sustentáveis na indústria da construção e abre caminho para aplicações práticas destes materiais.

A casca de arroz apresentou resultados excelentes, superando a fibra de cana em todos os aspetos, exceto na absorção de água. Os valores de condutibilidade térmica obtidos variaram entre 0,0613 e 0,0689 W/mK. A adição de 100 g de silicato de sódio às misturas de casca de arroz resultou num aumento da condutibilidade térmica entre 2,4% e 5,0%. Portanto, as composições 1, 2 e 5 podem ser consideradas as com melhor desempenho global em termos de propriedades térmicas e mecânicas.

Quanto à aplicação de fibra de cana nas composições, apesar de se terem alcançado resultados positivos quando o material foi usado em conjunto com casca de arroz, com valores de condutibilidade térmica entre 0,0602 e 0,0745 W/mK, observou-se que a adição de fibra de cana às misturas aumentou a condutibilidade térmica das composições até 12% em comparação com aquelas feitas apenas de casca de arroz com massa volúmica semelhante.

No que diz respeito à resistência à flexão, verificou-se que a adição de fibra de cana às misturas conduziu a uma diminuição da resistência mecânica. Composições feitas apenas de casca de arroz e a mesma quantidade de silicato de sódio apresentaram valores até 2,2 vezes superiores. Além disso, observou-se a influência do aglomerante na resistência mecânica, pois a cada 100 g de silicato de sódio adicionado nas misturas, houve um aumento na resistência à flexão entre 3,4% e 31,8%.

Um outro ponto importante a destacar é a ocorrência de fungos nos materiais quando expostos a uma humidade muito elevada. A casca de arroz mostrou-se mais resistente ao ataque biológico do que a fibra de cana quando exposta às mesmas condições. No entanto, este é um ponto que deve ser aprofundado, nomeadamente através da análise microscópica e da utilização de pré-tratamento dos materiais com produtos fungicidas adequados.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do apoio ao CDRSP (Projetos Estratégicos UIDB/04044/2020 e UIDP/04044/2020; e Laboratório Associado ARISE LA/P/0112/2020).

REFERÊNCIAS

Andreu-Rodriguez, J., Medina, E., Ferrández-Garcia, M.T., Ferrández-Villena, M., Ferrández-Garcia, C.E., Paredes, C., Bustamante, M.A., Moreno-Caselles, J. (2013) Agricultural and Industrial Valorization of Arundo donax L. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 44(1):598–609. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.745363.

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustain. Mater. Technol., 4:1–17. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002.

Bakatovich, A., Davydenko, N., Gaspar, F. (2018) Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. Energy Build. 180:72–82. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032.

Bakatovich, A., Gaspar, F. (2019) Composite material for thermal insulation based on moss raw material. Constr. Build. Mater. 228:116699. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699.

Bakatovich, A., Gaspar, F., Boltrushevich, N. (2022) Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. Constr. Build. Mater. 352:129055. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.

Baltrushevich, M. (2020) Thermal Insulation Materials Containing Reed Fiber Filler. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

Barreca, F., Fichera, C. R. (2013). Wall panels of Arundo donax L. for environmentally sustainable agriculture buildings:Thermal performance evaluation. Journal of Food, Agriculture and Environment, 11(2), 1353–1357.

Benallel, A., Tilioua, A., Ettakni, M., Ouakarrouch, M., Garoum, M., Ahmed Alaoui Hamdi, M. (2021) Design and thermophysical characterization of new thermal insulation panels based on cardboard waste and vegetable fibers. Sustain. Energy Technol. Assess. 48:101639. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101639.

Bialosau, A. (2017) Composite Heat-Insulating Materials Based on Natural Raw Materials and Mineral Binders. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

Decreto-Lei no 92/2019 da Presidência do Conselho de Ministros (2019). Lista Nacional de Espécies Invasoras, Diário da República: I Série A, nº 130. https://dre.pt/dre/legislacao-consolidada/decreto-lei/2019-124568069

Dikmen, N., Ozkan, S.T.E. (2016) Unconventional Insulation Materials. In Insulation Materials in Context of Sustainability; IntechOpen: London, UK. https://doi.org/10.5772/63311.

EN 12089 (1999) Thermal Insulating Products for Building Applications—Determination of Tensile Strength Perpendicular to Faces. European Committee for Standardization: Bruxelas, Bélgica.

EN 12667 (2001), Thermal Performance of Building Materials and Products –determination of Thermal Resistance By Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods –products of Highand Medium ThermalResistance, Eu- ropean Commit-tee for Standardization, Bruxelas, Bélgica.

FAO. (2023). Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize

Ferrández-García, C.E., Ferrández-Villena, M., Ferrández-Cuartero, J., Ortuño, T.G., Ferrández-García, M.T., Andreu-Rodríguez, J. (2014). Manufacture and Properties of Three-Layered Low Density Particleboard from Giant Reed. International Conference of Agricultural Engineering - CIGR-AgEng.

Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N., Joshi, A (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes. In Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction, 1st ed; Woodhead Publishing: Southton, UK; pp. 149–170. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.

Incropera, F.P., Bergman, T.L., Dewitt, D.P. (2011). Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6th ed.; LTC: Rio de Janeiro, Brasil.

ISO 8301 (1991). Thermal Insulation—Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties—Heat Flow Meter Apparatus. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.

Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. Compos. Part B Eng. 43:2883–2892. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053.

Lautkankare, R. (2013). Determination of Thermal Conductivity of Reed in TRC of Finland. In Guidebook of Reed Business; Tallinn University of Technology: Tallinn, Estonia, pp. 28–2.

Melo, A.B., Barbosa, N.P., Lima MR, F., Silva, E.P. (2011). Desempenho estrutural de protótipo de alvenaria construída com blocos de terra crua estabilizada. Ambiente Construído, 11:111–124. https://doi.org/10.1590/s1678-86212011000200008.

Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., Bergeret, A (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. Ind. Crops Prod. 135:238–245. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.053.

Navroski, M.C., Lippert, D.B., Camargo, L., Pereira, M.O., Haselein, C.R (2010). Avaliação do Isolamento Térmico de Três Diferentes Materiais Usados na Construção e Preenchimento de Paredes Externas. Rev. Ciência Madeira—RCM, 1, 41–51. https://doi.org/10.12953/21776830.v01n01a04.

Rama, J.P.F. Eco-Painéis Construídos a Partir de Madeira e Resíduos de Palha/Casca de Arroz. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.

Rosa, L.C., Santor, C.G., Lovato, A., da Rosa, C.S., Güths, S (2015). Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector. J. Clean. Prod. 104:90–97. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.127.

Vitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., Lähdesmäki, K. (2010) Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures. J. Build. Phys. 33:201–224. https://doi.org/10.5772/21184.

Walter, M., Marchezan, E., Avila, L. A.(2008) Rice: Composition and nutritional characteristics. Ciência Rural. 38:1184–1192.

Yarbrough, D.W., Wilkes, K.E., Olivier, P.A., Graves, R.S., Vohra, A (2005). Apparent Thermal Conductivity Data and Related In-formation for Rice Hulls and Crushed Pecan Shells. Therm. Conduct. 27:222–230.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

USO DE RESÍDUOS DE CORTIÇA AGLOMERADA PROJETADA NA REABILITAÇÃO DE OBRAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL – CASOS PRÁTICOS – REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Deesy G. Pinto[1,2,a] ;Petra Ferreira[1,b]

[1,a*]Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Faculdade das Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus da Penteada, 9020-105, Funchal, Portugal

[2,a]Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

Emails: deesy.pinto@staff.uma.pt [a]; deesy.gp.correia@ubi.pt [a] ; 2014415@student.uma.pt [b]

RESUMO

A presente comunicação pretende realçar o potencial da utilização de resíduos de cortiça, após a sua extração e transformação para variados fins (antes de ser utilizada na construção civil foi amplamente utilizada no artesanato, na vinicultura (rolhas para garrafas de vinho), entre outros). A cortiça é um material natural, reutilizável e como tal, sustentável utilizado na construção civil, mas face a outros materiais vastamente utilizados para o mesmo fim, na última década, tem ganho terreno, quer ao nível térmico como ao nível acústico. A cortiça por si só é extraída da casca de uma árvore cujo nome científico é *Quercus suber* L, comummente conhecida como o sobreiro (sobro, sobreira ou chaparro). Esta árvore é semelhante ao carvalho e é frequentemente cultivada no Sul da Europa (regiões do Mediterrâneo Ocidental), predominante em Portugal, sendo mais comum no Alentejo litoral e serras algarvias. Mas também cresce em outros países como a Espanha, Itália, Tunísia e Marrocos. Contudo, ao longo de todo o processo de extração/transformação, gera-se uma quantidade significativa de resíduo que pode ser utilizado para a formulação de três tipos de materiais fundamentais: Aglomerado Composto de Cortiça (ACC), Aglomerado Puro Expandido de Cortiça (APE) e Aglomerado Negro de Cortiça Expandida (ANCE). Contudo, o ANCE ainda pode ser aplicado não em forma de placas, mas sim projetado (ANCEP). O vulgarmente conhecido "aglomerado negro", é fabricado através de um processo de aglutinação de granulados de cortiça virgem e é obtido por um processo industrial sem utilização de aditivos, sendo 100% natural. O ANCEP é uma mistura de resíduos/granulado de cortiça negra expandida misturado com resinas poliméricas que pode ser aplicado por projeção. É o caso da NaciCork, que é um ANCEP que serve de pintura/revestimento externo para o acabamento/reabilitação de fachadas exteriores e de coberturas, quer em construções novas, como em reabilitações de edifícios já existentes, servindo em ambos os casos como material de isolamento térmico e acústico. Também, pode ainda ser utilizada para fins decoração/design de espaços (paredes e/ou de tetos) públicos/privados. O processo de obtenção, assim como as vantagens (poupança energética, barreira contra humidades, isolamento térmico e acústico, anti fissuração, anti condensação, resistência ao fogo, isento de químicos) e também as desvantagens da utilização deste material em detrimento de outros, são discutidos nas sessões seguintes. Da pesquisa realizada junto da empresa Constru.N auferiu-se que desde 2016 e por Concelho foram alvo de intervenção com a NaciCork: 23 moradias/edifícios em Santa Cruz (apenas 1 edifício era construção nova), 8 moradias/edifícios no Funchal, 5 moradias/edifícios no Porto Santo (incluindo a Pousada da Juventude (PJPS), Obra pública), 2 moradias/edifícios na Ribeira Brava, 1 moradia/edifício na Ponta do Sol. Entre os 39 casos apurados e analisados, selecionaram-se 3 casos práticos mais representativos. De uma forma global analisam-se as intervenções, discutem-se as conclusões principais apuradas tendo-se verificado que em geral e até ao momento, os acabamentos obtidos quer em construção nova como ao nível

Adicionalmente apresenta-se uma análise global do estado da utilização deste material como reabilitante externo de edifícios localizados, na Região Autónoma da Madeira (RAM).

Palavras-chave Reaproveitamento de resíduos, Cortiça; Compósito de Cortiça Projetado; NaciCork; Isolamento térmico e acústico.

Siglas

ACC - Aglomerado Composto de Cortiça; ANCE - Aglomerado Negro de Cortiça Expandida; ANCEP - Aglomerado Negro de Cortiça Expandida Projetado; APE - Aglomerado Puro expandido de Cortiça; APCOR - Associação empresarial do setor da cortiça; EPS - Placas de Poliestireno Expandido; ETICS - External Insulation Composite System; MW - Placas de lã de Rocha; ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; ONU - Organização das Nações Unidas; PATRIRAM - Titularidade e Gestão de Património Público Regional, S.A; PJPS - Pousada da Juventude; PMs - Pequenas Empresas;
RAM - Região Autónoma da Madeira; SRES - Secretaria Regional do Equipamento Social da Madeira;
XPS - Placas de poliestireno extrudido; PU - Placas de Espuma de Poliuretano.

1. ESTADO DA ARTE

Os materiais eco-eficientes têm demostrado que podem ser alternativas capazes de substituir materiais tradicionalmente utilizados na construção civil e até podem adicionar características interessantes para o conforto dos utilizadores, sem que se percam propriedades físicas e mecânicas, comparativamente às soluções tradicionais(Haruki and Ono n.d.). Por outro lado, são materiais sustentáveis capazes de poupar recursos naturais, racionalizam o consumo de energia e podem garantir uma alta qualidade se a sua utilização for realizada de uma forma correta. Para tal faz-se necessário criar bases de dados suportadas com dados bibliográficos que fundamentem a minimização do risco da respetiva utilização(Haruki and Ono n.d.). Um exemplo de um material eco-eficiente é a cortiça. A cortiça é extraída de uma árvore cultivada no Sul da Europa, onde se insere Portugal que é um território onde há uma elevada produção deste material. Segundo a associação empresarial do setor da cortiça (APCOR) que tem como missão representar, promover e divulgar a indústria portuguesa da cortiça, demonstrou (2023 n.d.)que a indústria corticeira portuguesa dá um contributo muito relevante para a economia nacional relativamente às matérias (produto), emprego e o comércio externo (exportações). Este contributo faz-se notar com maior incidência nas regiões industrializadas, por exemplo, no concelho de Santa Maria da Feira. Contudo, na última década, assistiu-se a uma estruturação do sector provocando, o desaparecimento de pequenas empresas (PMs), mas provocando o aumento do número de empresas rolheiras e produtoras de outros derivados da cortiça. Também teve influência, nesta transformação a intensificação tecnológica e digitalização do sector. Esta transformação permitiu o crescimento positivo da produtividade, apesar da turbulência económica. Em 2023, a exportação portuguesa de cortiça já tinha atingido alguns recordes, ultrapassando os 1,2 mil milhões de euros/ano. No mesmo ano, a APCOR ainda firmou que, o saldo comercial dos produtos da indústria corticeira ultrapassou os mil milhões de euros, dando um contributo fundamental, no combate ao défice das contas externas do País. Já a Corticeira Amorim, no último relatório de contas (2022), corrobora os números anunciados pela APCOR, indicando também que em 2022, as vendas consolidadas da Corticeira Amorim, ultrapassaram um valor histórico, os já mencionados, mil milhões de euros. Indicaram que este valor deveu-se, ao sólido crescimento orgânico e a consolidação da atividade do Grupo, o que justificou um crescimento de 21,9% das vendas (1021 milhões de euros). Em 2023, alguns órgãos de comunicação social revelavam que as exportações portuguesas de cortiça tinham atingido um valor histórico de 1.232 milhões de euros, correspondendo a um crescimento de cerca de 2% face ao já mencionado para 2022. É de salientar que as referidas exportações podem estar relacionadas com o aumento verificado para os Estados Unidos da América ((EUA), onde cresceram para 214 milhões de euros, ultrapassando a barreira dos 200 milhões). Em

respetivamente. A APCOR revelou ainda que "as rolhas de cortiça continuam a ser o principal material exportado (crescimento de 2,1%, ultrapassando os 900 milhões de euros). É de salientar que a corticeira Amorim é a maior corticeira portuguesa, mas tem uma elevada representatividade internacional e já celebrou 100 anos, pois a 11 de março de 1922 inaugurou-se a primeira fábrica de cortiça da Amorim, em Santa Maria de Lamas, onde nasceu oficialmente a Amorim & Irmãos, Lda., atualmente a Amorim Cork, S.A. (Anon n.d.-c). Hoje a Amorim Cork encontra-se dividida em: Amorim Florestal, S.A que é responsável pela obtenção da matéria-prima, está presente em várias regiões de Portugal, assim como Argélia, Espanha, Marrocos e Tunísia. Amorim Cork, S.G.P.S., S.A. que é responsável pela produção e distribuição de rolhas, está presente em várias regiões de Portugal, Espanha, Suécia, Itália, Alemanha, África do Sul, Argentina, Áustria, Brasil, Chile, China, EUA, Reino Unido, Hungria e França. A I&D, Inovação da Amorim tem várias parcerias na área da investigação, em várias localizações de Portugal. A Amorim Cork Composites, S.A que é responsável pela manufatura de aglomerados compósitos, está presente em Portugal, Alemanha, EUA, França, Reino Unido e Rússia. A Amorim Cork Flooring, S.A. que é responsável pela produção de revestimentos, está presente em Portugal, Alemanha, Áustria, Dinamarca, EUA, Holanda, Polónia, Rússia, Suécia, Suíça, Finlândia e Canada. A Amorim Cork Insulation S.A., responsável pela manufatura de Isolamentos, tem representação somente em Portugal, até ao momento. Relativamente à inovação tecnológica e segundo o relatório de contas de 2022, a Corticeira Amorim (Anon n.d.-c) tem ou teve participação com: Pacto Global da ONU (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, da Organização das Nações Unidas (ONU)), projeto 'Rolha a Rolha, Semeia a Recolha' (recolha de rolhas em clientes não residenciais (cafés, cantinas, restaurantes, etc. com o intuito de reciclar em larga escala, rolhas de cortiça); Hydrocork (pavimento à prova de água constituído por um núcleo composto por cortiça, de baixa espessura e impermeável); aquisição de 50% do Grupo SACI Srl. (sede em Ivrea (perto de Turim)) produção e a comercialização de muselets; subpavimento Go4cork Nature by Amorim, produto da Amorim Cork Composites que oferece alto desempenho, resistência ao impacto, durabilidade e bem-estar ao caminhar, protegendo ainda o piso; avião 100% elétrico mais rápido do mundo utiliza aglomerados de cortiça (da Corticeira Amorim - Spirit of Innovation) no revestimento/isolamento da caixa de bateria (para mitigar eventuais riscos de sobreaquecimento das células das baterias); escultura 'As Três Graças' de Pedro Cabrita Reis, no Jardim das Tulherias, em Paris, que integrou a Temporada Cruzada França-Portugal 2022); campanha Walk on Amazing com a participação de um ex-astronauta da NASA onde se replicou, em cortiça, numa escala de um para um, uma área da superfície de Marte, de cerca de 600 metros quadrados e sob a qual, o ex-astronauta Scott Kelly caminha, no Planeta Vermelho. Esta campanha esteve presente na web, pontos de venda, ações de ativação de marca e demostrou os benefícios dos pavimentos de cortiça; parceira com a Green Urban Living, cobertura verde de design ecológico implantada, no Fórum da Maia, baseada em ACCE que focam, a instalação de autênticos laboratórios vivos em espaços urbanos; iniciativa Dream on Amazing, competição global que visa fomentar a consciencialização sobre a temática da sustentabilidade entre os jovens estudantes, que envolveu equipas de 12 países, no âmbito desta iniciativa conceberam-se, as salas de aula do futuro com materiais sustentáveis, um deles, a cortiça. Os vencedores foram: os Leberecorkies (Lebermatt Gymnasium da Suíça), os Green Gators (Havergal College do Canadá) e os Corkease (Vattenfall Gymnasiet da Suécia); Corkeen (Playground design), utilização da cortiça em áreas da segurança infantil, onde se incluiu e avaliou o risco-benefício em espaços de jogo e de recreio, aliás esta empresa foi pioneira no desenvolvimento de pisos de parques infantis com cortiça; Subpavimentos Plus e Plus VB Go4cork by Amorim que mostram um piso com um desempenho adequado, em termos de capacidade de absorção de carga, isolamento acústico e alta durabilidade; Aquisição por parte da Corticeira Amorim da sociedade Cold River's Homestead, S.A., detentora da Herdade de Rio Frio (3300 hectares), cuja sede está localizada em Lisboa, possui um conjunto de ativos (bens móveis e imóveis) afetos à exploração agroflorestal, uma área predominantemente florestal, com uma mancha de montado que cobre cerca de 80% do seu total; Subpavimento Go4cork Blend com Nike Grind, que impactou positivamente o ambiente, através da criação

excedentes do processo de fabrico do calçado da Nike (Nike Grind); para além das parcerias mencionadas, a Corticeira Amorim foi galardoada, pelo quarto ano consecutivo, nos Prémios de Sustentabilidade da 'World Finance' e venceu a categoria Wine Products Industry» dos Prémios de Sustentabilidade da revista World Finance. Adicionalmente foi também reconhecida pela 4ª vez consecutiva, pela promoção do montado, da biodiversidade e dos serviços dos ecossistemas; pelo fomento, suporte e investimento em Investigação & Desenvolvimento + Inovação, e pela implementação dos melhores princípios, modelos e práticas da economia circular. Esta distinção demostra que a corticeira Amorim tem um compromisso sério e verdadeiro com a redução das emissões de gases maléficos para a atmosfera, em toda a cadeia de valor. Por outro lado, até a loja da Google, mostra mobiliário em cortiça portuguesa, que foi também galardoado nos Prémios NYCxDESIGN 2022, onde venceu a categoria de Impacto Ambiental. É de salientar que neste projeto estiveram envolvidos, o arquiteto nova-iorquino Reddymade e o designer norte-americano Daniel Michalik que criaram, peças únicas em cortiça portuguesa para equipar, o novo espaço comercial do gigante tecnológico em Nova Iorque, cruzando, assim, Natureza, inovação, História, indústria e cultura. Por último, uma parceria na área dos brinquedos ecológicos, seguros e naturais foi estabelecida dando dando origem à Korko, com o auxílio da HAPE, líder mundial na área dos brinquedos de madeira, juntas exploram o mercado de brinquedos de cortiça. Esta parceria já deu origem aos objetos intitulados de "Building Blocks" que assenta no conceito desenvolvido pelo educador infantil alemão Friedrich Froebel, no qual permite que as crianças sintam várias experiências, que experimentem, ajam, representem, pensem e reconheçam, o meio envolvente. Outras parcerias não mencionadas aqui assim como, detalhes da história da maior corticeira portuguesa e o maior grupo de transformação de cortiça do mundo, podem ser assistidos em: Amorim: 150 anos de história (
https://www.amorim.com/pt/media/galeria-de-videos/amorim-150-anos-de-historia/2277/).

1.1 Alguns apontamentos históricos sobre a cortiça

Segundo(2023 n.d.) (CORTIÇA, n.d.),a cortiça tem tido múltiplas utilizações, até à data, mas há séculos que é utilizada na forma de rolha natural, pois apresenta boas características vedantes que a tornam, uma escolha perfeita para os produtores de vinho. No Séc. I A.C. foi encontrada, uma ânfora em É, contendo vinho. As primeiras árvores identificadas como sobreiros datam de há milhões de anos, fixando-se há cerca de 10 mil anos nas várias regiões que hoje ocupa. No ano 3000 A.C., a cortiça já era utilizada no Egipto (material encontrado pela primeira vez nos em alguns túmulos/sarcófagos a qual foi encontrada sob a forma de ânforas tamponadas para fins de armazenamento de alimentos), na Babilónia, na Pérsia, em Cartago (nos cemitérios cartagineses sob a forma de lâminas gravadas, colocadas em caixas para materiais preciosos e, também, nas urnas servindo como tampas de alguns "nuraghi" (urago ou Nurague é um tipo de torre-fortaleza troncocónica, próprio da Cultura nuráguica da Sardenha - a falsa cúpula, com origem no Mediterrâneo Oriental) e os gregos e romanos, a utilizavam em acessórios para as redes de pesca, sandálias, rolhas e até como auxílio na flutuação para os pescadores (existem relatos de Plutuarco, que em 400 A.C., quando Roma foi sitiada pelos Gauleses, os mensageiros que atravessaram o rio Tigre usaram pedaços de cortiça para boiar). Na Grécia foram encontradas ânforas vedadas com cortiça com vinho datado de V A.C. Em Itália (Pompeia - cidade romana destruída pela brutal erupção do Vesúvio) foram encontradas ânforas vedadas com rolha de cortiça contendo vinho, e em outras partes do país, encontraram-se vestígios de tampas para tonéis, sapatos femininos, partes de telhados de moradias, vários artefactos como boias, datados do século IV A.C., mas antes, no século II A.C, os romanos já recomendavam este material para usar na apicultura devido às suas características térmicas. Segundo Virgílio (70-19 A.C.), os soldados romanos cobriam a cabeça com este material para fins de isolamento térmico. No Séc. I D.C., o naturalista romano Plínio refere, o sobreiro na sua célebre História Natural, explicando que na Grécia esta árvore era idolatrada como símbolo da liberdade e da honra (só os sacerdotes a podiam cortar) e menciona que era consagrado

que tem "a faculdade em renovar a sua casca quando esta lhe é retirada". No século seguinte (Séc. II D.C.), Dioscórides, médico grego, aponta algumas aplicações medicinais para a cortiça (queda de cabelo). No início do século XIII (1209), em Portugal surge a primeira legislação que visava a proteção dos montados de sobreiros (sobros). Em 1292, D. Dinis, proibiu o corte de sobreiros em Alcáçovas. Em 1320 refere-se a primeira extração de cortiça (entrecasco) e respetiva utilização no curtimento das peles dos animais. Em 1438, exportou-se pela primeira vez cortiça portuguesa para a Flandres. Na época dos descobrimentos portugueses, os construtores navais recorriam à madeira do sobreiro ("sôvaro") para as colocar, nas partes mais expostas às intempéries das naus e caravelas (liame), pois este material apresentava características anti apodrecimento e elevada resistência. Em 1510 vários artefactos foram mostrados, numa das janelas da Sala do Capítulo, do Convento de Cristo (Tomar, Portugal) e em 1560, o Convento dos Capuchos (Sintra, Portugal) e o das Carmelitas (Buçaco, Portugal) utilizou a cortiça para fins de revestimento das celas. Em 1680 (França), o tesoureiro da Abadia de Hautvillers e o monge beneditino francês Dom Pierre Pérignon, selavam as garrafas do famoso champanhe Dom Pérignon com rolhas de cortiça. Esta escolha foi imitada quer pela Ruinart (1729), quer pela Moët et Chandon (1743). Note-se que ainda hoje se faz este uso. No Séc. XVII, o físico Robert Hooke (Inglaterra) obteve a primeira imagem microscópica da cortiça. Contudo, a grande procura pelos sobreiros que ainda hoje existem quer na Catalunha, como em Portugal, só se evidencia, após o Séc. XVIII, devido ao aumento da produção de rolhas. É também, no Séc. XVIII que são conhecidos, pormenores sobre a constituição química deste material, pelas mãos do químico italiano – Brugnatelli que publicou, o primeiro compêndio sobre o cultivo da árvore *Quercus suber* L. Em 1750, a empresa inglesa Henry Bucknall & Sons Lda., estabeleceu-se em Portugal e as empresas Mundet, Wicander, Robinson, Rankins, Avern e a Armstrong, em Espanha. Estas empresas tinham o objetivo de comprar e exportar a cortiça de Portugal ou Espanha para o Reino Unido, onde esta era transformada. Nesta época, as exportações já se faziam para todos os continentes. Consequentemente, em 1770, a indústria corticeira focada no fabrico de rolhas (manufaturadas manualmente) cresceu significativamente no Norte de Portugal, devido ao aumento da comercialização do vinho do Porto. Em 1790, é publicado outro compêndio intitulado "Azinheiras, Sovereiras e Carvalhos da Província de Além-Tejo" da autoria de Joaquim Pedro Sequeira (Portugal). No Séc. XIX, França, Itália, Tunísia, Rússia e EUA aderem também, ao plantio de sobreiros para iniciar a exploração deste material. Ao nível tecnológico: em 1836 surge uma máquina para laminar a cortiça em tiras, em 1850 surge a primeira máquina para fazer/contar e calibrar rolhas a "garlopa" da autoria de Francisco Vidal e Monner que indicavam uma produção de 3 a 4 mil rolhas/dia. Nesta época alguns operários provenientes da Catalunha chegam até Portugal, com os seus conhecimentos avançados quer em técnicas como no manuseamento de máquinas utilizadas, no setor. Em Portugal, em meados do Séc. XIX já existiam mais de 10 fábricas de cortiça passando para 46, em 1877, algumas delas na Cidade de Aveiro, Portugal. Contudo, em 1880, a cortiça começa a ser utilizada para outros fins. A empresa alemã Karl Lindemann desenvolveu um método que permitia, a laminação da cortiça e a respetiva transformação, numa espécie de aglomerado que deu origem ao primeiro papel de cortiça, produzido pela primeira vez, manualmente, no Mundo. Em 1890, nos EUA apareceu o parquet de cortiça (aglomerado simples ou branco). Em 1892, o nova-iorquino, John Smith, inventa e patenteia o aglomerado negro de cortiça, após ter verificado que com recurso ao calor e pressão conseguia libertar resinas naturais da mesma e que era possível criar um aglomerado de partículas de cortiça que se ligavam entre si. Esta descoberta deu-se por acaso, após um acidente, onde granulados de cortiça foram expostos a um incêndio, onde estes aglomeraram e originaram uma "massa de cor castanho-escura". Em 1903, surgem rolhas repartidas entre cortiça natural e cortiça aglomerada. Em 1909, Charles McManus também exibe compósitos de cortiça que podiam ser utilizados para forrar tampas de garrafa. No final do Séc. XIX, iniciou-se o fabrico de rolhas coladas (duas partes originavam uma só - Reims, França). Em 1920, as rolhas mudam de forma e surgem com uma "cabeça" que facilitaria a respetiva extração das garrafas. Em 1933 desenvolve-se uma técnica para a manufatura de bastões de cortiça aglomerada para a obtenção de rolhas técnicas. Neste seguimento, a indústria corticeira mundial começa a investir cada vez mais no setor

mercado, fazendo surgir, outras registadas patentes no âmbito da utilização da cortiça em correias de transmissão e em pneus e até na II Segunda Guerra Mundial, a cortiça já era utilizada em vários equipamentos militares. Nos anos 40 refere-se que o pó da cortiça podia conservar fruta. Nos anos 50, a cortiça já era utilizada em pequenas peças de mobiliário rústico (revestimento folheado), fabrico de tampos de sanita e surgem, os primeiros ladrilhos de cortiça aglomerada para revestimento com película vinílica sob a responsabilidade de uma empresa dos EUA. Em 1952, Jacques-Yves Cousteau recuperou, das profundas águas italianas, 7000 ânforas com rolha (com mais de 2200 anos), a maioria continha vinho. Em 1956, nasce a Associação Portuguesa da Cortiça (Grémio Regional dos Industriais de Cortiça do Norte), hoje APCOR, referida anteriormente. Para além dos avanços tecnológicos alcançados através da AMORIM, a indústria corticeira mundial, nas últimas décadas também definiu e fez surgir normas internacionais pela mão da Confédération Européenne du Liège (C.E.Liège fundada em 1987). É o caso do Código Internacional de Práticas Rolheiras que visou o controlo da qualidade das mesmas, apresentado por esta entidade em 1996. Mais recentemente (2016), para fins do campeonato europeu de futebol, existem informações que revelam que a cortiça foi combinada com fibras sintéticas para servir de base à relva natural, minimizando os impactos transmitidos aos atletas, nos jogos que resultam de uma série de movimentos, evitando assim possíveis lesões. Em 2018, no museu The Liberty Hall, nos EUA, foram descobertas três caixas de vinhos Madeira datadas de 1796 e 40 demijohns (garrafões de 18,9 litros, usados para armazenar e transportar álcool), datados dos meados dos anos 1800, arrolhados novamente em 1871, durante um processo de restauração de uma adega. À título de curiosidade, estes vinhos foram provados e apresentavam condições satisfatórias. Parte deste stock ficou no museu mencionado e outra parte foi leiloada pela Christie's, em Nova Iorque, no qual um demijohn de vinho Madeira do ano 1846 foi leiloado pelo valor de 39 mil dólares. Note-se que foi igualmente em 2018 que a APCOR inaugurou o primeiro espaço informativo, o Cork Welcome Center, sito no concelho de Santa Maria da Feira (Portugal) que visou apoiar as empresas e servir os 270 associados da APCOR (à data), com o objetivo de ser um centro de informação sobre a cortiça, aberto a todos os visitantes que procuravam saber/pesquisar algo mais sobre este eco-material que, no século XXI, invadiu vários mundos: Eco-Design (design sustentável através dos objetos do quotidiano, artefactos de mesa, de cozinha, de lazer, mobiliário (algumas peças de design internacionalmente premiadas), etc…), assim como o mundo da aeronáutica (aviões e vaivéns espaciais), do cinema (filmes Hollywood), moda (vestuário e calçado), dos transportes, desporto (caiaques de alta competição, bolas de ténis e de críquete), solos (controle de pragas), a construção civil sustentável, etc. À título de exemplo e se realizarmos uma pesquisa em português, pelo uso da cortiça na construção encontramos alguns trabalhos já publicados em Portugal, o qual se destaca (Fábio Nestor Adão Batista 2017). Anualmente surgem otimizações das aplicações existentes ou até novas devido às suas características intrínsecas, que abordaremos, na seção seguinte.

1.2 Obtenção da cortiça – início do ciclo de vida

A cortiça, material natural de origem vegetal, é extraída da casca dos sobreiros (sobro, sobreira ou chaparro), figura 1. Observada microscopicamente é possível visualizar que é constituída por uma colmeia de células preenchidas de ar e revestidas por suberina e lenhina(Chiebao 2011)A respetiva obtenção faz-se por meio de um processo sustentável, conhecido como o "descortiçamento" que segundo (Natividade 1950) (Moreira et al. 2011) (Anon n.d.-e) (Anon n.d.-b), este processo deve seguir várias etapas e regras previstas que no Manual Técnico de Informação e Divulgação, relativo às Normas de Segurança, Higiene e Saúde aplicáveis ao Sector Florestal como também, O código de boas práticas da cortiça desde o montado até à fábrica. Estas regras visam garantir o bem-estar da árvore, a escolha da mão de obra que deve estar habilitada para conseguir extrair, a cortiça das árvores sem danificar a sua qualidade. As etapas mencionadas dizem respeito a: 1) Preparação e Identificação; 2) Planeamento do Ciclo de Extração; 3) Descortiçamento; 4) Cuidados Pós-Extração e 5) Tratamento e Classificação. A figura 1, mostra sucintamente essas etapas que envolvem: 1)

procede à primeira extração (também conhecido por "desbóia") quando as árvores atingem cerca de 25 anos de idade, o tronco apresenta um perímetro mínimo de 70 cm e uma altura de 1,3 metros acima da cota do solo. A primeira extração dá origem a uma cortiça de menor qualidade, conhecida como "cortiça virgem"; 2) após a extração da “cortiça virgem” seguem-se ciclos de extração de 9 a 12 anos e sabe-se que após cada ciclo subsequente a cortiça apresenta melhor qualidade. Para fins de organização as árvores são identificadas com o ano onde ocorreu, a última extração de forma a respeitar o intervalo necessário para proceder-se à próxima extração; 3) é nesta etapa do descortiçamento, que se inicia o ciclo de vida da cortiça, propriamente dita como matéria-prima. Descortiça-se geralmente, manualmente com recurso a ferramentas específicas (exemplo, o machado de cortiça, figura 1 a), cujos trabalhadores, também conhecidos como "tiradores", aplicam pequenas incisões/golpes verticalmente segundo o eixo da árvore, aproveitando as ranhuras da casca (enguiado) ou zona de “câmbio” (camada vegetal existente entre a casca que reveste o tronco e o próprio tronco, evitando o dano) obtendo-se assim, no momento em que o tirador toca a cortiça ligeiramente com o machado, torcendo a lâmina, a separação das pranchas/lascas das cascas com dimensões significativas (macro escala)do entrecasco (é neste momento que se percebe se a cortiça está a “dar bem” ou a “dar mal” consoante o som emitido pela cortiça que é semelhante a um rasgar, ou se é um som seco e oco), figura 1 b)-f). Note-se que até esta fase, o processo não danifica, é relativamente simples e requer pouca energia. Após esta fase dá-se então o início do processo industrial e é preciso avançar para a fase 4) que visa a regeneração da casca extraída. O maior cuidado é deixar a zona de “câmbio” intacta, permitindo que naturalmente se forme, uma nova camada de cortiça. Este passo é essencial para a sustentabilidade da cortiça. Finalmente, segue-se a fase 5), onde as lascas/pranchas de cortiça são empilhadas ao ar livre para fins de secagem natural e estabilização, um processo que pode levar até seis meses. Posteriormente, a cortiça é fervida para aumentar a respetiva elasticidade e para auxiliar a eliminação de impurezas que possam estar ainda presentes. Após a etapa 5), a cortiça é classificada em função da qualidade e do uso final pretendido.

Figura 1 – Resumo do processo de descortiçamento e alguns detalhes – imagens adaptadas de (Anon 2024b)(Anon 2024a): a) machado usado na "desbóia", b) delimitação do tamanho das pranchas/lascas, no eixo horizontal, c) separação das pranchas/lascas do entrecasco, através de um movimento de torção do machado entre o tronco e a cortiça, separando-os do entrecasco, d) retirada do sobreiro da prancha/lascas, evitando a respetiva fragmentação. Após a retirada da primeira repete-se a operação até libertar todo o tronco, e) retirada as pranchas/lascas é a vez de retirar também de junto da base do sobreiro, os pequenos fragmentos de cortiça (calços) que podem constituir uma ameaça fitossanitária/praga para o sobreiro, caso não sejam afastados, f) no final do descortiçamento, as árvores são marcadas, pé a pé, normalmente nas bordaduras, onde são pintados os últimos algarismos do ano em que foi realizada a extração, de acordo com a legislação em vigor, g) secagem ao natural das lascas/pranchas de cortiça empilhadas ao ar livre, h) cortiça virgem (1º descortiçamento) i) cortiça secundeira (2º descortiçamento), j) cortiça amadia (3º descortiçamento e subsequentes), segundo a amorim cork)).

1.3 Obtenção da cortiça – fase industrial – aglomerados

Na fase industrial a utilização da cortiça varia em função do uso que se quer dar, ao produto final. A cortiça utilizada para a obtenção das rolhas é diferente da cortiça que é utilizada no fabrico de materiais para a construção civil (revestimento de pavimentos/pisos, fachadas, para fins de isolamento térmico e acústico, produtos decorativos (significativamente procurados pelos arquitetos nórdicos) etc.). Na manufatura de materiais de construção civil de cortiça, a matéria-prima é proveniente dos dois primeiros descortiçamentos (figura nº1, casos h) i)), da falca (produto resultante da poda dos ramos do sobreiro), da limpeza/manutenção dos sobreiros (calços) e também de todo o resíduo resultante da produção de cortiça natural e outros produtos de cortiça, por exemplo: a produção das rolhas. Aliás, o aglomerado composto de cortiça(Pereira 2011) (da Cortiça 2021)surgiu como uma solução para aproveitar os resíduos gerados, após a respetiva trituração e transformação, da qual surge uma espécie de granulado, figura nº2 a), que pode tomar uma outra finalidade/utilidade, caso seja ou não misturado com um ligante/adesivo (são exemplo: polímeros, asfalto, cimento, gesso, resinas ou colas, etc.) que pode posteriormente, pode ser moldado sob alta pressão e temperatura. Existe também outra forma comercializada do produto que surge de uma mistura de granulado de cortiça embebido em resinas poliméricas que podem ser ou não pigmentadas e que são aplicadas via projeção, figura nº2 c). Esta forma de comercialização do produto tem sido aplicada quer em construção nova como em reabilitada. Contudo, a sua aplicação é mais evidente por exemplo, na renovação de fachadas exteriores, decoração de paredes interiores e revestimento de tetos. Este tipo de aplicação tem demostrado bons resultados pois adere facilmente às superfícies de outros materiais, previne fissuras e fendas e repara/tapa fendas e fissuras existentes. Caso não exista um ligante adicionado à mistura, obtém-se então um aglomerado puro expandido figura nº2 b) (Gil 1997) (Pereira 2015) (S. P. Silva M. A. Sabino and Reis 2005)através da mera aglutinação dos grânulos de cortiça virgem (figura nº1 i)) ou da falca, que quando submetidos a vapor quente, provocam a expansão dos grânulos de cortiça induzindo uma aglutinação devido à existência da suberina (componente ceroso natural presente na cortiça). Salienta-se, o facto da referida técnica ter sido desenvolvida, no início do século XX com o objetivo de apresentar uma alternativa natural características até superiores, tabela nº1, aos materiais isolantes generalizados/difundidos comercializados para a indústria da construção civil, nomeadamente: Placas de Poliestireno Expandido (EPS), Placas de poliestireno extrudido (XPS), Placas de Espuma de Poliuretano(PU);Placas de aglomerado negro de cortiça expandida (ANCE), Placas de lã de Rocha (MW) e o ETICS (External Insulation Composite System) que inadequadamente é também conhecido pelo CAPPOTTO, mas que se referem essencialmente ao mesmo tipo de sistema de isolamento térmico para edifícios, mas são usados em diferentes contextos geográficos e linguísticos. O CAPPOTTO é um termo italiano que significa "casaco" ou "revestimento" e é amplamente utilizado na Itália e em outros países de língua italiana. O ETICS é uma sigla amplamente utilizada internacionalmente, especialmente em países de língua inglesa e na documentação técnica. O ETICS pode ser aplicado sob a forma de placas de EPS, XPS, lã mineral ou cortiça. Por exemplo, existe o CAPPOTTO da VIERO, marca patenteada de ETICS da marca Robbialac (Marmorin n.d.-a). O objetivo é ser utilizado quer em reabilitação como em construção nova para melhorar a eficiência energética, reduzir pontes térmicas e melhorar o conforto térmico interno dos edifícios. Logo, existe a hipótese do ETICS recorrer a placas de cortiça ou de não ser aplicado e existir uma alternativa que incide na projeção de um ANCEP, por exemplo a Narcicork (Anon n.d.-a). Este produto foi um resultado de vários anos de investigação e otimização de processos na produção de granulados de diferentes granulometrias de cortiça, sendo até o pó aproveitado como filler em argamassas de betão tornando-as mais leves e menos porosos. Estes desenvolvimentos serviram para intensificar a inovação da indústria corticeira portuguesa, trazendo benefícios ambientais significativos devido à natureza renovável, reciclável e biodegradável da cortiça conferindo-lhe um outro uso eficiente e sustentável (da Cortiça 2021).

Figura 2 – Exemplos de produtos derivados dos resíduos resultantes da transformação da cortiça: a) Aglomerado compósito granulado; b) Aglomerado expandido; c) Aplicação de cortiça projetada numa parede de uma moradia (Amorim 2024)(Construn 2024)(Cortica24 2024)

A tabela nº 1 dá uma visão abrangente de algumas propriedades mecânicas, térmicas, acústicas, ambientais de vários materiais utilizados na construção civil com características isolantes. Numa análise geral é possível verificar que os materiais isolantes com cortiça na sua constituição e as placas de MW são os que libertam menores emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, apresentam valores de densidade, de inércia térmica, de resistência à temperatura, resistência ao fogo (consequentemente, as respetivas durações na penetração ao fogo são mais demoradas), mais elevados, comparativamente com os restantes. As placas de MW são as que apresentem uma classificação mais elevada (Euroclasse A1). Já as placas de XPS, EPS e PU apresentam menores valores de densidade, de inércia térmica, piores resistências à temperatura/fogo (consequentemente, rápida penetração do fogo) e libertam maiores quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera. O PU é o que possui a menor condutibilidade térmica, XPS, EPS e PU têm propriedades acústicas baixas, o EPS apresenta resistência mecânica mais baixa comparativamente com XPS e PU. Contudo, ambos têm menor absorção de humidade, sendo vantajosos em ambientes húmidos. Se compararmos o ETICS com o ANCEP, verifica-se que ambos possuem boa condutibilidade térmica, mas o ANCEP tem maior inércia térmica, o que significa que pode armazenar mais calor e proporcionar um melhor conforto térmico ao longo do tempo. Também oferece melhor absorção sonora, sendo mais eficaz no isolamento acústico e como tem um melhor coeficiente de redução de ruído, contribui para um ambiente mais silencioso. ETICS tem menor absorção de humidade, o que pode ser vantajoso em ambientes húmidos, mas o ANCEP, apesar de ter maior absorção, é naturalmente resistente a mofo e deterioração biológica. O ANCEP tem uma resistência à compressão ligeiramente superior, tornando-o mais robusto em algumas aplicações, assim como oferece melhor resistência à flexão, o que pode proporcionar uma maior durabilidade em condições de stress mecânico. Em média, tem melhor classificação de reação ao fogo/incêndio, o que indica maior resistência natural ao fogo. Portanto, quer o ETICS como o ANCEP apresentam várias vantagens, mas o ANCEP destaca-se em várias propriedades, especialmente em termos de sustentabilidade, isolamento acústico, e resistência ao fogo. No entanto, a escolha entre ETICS e o ANCEP (por exemplo a Nacicork), dependerá das necessidades específicas do projeto e das condições ambientais. Na RAM temos já um caso (pode ser mostrado no congresso em que, um cliente optou por colocar a Nacicork (3 mm) sob o ETICS. Os resultados desta combinação só se saberão mais adiante, após os materiais estarem expostos as várias condições climatéricas, ambientais e de utilização. Mais detalhes da Nacicok podem ser consultados, na respetiva ficha técnica.

1.4 Vantagens e desvantagens da utilização da cortiça, na construção civil – caso específico da cortiça projetada

No geral, a utilização da cortiça na construção civil tem sido significativa devido ao seu bom desempenho como isolamento térmico e acústico. Como já mencionado, é um material renovável, durável, impermeável,

que podem eventualmente alcançar, valores mais elevados de comercialização por ser mais escassa (pois só é produzida/extraída onde a árvore encontra condições ideias para crescer e envelhecer (da Cortiça 2021) . Neste trabalho focaremos a utilização de um ANCEP, mais concretamente NaciCork (denominação comercial), marca exclusiva da empresa NacionalRev (100% portuguesa, pioneira no revestimento de cortiça projetada em Portugal) e é representada, nas regiões autónomas em exclusivo pela Constru.N. Estas empresas defendem que a NaciCork, apresenta várias vantagens: isolamento acústico(reduz o ruído, proporcionando maior conforto e qualidade de vida aos moradores); isolamento térmico(ajuda a manter a temperatura da sua casa); é uma solução anti-nitrato(o material é resistente a nitratos, protegendo a estrutura contra corrosão e degradação); apresenta ótima adesão (adere a diversos materiais, tornando-se versátil e adaptável a várias superfícies); resistência a intempéries, barreira contra humidades e radiação UV (protege as moradias das condições climáticas adversas, garantindo durabilidade e menor necessidade de manutenção); tem alta flexibilidade(elasticidade permite acomodar movimentos e variações na estrutura, evitando fissuras e rachaduras (anti fissuração), pois suporta bem a dilatação e contração dos materiais; boa respirabilidade (permite que as paredes “respirem”, evitando a condensação, a formação de mofo (através da humidade) e o salitre, não possui químicos e é impermeável, antifúngica e resistente ao salitre, garantindo maior durabilidade das construções. A NaciCork é uma solução moderna e eficiente, que alia estética e funcionalidade e tem se mostrado, uma solução ideal para renovar vários edifícios na RAM. É de salientar que a NaciCork pode também ser utilizada em estruturas metálicas para prevenir ferrugem e proteger contra a degradação provocada por ambientes salinos, comuns em regiões costeiras como é o caso da RAM.

2. IMPLEMENTAÇÃO DA CORTIÇA PROJETADA NA RAM

Após um contacto direto efetuado pelos autores à empresa Constru.n, sita na RAM, os autores verificaram que este método foi implementado na RAM em 2016, e desde esta data é possível encontrar vários exemplos de edifícios já revestidos com NaciCork, um pouco por toda a RAM. A empresa referiu que é um material com várias certificações, nomeadamente pela CE, conforme consta no anexo nº3. É possível também verificar o seu comportamento face à transferência de calor através de superfícies sem revestimento e com revestimento de Nacicork. Adicionalmente anexa-se no nº4, o catálogo de cores. Segundo a Constru.N, o modo de aplicação do produto deve seguir, as seguintes etapas:

- A superfície deve estar previamente preparada;
- Em superfícies fracas deve-se aplicar primário fixador para dar resistência ao substrato;
- Misturar os aglomerados de cortiça em conjunto com um catalisador, com um misturador elétrico até os aglomerados de cortiça formarem uma pasta homogénea;
- Projetar com pistola de ar ou máquina de projeção;
- A aplicação deve ser feita em duas camadas, respeitando 12h de secagem entre camadas.

2.1 Casos práticos

A Construn desde 2016 e até à data, forneceu/aplicou a Nacicork à 39 edifícios (habitação ou comércio e serviços) sitos na RAM. Dos 39 casos apurados, selecionaram-se 3 casos práticos representativos de situações diferentes:

2.1.1 Moradia unifamiliar, sita na Ilha da Madeira, Santa Cruz

Moradia unifamiliar localizada a 1,5 km de distância do mar e 360 m de altitude, sita na freguesia do Caniço, Concelho de Santa Cruz. Na fase de diagnóstico, as fachadas exteriores e a zona à volta dos vãos envidraçados apresentavam destacamento das pinturas, argamassas de revestimento enfraquecidas, fissuração e descoloração da pintura antiga. Algumas patologias foram capturadas via fotográfica, figura nº3.

2.1.2 Moradia unifamiliar, sita na Ilha da Madeira

Moradia unifamiliar localizada a 7 km de distância do mar e 690 m de altitude, freguesia do Santo da Serra, Concelho de Santa Cruz. Esta moradia por se localizar numa zona predominante fria e húmida ao longo do ano, apresentava sérios problemas nas paredes exteriores onde proliferavam microrganismos, matéria orgânica e consequente escurecimento das fachadas. Para além disso foram verificados destacamento das pinturas anteriores, fissuração e irregularidades no revestimento das paredes externas. Algumas patologias foram capturadas via fotográfica, figura nº4.

2.1.3 Reabilitação das fachas exteriores da Pousada da Juventude, sita na Ilha do Porto Santo

A PJPS localiza-se a 0,3 km de distância do mar e 40 m de altitude, na Vila Baleira, Concelho do Porto Santo. Na fase de diagnóstico, as fachadas exteriores, apresentavam vários destacamentos das pinturas, assim como argamassas de revestimento enfraquecidas devido à exposição contínua aos cloretos do mar. Também, fissuras se encontravam em toda a envolvente exterior. Como tal foi necessário tratar estas patologias para depois proceder com a projeção do material, conforme é mostrado na figura nº5. Note-se que a reabilitação da PJPS foi obra pública, sob a alçada da Secretaria Regional do Equipamento Social da Madeira (SRES), cujo adjudicante da obra de reabilitação foi a PATRIRAM – Titularidade e Gestão de Património Público Regional, S.A. Obra cujo preço contratual foi de 199437,29 euros e com patologias detetadas em vários elementos estruturais ou não estruturais: coberturas, pavimentos, vãos, reparações dos arranjos exteriores, carpintarias e serralharia. Com recurso à vários materiais para a intervenção, nomeadamente: telhas, XPS, telhões cerâmicos, impermeabilizantes, chapas de zinco, betão, tintas, calçada madeirense, gesso cartonado, espuma de polietileno, reboco hidrófugo, alvenaria simples, madeiras e mosaicos que foi reabilitada no mês de março de 2022. O dono de obra optou por aplicar NaciCork apenas na fração do edifício afeta aos dormitórios masculino e femininos, deixando o edifício comum (onde se localizam a receção, sala de estar e refeitório) reabilitado somente com tinta de características comuns. Em novembro de 2023 (sensivelmente 1 ano e meio após a intervenção), a fração dos dormitórios apresentavam ainda um aspeto novo e sem fissuras. Contudo, o edifício afeto às zonas comuns já apresentava novamente patologias (fissuras do exterior para o interior), o que facilitou a passagem da água proveniente das chuvas e provocando humidades, diminuindo a qualidade da parte do edifício que não foi "protegida" pela NaciCork, exigindo uma manutenção mais periódica e aumentando custos globais.

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas, Térmicas, Acústicas e Ambientais de alguns materiais utilizados para fins de isolamento térmico e acústico na construção civil, (Pereira 2011)(S. P. Silva M. A. Sabino and Reis 2005) (Gil 1997) (Gil 2009)(Vaughn 2021)(ISO 1997)(Anon n.d.-d)(ASTM n.d.)(Oliveira 2017) (Marmorin n.d.-b)

Materiais isolantes*	Densidade (kg/m³)	Inércia Térmica (J/kg·K)	Condutibilidade Térmica (W/m·K)	Coeficiente de Absorção Sonora (α)	Coeficiente de Redução de Ruído (NRC)	Absorção de Humidade (%)	Resistência à Temperatura (°C)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Reação ao Fogo (Eurocl asse: EN13501-5:2006+A1:2009):Pen etração ao Fogo (min)	Resistência ao Arrancamento (N)	Aderência (kPa)	Emissões de CO_2 (kg CO_2e/m^3)
ACC	200-250	1800-2000	0,037-0,040	0,3-0,7	0,4- 0,7	5,0 - 7,0	-200 +120	0,30-0,50	0,6- 1,2	(B – E); (BROOF(t1) - EROOF(t1)); (30-60)	150-300	100-200	15 - 25
APE	100-120	1600-1700	0,037-0,040	0,3-0,7	0,4-0,7	3,0-5,0	-200 +120	0,20-0,40	0,4-0,8	(B – E); (BROOF(t1) - EROOF(t1)); (30-60)	100-200	80-150	10-20
Placas de ANCE	100-140	1600-1700	0,037- 0,040	0,3-0,7	0,4-0,7	4,0 - 6,0	-180+120	0,20-0,40	0,4-0,8	(B – E); (BROOF(t1) - EROOF(t1)); (30-60)	100-200	80-150	10-20
Placas de XPS	25-45	1400-1500	0,029- 0,036	0,05-0,15	0,2 -0,3	0,2-0,7	-50+75	0,25-0,50	0,4-1,0	(E – F); EROOF(t1) - FROOF(t1); (5-20)	200-400	50-100	30-50
Placas de PU	30 - 60	1400-1600	0,020- 0,030	0,1-0,3	0,2-0,4	1,0 - 3,0	-50 +100	0,15-0,30	0,2-0,5	(D – E); (DROOF(t1) - EROOF(t1));(10-30)	300-500	100-200	20 - 40
Placas de EPS	10-30	1300 - 1400	0,030-0,040	0,05- 0,2	0,2-0,3	0,5-2,0	-50 +75	0,10-0,30	0,2-0,5	(E – F); (EROOF(t1) - FROOF(t1)); (5-20)	100-200	50-100	30-50
Placas de MW	40-200	800 - 1000	0,033- 0,040	0,6-1,0	0,7- 1,0	1,0-5,0	-180 +760	0,05-0,10	0,2-0,3	A1; A1ROOF(t1); (60-120)	200-300	20-40	5- 15
ETICS	15 - 40	1200-1400	0,030-0,038	0,10-0,30	0,2- 0,4	0,5-2,0	-50+75	0,1- 0,3	0,2- 0,5	(E – F); (EROOF(t1) - FROOF(t1)); (5-20)	100-200	50-100	30-50
ANCEP	100-140	1600-1700	0,037-0,040	0,3-0,7	0,4- 0,7	4,0-6,0	-180+120	0,2-0,4	0,4-0,8	(B – E); (BROOF(t1) - EROOF(t1)); (30-60)	100-200	80-150	10-20

*Note-se que os valores que apresentados baseiam-se, em dados comerciais disponíveis para os materiais isolantes selecionados,

a) b)

c)

d) e)

Figura 3 – a) Aspeto exterior de um alçado da moradia antes da intervenção; b) aspeto danificado da zona envolvente de um dos vão envidraçados; c) Paredes exteriores fissuradas; d) preparação de um dos alçados para posterior aplicação da NaciCork; e) Um dos alçados já recuperados. Aspeto final da NaciCork na fachada.

Figura 4 – a) Aspeto exterior de um alçado da moradia antes da intervenção; b) esquina exterior com proliferação de microrganismos devido à má drenagem pluvial; c) Um dos alçados da moradia com sinais nítidos de vegetação parasitária nas paredes e descoloração acentuada da pintura antiga; d-e) Aspeto final dos locais capturados, mas já recuperados com a NaciCork.;

Figura 5 – a) Aspeto exterior de um alçado da PJPS antes da intervenção; b)Reparação das fissuras e irregularidades nas paredes exteriores, antes da intervenção; c -d) vão envidraçado já com patologia após 1,5 anos (parte do edifício que não levou NaciCork) outro vão na mesma data mas que sofreu intervenção; e) aspeto exterior/final de uma fachada exterior, após a aplicação da NaciCork.

3. CONCLUSÕES GERAIS

A preocupação com a sustentabilidade na construção civil é crescente e até já, imperativa, pois encontra-se citada na legislação em vigor, quer ao nível nacional como europeu, que requerem a seleção de materiais cada vez mais ecológicos e sustentáveis. A cortiça, como referido nas anteriores seções deste trabalho apresenta características que a tornam numa solução sustentável que pode ter variadíssimas aplicações das quais, a respetiva projeção em fachadas de edifícios para variados fins (desde residenciais até comerciais e industriais). Como vimos, desde 2016, a NaciCork tem sido aplicada na RAM, seguindo uma tendência crescente de uso devido às suas excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico (é especialmente eficaz em áreas sujeitas a condições climáticas adversas e flutuações de temperatura, como é o caso da RAM), além de sua resistência e durabilidade. Para além das propriedades que lhe são inerentes, a NaciCork apresenta acabamentos de diferentes cores, melhorando a estética das fachadas além de suas propriedades funcionais. No futuro pretende-se que o seu uso seja ainda mais significativo, estando a empresa Construn presente em vários eventos regionais e académicos de modo a mostrar quais são vantagens ambientais e técnicas do material de forma a impulsioná-lo. A NaciCork tem sido uma solução para enfrentar desafios climáticos, contribuindo para construções mais sustentáveis e eficientes. Ao nível internacional, várias

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem, a colaboração do Sr. Valter Ornelas, CEO da Empresa Construn pela disponibilização dos dados e fotos recebidas relativamente às obras de construção (quer novas como existentes) já executadas na RAM e também pelo pagamento da inscrição para que a aluna pudesse submeter e apresentar o trabalho já realizado na RAM com recurso ao material abordado, assim como, expressam gratidão e reconhecimento pelo contributo indispensável da PATRIRAM que nos facultou também, dados sobre a intervenção realizada na PJPS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2023. n.d. *O SETOR DA CORTIÇA*.
Amorim. 2024. "Imagens."
Anon. 2024a. "Amorim Cork Flooring."
Anon. 2024b. "Correiacork."
Anon. n.d.-a. "20240529_cortiça_anexo1_Nacicork F08."
Anon. n.d.-b. *CÓDIGO DE BOAS PRÁTICAS DA CORTIÇA-DO MONTADO À FÁBRICA*.
Anon. n.d.-c. *Índice*.
Anon. n.d.-d. "Kupdf.Net_din-4102-1-1998."
Anon. n.d.-e. *Segurança, Higiene e Saúde Aplicáveis Ao Sector Florestal 2 Índice Geral*.
ASTM. n.d. *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*.
Chiebao, Fernanda. 2011. "Manual Materiais de Construção e Decoração."
Constru-n. 2024. "Imagem."
da Cortiça, APCOR-Associação Portuguesa. 2021. "The APCOR's Cork Yearbook 2020." *Santa Maria de Lamas: APCOR*.
Cortica24. 2024. "Imagem."
Fábio Nestor Adão Batista. 2017. *O Uso Da Cortiça Na Construção Sustentável*.
Gil, Luís. 1997. "Cork Powder Waste: An Overview." *Biomass and Bioenergy* 13(1–2):59–61.
Gil, Luís. 2009. "Cork Composites: A Review." *Materials* 2(3):776–89.
Haruki, Bruno, and Gonçalves Ono. n.d. *Universidade Do Minho Escola de Engenharia*.
ISO, E. N. 1997. "Acoustics-Sound Absorbers for Use in Buildings-Rating of Sound Absorption." *International Organization for Standardization*.
Marmorin, Visolcalce. n.d.-a. *EFEITOS DECORATIVOS GUIA DECORATIVOS ACABAMENTOS MINERAIS SOLUÇÕES TÉCNICAS GUIA CAPPOTTO ® ADESIVOS & REGULARIZADORES*.
Marmorin, Visolcalce. n.d.-b. *EFEITOS DECORATIVOS GUIA DECORATIVOS ACABAMENTOS MINERAIS SOLUÇÕES TÉCNICAS GUIA CAPPOTTO ® ADESIVOS & REGULARIZADORES*.
Moreira, Francisco, Margarita Arianoutsou, Piermaria Corona, and Jorge De las Heras. 2011. *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*. Vol. 24. Springer Science & Business Media.
Natividade, J. Vieira. 1950. "Subericultura, Ministério Da Economia, Direcção Geral Dos Serviços Florestais e Aquicolas."
Oliveira, Carlos Filipe Ferreira de. 2017. *Soluções Técnicas Para a Reabilitação Térmica de Edifícios Incorporando Cortiça*. Covilhã.
Pereira, Helena. 2011. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier.
Pereira, Helena. 2015. "The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry." *BioResources* 10(3):6207–29.
S. P. Silva M. A. Sabino, E. M. Fernandes V. M. Correlo L. F. Boesel, and R. L. Reis. 2005. "Cork: Properties, Capabilities and Applications." *International Materials Reviews* 50(6):345–65. doi: 10.1179/174328005X41168.
Vários autores, APCOR. 2019. *CORK - Information Bureau | 2019*.
Vaughn, Michael. 2021. "ASHRAE Research Report: 2020-2021." *ASHRAE Journal* 63(10):73–87.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DO DESCARTE DA CASCA DE OSTRA E SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Giovanna Schafer Bartels[a]; Poliana Bellei[a,b]; José Dinis Silvestre[a]; Inês Flores- Colen[a]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, giovanna.schafer@tecnico.ulisboa.pt; poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt; jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt; ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

RESUMO

Este artigo apresenta uma comparação do impacte de Potencial de Aquecimento Global (PAG, ou *GWP – Global Warming Potential*) obtido na modelação do descarte da casca de ostra e da sua incorporação em argamassa. Primeiramente, estuda-se o ciclo de vida da ostra, adotando a perspectiva *cradle-to-grave*, ou berço-ao-túmulo (A1-C4), que considera a etapa de cultivo do animal até à etapa de descarte da casca. Por outro lado, após o descarte da casca, este biomaterial pode receber um tratamento (mecânico e térmico) e ser reutilizado como componente na produção de materiais de construção. Com isso, compara-se o impacte ambiental referente ao ciclo de vida natural das cascas de ostra, com o de uma argamassa tradicional produzida com cal hidráulica, areia e água, e de argamassas produzidas ao substituir esses materiais tradicionais por cascas de ostras processadas. Em relação às argamassas analisadas, a abordagem *cradle-to-gate*, ou berço-ao-portão (A1-A3) é aplicada, considerando os impactes dos materiais da argamassa tradicional, assim como a casca de ostra processada e incorporada na solução analisada. Destaca-se neste trabalho, que a avaliação dos impactes ambientais da produção da argamassa são quantificados, juntamente com os processos envolvidos na preparação e tratamento da casca, para torná-la apta para uso como material de construção. Essa abordagem proporciona uma compreensão mais completa dos benefícios ambientais associados à produção de materiais com cascas de ostras, abrindo caminho para práticas mais sustentáveis na construção.

Palavras-chave: potencial de aquecimento global, argamassa de cal, casca de ostra, reutilização, economia circular azul

1 INTRODUÇÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que visa quantificar os impactes ambientais de determinado processo ou produto, identificando oportunidades para melhorar o desempenho ambiental de um produto ao longo de seu ciclo de vida, contribuindo para o planeamento estratégico, estabelecimento de prioridades e a conceção de produtos ou processos. O processo de ACV busca analisar o produto desde a sua conceção até ao término de sua vida útil, abrangendo a aquisição de matéria-prima, a produção, o uso, o tratamento no fim de vida útil, a reciclagem e o descarte (ISO 14040 2006).

A ACV é um método crucial na gestão ambiental industrial contemporânea (Löfgren *et al.* 2011). Cada vez mais, as indústrias têm adotado a ACV para diminuir os custos gerais decorrentes do ciclo de vida de bens e serviços, além de aprimorar a competitividade dos seus produtos. O processo de ACV é empregado também para otimizar o *design* do produto, procurando uma escolha mais adequada de materiais e tecnologias, bem como para considerar a viabilidade da reciclagem (Comissão Europeia 2023). Com base nos resultados obtidos pela ACV, é viável promover projetos mais responsáveis, mitigando os impactes ambientais e reduzindo o uso e a libertação de materiais tóxicos (EPA 2023).

Baseado nestes princípios, Alvarenga *et al*. (2012) realizaram uma análise ambiental usando a avaliação do ciclo de vida para a reciclagem de cascas de ostras brasileiras a fim de comparar os impactes gerados em um cenário que há descarte das cascas em aterro sanitário, e outro em que ocorre a sua reciclagem. Os resultados confirmam que a reciclagem das cascas foi benéfica para o meio ambiente, além de poder ser valorizado como matéria-prima para outros processos produtivos. Os autores ressaltam que o estudo foi feito com dados obtidos por meio de pesquisas realizadas em laboratório, mas que o estudo apresenta um benefício ambiental, por promover outro destino a esse resíduo.

Do ponto de vista da produção aquícola, em 5 anos (2015 a 2020), a produção de ostras triplicou em Portugal. O Algarve destaca-se como a região mais representativa de Portugal, sendo responsável por 42% do volume de vendas da produção e por um valor de produção de aproximadamente 157 milhões de euros em 2020. A maior parte dos viveiros para a produção de bivalves está localizada especificamente na Ria Formosa. O elevado volume de produção deste produto é resultado das ótimas condições para o cultivo, como, por exemplo, a temperatura mais quente da água (DGRM 2022).

Acresce que no Algarve, os pescadores, tradicionalmente incorporavam este tipo de resíduos na construção das suas casas, como é o exemplo paradigmático da utilização de cascas de mexilhão esmagadas e pisadas na camada de isolamento das açoteias de arco da Fuzeta (Pacheco 2009). Existe assim um aspecto sócio-cultural que pode ser valorizado e novamente integrado no tecido produtivo das regiões costeiras gerando riqueza, com óbvios benefícios ambientes (diminuição da pegada de carbono na construção e redução dos resíduos).

Com o objetivo de proteger os recursos provenientes do oceano, surgiu em 2012 o conceito de economia azul, associado à economia circular. Esse conceito diz respeito à sustentabilidade e ao reaproveitamento de resíduos, bem como a outras atividades sustentáveis conectadas, que visam utilizar e preservar os recursos marinhos e costeiros (Eikeset *et al.* 2017). Com isso, este estudo compara o potencial de aquecimento global do descarte da casca de ostra e sua aplicação na construção (argamassas de revestimento de cal hidráulica).

2 CASO DE ESTUDO

A casca de ostra foi considerada como pó (partículas menores que 150 µm) para substituir a cal hidráulica natural, e com partículas compatíveis (0 ≤ 4 mm) para substituir o agregado, em misturas de argamassa de revestimento. As cascas utilizadas para o desenvolvimento das soluções foram recolhidas pelos pescadores da Ilha da Culatra, na região do Algarve, Portugal, devido a mortalidade que ocorre com o animal e a consequente acumulação de resíduo na ilha, principalmente considerando o volume triplicado de produção na última década (DGRM 2022). Essa região foi escolhida por ser a maior produtora de bivalves do país, e fazer parte do caso de estudo do projeto SHELLTER.

Figura 1 – Ilha da Culatra, em Olhão, na região do Algarve, Portugal.

Fonte: Google Earth Pro (2024).

A metodologia adotada para a ACV seguiu a Norma Europeia EN 14040 (2006), a qual detalha os princípios e a estrutura da técnica de ACV. O processo inclui quatro fases: (i) definição do âmbito e objetivos, (ii) inventário, (iii) avaliação e (iv) interpretação. É importante destacar que se trata de um processo iterativo, onde alteraçõesnuma fase influenciam as restantes, permitindo modificações nas fases iniciais mesmo durante o desenvolvimento das últimas. Sendo assim, o processo não segue necessariamente uma ordem linear. A Figura 2 ilustra a relação entre essas fases.

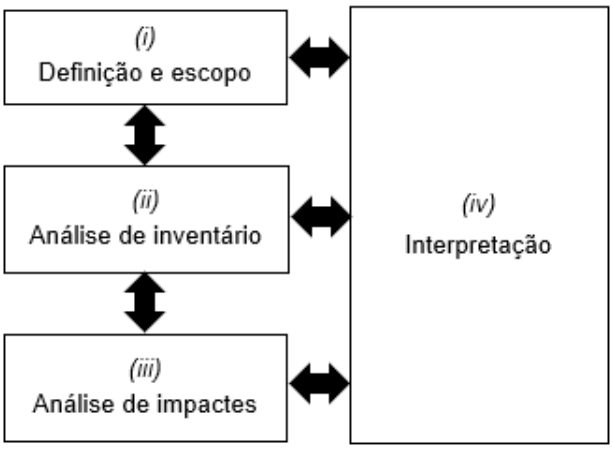


Figura 2 – Fases de uma ACV
Fonte: Adaptado de EN 14040 (2006)

A definição do âmbito e dos objetivos do trabalho constitui a primeira etapa. A abordagem de ACV foi do tipo Berço-ao-Túmulo (*Cradle-to-Grave)*, para que fosse possível avaliar os impactes considerando o ciclo de vida natural da ostra até o seu descarte como material inerte em aterro, e o seu descarte por incineração; a abordagem do tipo Berço-ao-Portão (*Cradle-to-Gate*) também foi adotada para que se avaliassem os impactes da utilização da casca como pó e agregado na composição da argamassa, até sua disponibilidade no mercado. Dessa forma, o Potencial de Aquecimento Global (PAG, ou *GWP – Global Warming Potential*) foi o impacte de maior interesse a ser avaliado neste estudo.

Conforme descrito, a ACV foi realizada para a casca considerando dois cenários de deposição do resíduo: descarte de material inerte, descarte por incineração. Para este cenário, foram especificados os recursos utilizados até que a casca de ostra chegasse ao depósito final. Isso inclui os meios de transporte e as distâncias percorridas em cada etapa: do berçário ao viveiro, do viveiro ao Porto de Olhão, e do Porto de Olhão ao local de depósito final do resíduo. Também foram considerados os processos de descarte e incineração.

Além disso, a comparação do ACV ainda analisou três tipos de misturas de argamassas com substituição do ligante e do agregado por casca de ostra, identificadas por siglas: AgO (substituição de 30% de areia por areia de casca), PO (substituição de 24% de cal hidráulica por pó de casca) e POC (substituição de 24% de cal hidráulica por pó de casca calcinada). Neste caso, foram estudados e detalhados os processos associados até que a argamassa seja disponibilizada para o mercado. Assim, considerou-se desde a matéria prima envolvida, como a cal hidráulica e a areia média e os meios de transporte utilizados e as distâncias percorridas: do berçário ao viveiro, do viveiro ao Porto de Olhão, do Porto de Olhão para o local de processamento e disponibilização para comercialização. Também foram quantificados os recursos materiais e energéticos necessários durante o processamento, como na separação das ostras por tamanho até a constatação da sua morte, passando pela limpeza, moagem, trituração até o pó, calcinação e empacotamento da solução de argamassa em embalagem.

Para a modelação dos dados, utilizou-se o software SimaPro 9.4.0.2 e a base de dados Ecoinvent 3. A metodologia de cálculo adotada pelo SimaPro foi a EN 15804+A2. Para a compilação, avaliação e interpretação dos dados, foi utilizado o Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para definir os impactes de GWP do descarte da casca e das argamassas, todas as informações foram modeladas no software SimaPro, o qual gerou os dados apresentados na Figura 3.

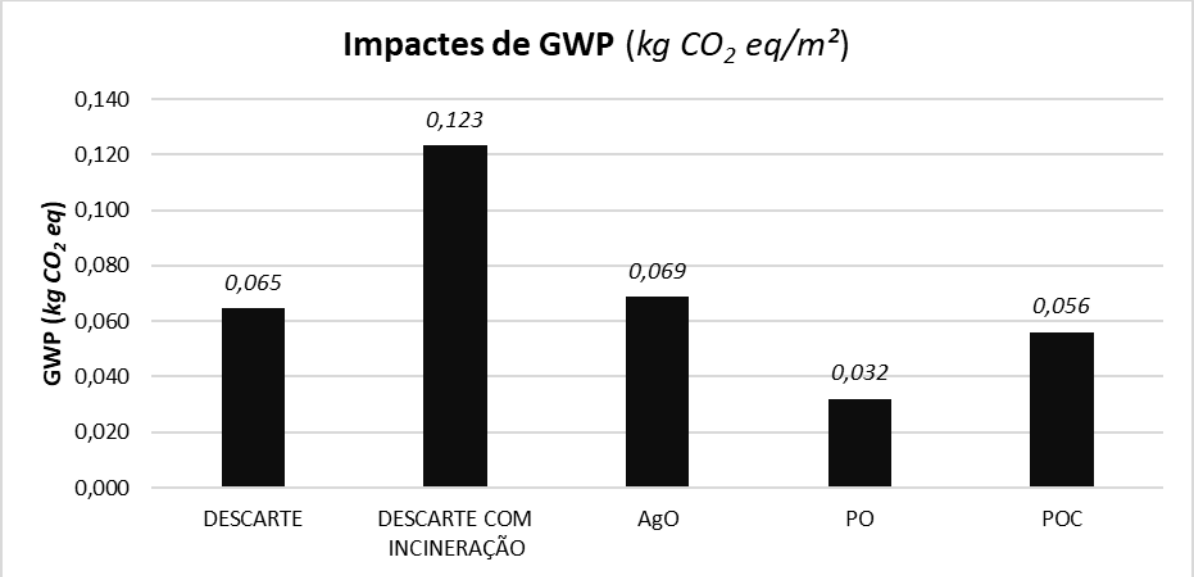


Figura 3 – Impactes de GWP para os cenários estudados

Observando o gráfico, percebe-se que o descarte da casca com incineração, é o cenário que possuiu o maior valor em termos de impacto de Potencial de Aquecimento Global (0,123 kg CO_2 eq/m²). Este resultado foi maior do que o descarte da casca como material inerte em aterro, embora ambos os métodos apresentem impactes significativos.

Comparando as soluções de argamassa com substituição dos materiais convencionais por casca de ostra (em pó ou agregado) pode-se dizer que as mesmas apresentaram resultados variados, uma vez que, nesta análise, a maior parte do impacte obtido está relacionada à energia gasta para transformar o estado físico ou químico da casca de ostra. A casca possuiu três tipos diferentes de incorporação nas argamassas, e, de certa forma, o seu processo de tranformação em material de construção foi cumulativo. Para transformar a casca de ostra em agregado para ser utilizado na argamassa com 30% de substituição de areia por agregado de ostra (AgO), a casca foi submetida ao processo de limpeza e moagem. Na argamassa com 24% de substituição de cal hidráulica por pó de casca de ostra (PO), além da limpeza e moagem, este ultimo processo exige maiores recursos pelo fato da casca de ostra ser moída até um pó fino. Para a argamassa com 24% de substituição de cal hidráulica por pó de casca de ostra calcinada (POC), o pó fino da casca deve ainda ser submetido ao processo de calcinação a temperaturas acima de 800 °C.

Contudo, a argamassa que substitui a areia por casca, é considerado o cenário com impacte mais alto (AgO = 0,069 kg CO_2 eq/m²). Devido a casca possuir uma massa volúmica menor comparada a massa volúmica da areia, ao substituir o volume de areia por casca, uma maior quantidade de material é necessária, e consequentemente, isso acarretará num maior impacte ambiental da proposta de substituição. Por outro lado, a argamassa que substitui a cal hidráulica por pó de casca de ostra calcinada apresenta um impacte maior (POC = 0,056 kg CO_2 eq/m²) em comparação à argamassa com substituição por pó de casca de ostra não calcinada (PO = 0,032 kg CO_2 eq/m²). O processo de calcinação tem como objetivo transformar a estrutura química da casca de $CaCO_3$ para CaO, e exigência

de muita energia e tempo para atingir o resultado final. Apesar do impacte agregado à este processo ser elevado, esta solução (PO) é considerada mais favorável do ponto de vista ambiental em relação ao cenário apresentado pela argamassa com substituição da areia por casca (AgO), uma vez que utiliza-se menor volume de casca de ostra processada.

Sendo assim, a solução mais sustentável é a que substitui o ligante de cal hidráulica por pó de ostra não calcinada. Esta alternativa apresenta aproximadamente metade do impacte do descarte em aterro, e é 248% inferior ao descarte com incineração, destacando-se como a opção mais viável do ponto de vista ambiental.

4 CONCLUSÕES

Os resíduos gerados pela indústria da aquacultura são um problema devido à sua larga escala, e ao alto impacte ambiental e valor agregado ao seu descarte. Por isso, é necessário encontrar alternativas para a sua utilização. A substituição de agregados ou ligantes por de casca de ostra processada em argamassas pode gerar emprego, valor económico e redução dos impactes ambientais associados. Incorporados de forma sustentável, esses resíduos auxiliam na recuperação marinha e representam um exemplo de economia circular azul.

O presente estudo quantificou o Potencial de Aquecimento Global (GWP) da casca de ostra descartada como material inerte em aterro, e o seu descarte por incineração. Além disso, três tipos de argamassas com substituição do ligante e do agregado por casca de ostra processada também foram avaliadas quanto ao GWP. O objetivo foi comparar os impactes ambientais do descarte com a reutilização das cascas de ostra na construção civil.

A argamassa com 24% de substituição de cal hidráulica por pó de ostra (PO) apresentou o menor impacte de GWP. As outras soluções, com 30% de substituição de areia por agregado de ostra (AgO) e com 24% de substituição de cal hidráulica por pó de ostra calcinada (POC), embora apresentem um impacte maior, ainda mostram valores inferiores ao apresentado pelo descarte com incineração. Portanto, justifica-se a casca de ostra ser processada e utilizada como material de construção, como, por exemplo, na composição da argamassa (incluindo sua utilização como agregado ou ligante).

No entanto, duas soluções (AgO e POC) aproximam-se do impacte de descarte sem incineração, seja por grande volume de substituição, ou por passarem por muitos processos de tratamento até a sua utilização definitiva na composição da argamassa. Assim, é necessário verificar se há processos ou recursos que podem ser otimizados para diminuir o impacte ambiental causado pela solução de substituição de 24% de cal hidráulica por pó de casca de ostra calcinada na argamassa (POC), mas principalmente pela argamassa com substituição de 30% de areia por areia de casca de ostra (AgO). Esta última, por ser a solução de argamassa que demanda menor quantidade de processamento da casca, pode ter um potencial de impacte ambiental mais interessante, caso se consiga incorporar uma percentagem menor de substituição na argamassa.

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendável estudar mais impactes, uma vez que a visão aqui apresentada é limitada ao potencial de aquecimento global. Sugere-se, também, estudar a otimização dos processos que fazem parte da produção da argamassa com a utilização da casca em sua composição. É essencial investigar formas de tornar esses processos mais eficientes, seja através da procura de equipamentos que gastem menos energia, seja pelo aumento do volume da quantidade de material processado. Esta abordagem não só reduziria os impactes ambientais, mas também poderia aumentar a viabilidade económica da utilização de cascas de ostra com material na indústria da construção civil.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos pelo apoio do fundo bilateral EEA Grants através do financiamento do Projeto SHELLTER entre Portugal e Noruega (FBR_OC2_30), pelo prémio ao projeto BLOCOYSTER na VI edição do prémio Mares Circulares que resulta da parceria da Liga para a Proteção da Natureza com a Coca-Cola, e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (UI/BD/151151/2021, https://doi.org/10.54499/UI/BD/151151/2021) da unidade de pesquisa CERIS (UIDB/04625/2020 https://doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020) e ao CERENA (UID/ECI/04028/2019).

REFERÊNCIAS

Alvarenga, R. A., Galindro, B. M., Helpa, C. d., & Soares, S. R. (2012). The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. Journal Environ Manage, 106:102–9. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.017

Comissão Europeia. (2023). European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) - Environment.

Eikeset, A. M., Davíðsdóttir, A. B., Klinger, D. H., Levin, S. A., Rovenskaya, E., & Stenseth, N. C. (2017). What is blue growth? The semantics of "Sustainable Development" of marine environments. Marine Policy. 87: 177–179. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.019.

EPA. (2023). United States Environmental Protection Agency. Design for the Environment Life-Cycle Assessments. https://archive.epa.gov/epa/saferchoice/design-environment-life-cycle-assessments.html

DGRM. (2022). Direção Geral de Recursos Naturais. Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2021-2030. https://www.dgrm.pt/documents/20143/45612/PT_PEA_2021_2030.pdf/37c9c077-f248-ff56-3de9-0ffe12c89f89

ISO 14040. (2006). ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

ISO 14044. (2006). ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and Guidelines.

Löfgren, B., Tillman, A.-M., & Rinde, B. (2011). Manufacturing actor's LCA. Journal of Cleaner Production, 19:17–18. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.008

Mo, K.H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Lee, S.C., Goh, W.I., Yuen, C.W. (2018) Recycling of Seashell Waste in Concrete: A Review. Construction and Building Materials, 162, 751–764.

Pacheco, M. B. P. (2009). A Evolução Urbana e Arquitectónica da Fuseta. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Arquitectura. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico. 310 páginas.

Secil Tek. (2022) Ficha Técnica – Cal Hidráulica Natural NHL 3,5.

Razali, N., Aris, R. N. F. R., Razali, N. Pa'ee, K. F. (2017) Revalorization of Aquaculture Waste: The Performance of Calcined Mussel Shells as Partial Cement Replacement. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT 2017)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO CELULAR ESPUMOSO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Ivan Batista Morais[a]; André Barroso Mourão[b]; Lucas Thadeu da Silva Ramos[c]; Elvys Dias Reis[d]; Júnia Nunes de Paula[e]

a (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), ivan@cefetmg.br

b (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), andrebmourao@cefetmg.br

c (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), lucas.ramos@cefetmg.br

d (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Geraiis), elvys@cefetmg.br

e (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), juniapaula@cefetmg.br

RESUMO

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) constituem uma alternativa eficaz para redução do consumo do clínquer e das emissões de CO_2 inerentes à indústria cimentícia. A cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é um tipo de MCS abundante no Brasil e tem potencial de melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios. Nesta perspectiva, este trabalho estudou os efeito da CBCA no concreto celular espumoso (CCE) como substituição parcial ao cimento. Foram desenvolvidas três dosagens distintas: controle, com 100% de cimento, CBCA-10 e CBCA-20, com 10% e 20% de substituição (em massa) do cimento pela CBCA moída e requeimada a 600 °C. As cinzas foram caracterizadas física e quimicamente. Os concretos foram submetidos aos ensaios de compressão após 7, 21 e 28 dias de cura, bem como foi determinado o índice de absorção por imersão e índice de vazios após 28 dias. Os resultados evidenciaram que o CBCA-10 apresentou resistência à compressão superior ao controle em 10,30%, 8,56% e 9,90% aos 7, 21 e 28 dias, respectivamente, ao tempo que a dosagem CBCA-20 registrou decréscimo de 14,64%, 14,60% e de 6,74% em relação ao controle para as mesmas idades, respectivamente. A intodução da CBCA não alterou significativamente os índices de absorção e de vazios. Logo, o percentual de substituição de 10% representa o valor mais adequado para a produção do CCE. Este estudo contribui para o desenvolvimento de estruturas leve com o reaproveitamento de resíduos agrícolas, reduzindo assim a pegada de carbono da indústria do concreto.

Palavras-chave: Cimento Portland; cinza do bagaço de cana; concreto celular; concreto leve; sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A produção do cimento Portland responde por cerca de 7% das emissões globais de CO_2 relativas às atividades antrópicas (SNIC, 2019) e sua produção anual é estimada em 4,1 bilhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por 65 milhões de toneladas deste volume (IPCC, 2022; USGS, 2023).

Em 2021, cada tonelada de cimento fabricada no planeta culminou na emissão de 633 kg de CO_2 para a atmosfera (SNIC, 2022). O clínquer é o principal componente do cimento Portland e sua fabricação exige grande consumo energético e queima de combustível, o que gera alta emissão de poluentes (Moumim *et al*., 2020). Portanto, cerca de 90% das emissões decorrentes da fabricação do cimento correspondem à produção do clínquer (Berenguer *et al*., 2020).

A minimização das emissões de carbono da cadeia produtiva do cimento resume-se a duas estratégias principais: uso em maior escala de materiais cimentícios suplementares (MCS) com baixo CO_2 associado em substituição parcial ao clínquer e o uso mais eficiente do cimento Portland em argamassas e concretos (Scrivener *et al*., 2018). Se adicionados ao cimento, os MCS melhoram as propriedades de argamassas e concretos como aumento da resistência mecânica (Li et al., 2023; Matos Neto et al., 2015), redução do consumo de cimento (De Magalhães *et al*., 2018; De Souza Morais *et al*., 2018; Kim *et al*., 2023; Ye *et al*., 2023), do calor calor de hidratação e da carbonatação (Duarte *et al*., 2022; Martins *et al*., 2021), além de aumentar a resistência química e durabilidade (Pires *et al*., 2022).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é uma alternativa de MCS, pois esse subproduto da indústria sucroalcooleira contém alto teor de sílica amorfa, o que favorece o seu uso como material pozolânico e contribui para a melhoria das propriedades dos compostos cimentícios (BEZERRA *et al*., 2017; PAYÁ *et al*., 2002). A CBCA origina-se da queima do bagaço da cana, processo que visa gerar bioeletricidade dentro da matriz sucroalcooleira (Paris *et al*., 2016; Mourão e Paula, 2022).

Cada tonelada de cana-de-açúcar explorada gera 250 kg de bagaço e sua queima para a cogeração de energia culmina na formação de aproximadamente 6 kg de CBCA (FIESP, 2001). Caso sejam abandonadas a intempéries ou dispostas de maneira inadequada, a CBCA pode causar danos ambientais e à saúde humana (Frias *et al.*, 2011; Mourão e Paula, 2022). Logo, o uso da CBCA em argamassas e concretos como MCS traz consigo dois ganhos do ponto de vista da sustentabilidade ambiental: redução do consumo de clínquer e reutilização de um resíduo do setor sucroalcooleiro.

O cimento Portland é, em massa, o produto manufaturado mais importante do planeta, representando a segunda substância mais usada globalmente, ficando atrás apenas da água (Scrivener *et al*., 2018). Dentre as principais utilizações do cimento está a produção de concretos e argamassas, dois produtos altamente consumidos atualmente (UN-DESA, 2019), sendo o concreto um dos materiais mais consumidos no mundo (Uratani, 2023).

Dentre os diversos tipos de concreto, tem-se o concreto leve, que se distingue do convencional principalmente por apresentar menor massa específica e alterações nas propriedades térmicas e acústicas (Melo, 2009). A redução da massa específica do concreto leve é resultado da substituição parcial dos materiais sólidos por ar (Rossignolo, 2009) e este material apresenta uma massa específica entre 300 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 (Maycá *et al*, 2008). O concreto celular ou aerado, uma subdivisão do concreto leve, é fabricado a partir da adição de gás ou de espuma na pasta de cimento, que reagem produzindo gases e bolhas (Maycá *et al*, 2008).

Segundo Melo (2009), o concreto celular espumoso (CCE), objeto de estudo da presente pesquisa, pode ser produzido com uso de agente espumante, que por sua vez incorporam bolhas de ar de duas formas distintas:

- Espuma pré-formada: cujas características são controladas, produzida em equipamento específico para posteriormente ser incorporada no preparo da argamassa.
- Espuma produzida por ação mecânica, na qual o agente espumante é previamente diluído em água e misturado com as matérias-primas dentro do misturador, onde a espuma será gerada por meio da velocidade do equipamento durante a operação.

Diante do exposto, a presente pesquisa visa estudar os efeitos da introdução de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como MCS sobre as propriedades do CCE.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a produção do CCE, os seguintes materiais foram utilizados:

- Cimento Portland CP V ARI: escolhido pois, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), é o cimento com maior teor de clínquer (90 a 100%) disponível no mercado, o que permite uma avaliação mais isolada dos efeitos da introdução das cinzas no concreto;
- CBCAs: coletadas na empresa Decisão, produtora de cachaça artesanal, localizada em Sabinópolis, cidade do Vale do Rio Doce, estado de Minas Gerais, Brasil;
- Agregado miúdo de origem siliciosa, doado pela empresa Super Mix;
- Aditivo espumígeno, também denominado incorporador de ar;
- Aditivo hiperplastificante MAXIFLUID ® 960H, classificado como aditivo redutor de água tipo 2, de pega normal e à base de policarboxilatos e;
- água fornecida pela COPASA, companhia de abastecimento de Belo Horizonte, Minas Gerais.

2.2 MÉTODOS

Os procedimentos dividiram-se em: processamento da CBCA, caracterização dos materiais, produção do CCE, ensaios de desempenho do concreto e análise dos resultados.

2.2.1 Processamento da CBCA

As CBCAs foram peneiradas na malha de 4,75 mm (Figura 1) e, em seguida, na malha de 600 µm. As impurezas retidas nas peneiras foram descartadas.

Figura 1 – Material retido e passante na peneira de malha 4,75 mm.

As cinzas foram submetidas à moagem em moinho de bolas cerâmicas, durante uma hora, e, em seguida, foram requeimadas em forno sob a temperatura de 600 ^{o}C pelo período de três horas.

2.2.2 Caracterização dos materiais

A CBCA foi caracterizada física e quimicamente por meio dos ensaios de determinação da massa específica conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), estrutura cristalina por difração de raios X (DRX) e espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX). A massa específica do cimento foi fornecida pela empresa fabricante.

O agregado miúdo foi caracterizado através dos ensaios de determinação da composição granulométrica e módulo de finura conforme NBR 17054 (ABNT, 2022), como também determinação da massa específica por meio do uso do frasco de Chapman.

2.2.3 Produção do CCE

Foram produzidas três dosagens de concreto: Referência (REF), com 100% de cimento; CBCA-10 e CBCA-20, com 10% e 20% de substituição, em massa, do cimento pela CBCA, respectivamente. O Quadro 1 exibe os materiais usados em cada dosagem.

Quadro 1 – Traços de CCE.

Dosagem	Cimento (kg)	CBCA (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Superplastificante (kg)	Espuma (L)
REF	7,30	0,00	20,10	4,00	0,1095	9,0
CBCA-10	6,57	0,73	20,10	4,00	0,1095	9,0
CBCA-20	5,84	1,46	20,10	4,00	0,1095	9,0

As amostras de concreto foram produzidas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG, campus Nova Gameleira, Belo Horizonte, Brasil. Seguiu-se os procedimentos dispostos na NBR 12655 (ABNT, 2022) e a espuma e o concreto foram gerados por meio da mistura mecânica, com o uso dos equipamentos dispostos na Figura 2.

Figura 2 – Equipamentos usados para a mistura da espuma e do concreto.

A produção dos concretos dividiu-se nas seguintes etapas: (a) os aglomerantes (cimento e CBCA) e a areia foram homogeneizados a seco; (b) cerca de 75% da água foi adicionada aos materiais secos e realizou-se a mistura mecânica; (c) A argamassa foi misturada mecanicamente por dois minutos; (d) adicionou-se o restante da água contendo o aditivo hiperplastificante seguido de mais um minuto de mistura até se alcançar uma argamassa homogênea (Figura 3a); (e) simultaneamente à mistura da argamassa, foi realizada a produção da espuma, seguindo-se a recomendação do fabricante de se diluir o aditivo espumígeno na água na proporção volumétrica de 1:20 (Figura 3b); (f) a espuma formada foi então adicionada à argamassa e, em seguida, ambas foram misturadas por mais dois minutos, formando assim, o CCE; (g) o concreto foi inserido em moldes cilíndricos aço previamente lubrificados

com óleo vegetal; (h) as amostras de concreto foram submetidas à cura submersa nos primeiros sete dias e depois inseridas em cura úmida, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015).

(a) (b)

Figura 3 – Mistura mecânica da (a) espuma e da (b) argamassa.

2.2.4 Ensaios de desempenho do concreto

As amostras de CCE foram submetidas aos ensaios de compressão axial após 7, 21 e 28 dias de cura (Figura 4), seguindo-se as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 4 – Compressão de corpo de prova de CCE.

Os ensaios de absorção e índice de vazios das amostras de concreto foram realizados após 28 dias seguindo-se a NBR 9778 (ABNT, 2005). Para tal, foram utilizadas uma estufa (Figura 5a) e uma balança hidrostática (Figura 5b).

(a) (b)

Figura 5 – Ensaios de absorção: amostras de concreto na (a) estufa e na (b) balança hidrostática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.1 Resultados da caracterização dos materiais

O Quadro 2 exibe os principais resultados percentuais da composição de óxidos registrados no ensaio de FRX.

Quadro 2 – Composição de óxidos da CBCA (%).

SiO_2	K_2O	CaO	P_2O_5	SO_3	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3
39,81	25,87	11,50	4,57	4,59	5,75	2,15	4,26

Os dados do Quadro 2 evidenciam que a CBCA requeimada apresentou predominância de sílica (SiO_2) em sua composição de óxidos. O elevado percentual de K_2O da CBCA requer atenção, pois pode propiciar a ocorrência de reações álcali-agregados, o que seria desfavorável para a durabilidade dos materiais cimentícios, como argamassas e concretos.

Os ensaios de determinação da estrutura cristalina por DRX foram realizados para a amostra de CBCA moída e para a CBCA moída e requeimada. A Figura 6 exibe os difratogramas obtidos para cada amostra, sendo a cinza moída registrada em vermelho e a cinza moída e requeimada a 600ºC em azul.

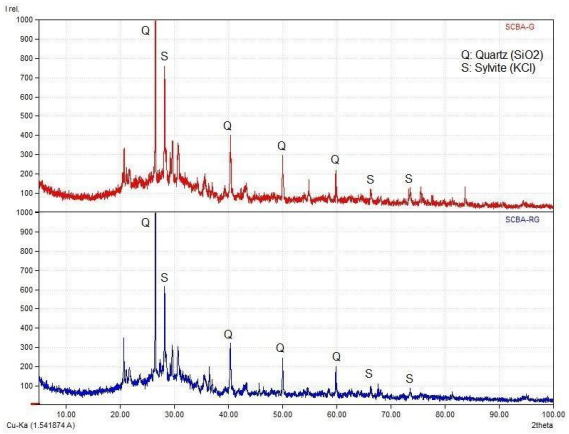


Figura 6 – Difratogramas da CBCA moída e da CBCA moída e requeimada.

Nota-se que houve identificação de picos de sílica cristalina para ambas as amostras, o que está coerente com o resultado registrado no ensaio de composição de óxidos. Além disso, observa-se que a requeima não alterou muito o caráter cristalino da CBCA, pois ao comparar os dois difratogramas, nota-se que não houve ampliação de halos.

Para o ensaio de massa específica, a CBCA registrou um resultado de 2,545 g/cm^3.

A Figura 7 apresenta a curva de distribuição granulométrica registrada para o agregado miúdo.

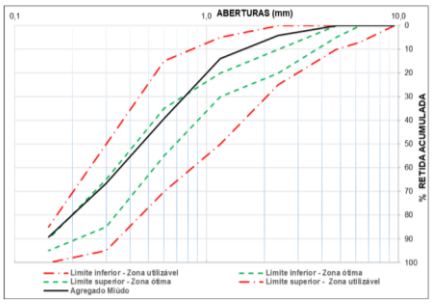


Figura 7 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

A Figura 7 evidencia que a areia utilizada encontra-se dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). O agregado apresentou módulo de finura de 2,87 e massa específica de 2,56 g/cm^3.

3.1.2 Resultados de desempenho mecânico

O Quadro 3 exibe o desempenho mecânico registrado por cada dosagem de concreto aos 7, 21 e 28 dias.

Quadro 3 – Desempenho mecânico dos concretos.

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Percentual em relação a REF
REF	7	5,53	0,206	100%
	21	7,12	0,057	100%
	28	7,27	0,354	100%
CBCA-10	7	6,10	0,223	110,30%
	21	7,73	0,414	108,56%
	28	7,99	0,543	109,90%
CBCA-20	7	4,72	0,275	85,36%
	21	6,08	0,370	85,40%
	28	6,78	0,133	93,26%

A Figura 8 apresenta graficamente os valores da resistência à compressão aos 7, 21 e 28 dias.

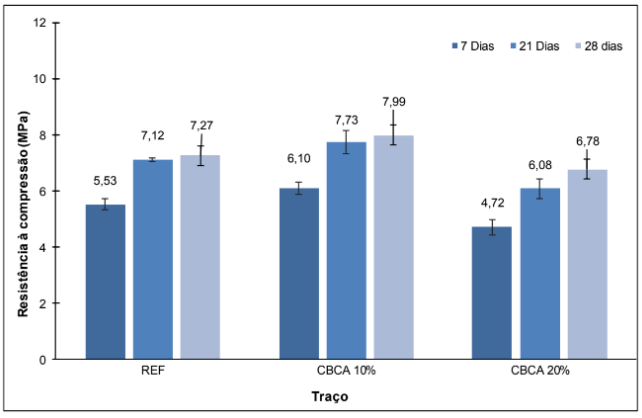


Figura 8 – Valores de resistência à compressão axial.

Diante dos resultados dispostos no Quadro 3 e na Figura 8, nota-se que as amostras com 10% de CBCA apresentaram o melhor desempenho mecânico para todas as três idades. Para a as idades de 7, 21 e 28 dias, o traço CBCA-10 registrou aumentos de 10,30%, 8,56% e 9,90%, respectivamente, em relação à REF. Estes resultados de resistência obtidos para a dosagem com 10% de cinzas estão coerentes com os resultados encontrados em outras pesquisas em estudos que utilizaram CBCA como MCS (Bezerra et al., 2017; Mourão e Paula, 2022).

As amostras com 20% de cinzas apresentaram quedas na resistência à compressão em relação à REF para todas as idades analisadas. Porém, é importante notar que, para a idade mais longa, essa diferença na resistência foi menos significativa, o que indica que as reações de ganho de resistência de materiais com CBCA ocorrem mais lentamente, tendo em vista que as cinzas retardam a taxa de hidratação de argamassas e concretos (Mourão e Paula, 2022). Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras investiguem o desempenho mecânico de concretos com CBCA após longos períodos de cura para avaliar sua resistência a longo prazo.

A NBR 17071 (ABNT, 2022) estabelece um valor mínimo resistência à compressão de 5 MPa para paredes de concreto celular estrutural. Portanto, com base nos resultados de resistência à compressão, pode-se afirmar que apenas a dosagem CBCA-20, na idade de 7 dias de cura, não atendeu ao limite mínimo estabelecido na referida norma.

3.1.3 Resultados de absorção por imersão

O Quadro 4 apresenta os resultados de ídice de absorção e índice de vazios das amostras de concreto após 28 dias de cura.

Quadro 4 – Índice de absorção e índice de vazios dos concretos aos 28 dias.

Dosagem	CP	Índice de absorção	Média	Índice de vazios	Média
REF	CP1	15,30%	15,34%	19,43%	19,69%
	CP2	15,37%		19,94%	
CBCA-10	CP1	17,72%	16,77%	21,75%	20,56%
	CP2	15,82%		19,37%	
CBCA-20	CP1	15,68%	15,71%	19,65%	19,65%
	CP2	15,73%		19,64%	

Os resultados dispostos no Quadro 4 indicam que a introdução das cinzas não alterou significativamente o índice de absorção e o índice de vazios, tendo em vista que as variações dessas propriedades entre os traços foram inferiores a 2%. Após 28 dias de cura, pôde-se observar que a introdução de 10% de CBCA melhorou o desempenho mecânico e não alterou significativamente a permeabilidade aberta à água do CCE.

4 CONCLUSÕES

Dentre todas as dosagens de CCE, aquela com 10% de CBCA apresentou o melhor desempenho mecânico para todas as idades analisadas, o que indica que este é o percentual de substituição mais adequado.

A partir de 21 dias de idade, todas as dosagens de concreto atenderam ao valor mínimo de resistência à compressão (5 MPa) estabelecido em norma para paredes de concreto leve estrutural.

A substituição parcial do cimento pela CBCA não teve um impacto significativo nos valores de índice de absorção e índice de vazios do concreto.

Para pesquisas futuras, sugere-se o estudo das reações álcali-agregado, devido ao alto teor de K_2O identificado na composição de óxidos da CBCA. Outra sugestão é o estudo do desempenho mecânico do concreto celular com incorporação de CBCA para longas idades, tendo em vista que as reações de ganho de resistência de materiais cimentícios com cinzas tende a ser mais lenta e, logo, espera-se ter resultados de resistência mecânica ainda mais promissores ao longo prazo.

Os experimentos práticos confirmaram os efeitos positivos da substituição parcial do cimento por CBCA na produção de CCE. Essa abordagem não só oferece uma destinação mais sustentável para um resíduo industrial, como também se alinha às crescentes preocupações com a sustentabilidade ambiental. A reutilização desse resíduo contribui para a redução do consumo de cimento Portland, auxiliando na diminuição da pegada de carbono da indústria do cimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17071: Parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações - Projeto, execução e controle - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2022.

BERENGUER, R. A. et al. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 2, p. 103655, abr. 2020.

BEZERRA, A. C. DA S. et al. Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. Revista Materia, v. 22, n. 1, 2017.

DE MAGALHÃES, L. F. et al. Iron Ore Tailing as Addition to Partial Replacement of Portland Cement. Materials Science Forum, v. 930, p. 125–130, set. 2018.

DE SOUZA MORAIS, I. et al. Sericitic Phyllite as Addition in Portland Cement. Materials Science Forum, v. 930, p. 131–136, set. 2018.

DUARTE, M. S. et al. Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. Journal of Building Engineering, v. 59, p. 105099, nov. 2022.

FIESP. SAO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SAO PAULO- FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). São Paulo: FIESP/CIESP, p. 37-54, 2001.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 4, p. 490–496, abr. 2011.

IPCC. SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf>.

LI, J. et al. Mechanical Properties and Microstructure Analysis of Cement Mortar Mixed with Iron Ore Tailings. Buildings, v. 13, n. 1, p. 149, 6 jan. 2023.

MARTINS,L. F. et al. Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials. Construction and Building Materials, v. 310, p. 125172, dez. 2021.

MAYCÁ, Jeferson; CREMONINI, Ruy A.; RECENA, F. A. Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE). Monografia de especialização. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2008.

MATOS NETO, J. A. DE et al. Sterile Clay Pozzolans from Phosphate Mining. Materials Research, v. 18, n. suppl 2, p. 230–234, 17 nov. 2015.

MELO, Guilherme Fabio de. Concreto celular polimérico: Influência da adição de resíduo poliéster insaturado termofixo. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2009.

MOUMIN, G. et al. CO2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. Renewable Energy, v. 145, p. 1578–1596, jan. 2020.

MOURÃO, A. B.; PAULA, J. N. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça como substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias. 4o congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis. ISBN: 978-65-00-55912-5, pag 606-619. Salvador - Bahia. 2022

PARIS, J. M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. Journal of Cleaner Production, v. 121, p. 1–18, maio 2016.

PAYÁ, J. et al. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v. 77, n. 3, p. 321–325, mar. 2002.

PIRES, M. et al. Phosphate rock waste in the production of cement tile. Results in Engineering, v. 16, p. 100701, dez. 2022.

ROSSIGNOLO, João Adriano. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações.São Paulo: Pini. . Acesso em: 07 nov. 2023. , 2009

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2–26, dez. 2018

SNIC. Sindicato Nacional de Cimento Portland. Relatório Anual, 2019.

SNIC. Sindicato Nacional de Cimento Portland. Relatório Anual, 2021.

UN-DESA. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420) Demographic Research. New York: [s.n.]

USGS. Mineral Commodity Summaries 2023. St Louis: [s.n.]. Disponível em < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS MODULARES PRÉ-MOLDADOS REFORÇADOS COM BAMBUSA VULGARIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

José Augusto Gomes Neto[a]; Normando Perazzo Barbosa[b]; Adriano da Silva Félix[c]; Schneider Almeida Paiva[d];

[a]UFPB (Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil), jaugustogn@hotmail.com

[b]UFPB (Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil), nperazzob@yahoo.com.br

[a]IFPB (Instituto Federal da Paraíba, Patos – PB, Brasil), adriano.s.felix@hotmail.com

[d]UFPE (Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil), schneider.paiva@ufpe.br

RESUMO

O paradigma industrial vigente na produção de materiais convencionais de construção, tais como o cimento e o aço, implica significativas implicações ambientais, destacando-se o elevado consumo energético. Essas atividades industriais exercem um impacto substancial tanto em ambientes rurais quanto em centros urbanos. Nesse contexto, essa pesquisa direcionou seus esforços no emprego do bambu, especificamente da espécie Bambusa vulgaris**,** comum na região Nordeste do Brasil, como material promissor para fomentar práticas sustentáveis no setor da construção civil. A investigação focou-se no desenvolvimento e na caracterização de painéis modulares pré-moldados reforçados com a mencionada espécie de bambu. Esses painéis possuem dimensões de 40 cm de largura, 240 cm de altura e 12 cm de espessura, incorporando quatro colmos de bambu dispostos paralelamente, integrados em uma matriz cimentícia composta por 45% de partículas de bambu triturado. Para avaliar a viabilidade estrutural dos painéis, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, simulando a aplicação prática em contextos de construção modular. Os resultados desses ensaios revelaram que os módulos (compostos por dois painéis conectados) demonstraram uma resistência de 370 kN/m. Conclui-se, portanto, que o painel desenvolvido não só exibiu um desempenho satisfatório nos ensaios mecânicos realizados, mas também ilustrou o potencial de aplicação do Bambusa vulgaris.

Palavras-chave: Painel modular, Construção sustentável, Bambusa vulgaris, Particulas de bambu, Compósitos cimentícios.

1 INTRODUÇÃO

O paradigma industrial vigente na produção de materiais convencionais de construção, tais como o cimento e o aço, implica significativas implicações ambientais, destacando-se o elevado consumo energético e a consequente emissão de poluentes. Essas atividades industriais exercem um impacto substancial tanto em ambientes rurais quanto em centros urbanos densamente povoados.

A produção em larga escala e maior facilidade de seu uso fez com que se difundissem rapidamente nos quatro cantos da Terra. Como consequência desse processo, houve o esquecimento de técnicas construtivas e de materiais antes utilizados nas construções, como terra crua, do bambu e das fibras naturais, materiais disponíveis nas regiões tropicais, inclusive no Brasil (Barbosa 2005).

Em resposta a esses desafios, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais alternativos sustentáveis tornaram-se imperativos. Materiais tradicionais como terra crua, bambu e fibras naturais, que foram largamente esquecidos na modernidade, apresentam-se como soluções viáveis devido à sua menor pegada ecológica. Notavelmente, o bambu destaca-se entre esses materiais por suas propriedades únicas de renovação e sustentabilidade. O bambu utiliza energia solar para seu crescimento e é capaz de absorver mais CO_2 do que libera, características que contribuem significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Nesse contexto, essa pesquisa realizada na Universidade Federal da Paraíba direcionou seus esforços no emprego do bambu, especificamente da espécie Bambusa vulgaris, comum na região Nordeste do Brasil, como material promissor para fomentar práticas sustentáveis no setor da construção civil. Este estudo ressalta o bambu não apenas pela sua característica de recurso renovável, mas também pelo seu ciclo de crescimento acelerado comparativamente ao da madeira, pela capacidade de fotossíntese que contribui para a absorção de CO_2, minimizando a liberação deste gás para a atmosfera.

A utilização do bambu como material de construção traz um ar de ineditismo para pesquisa, uma vez que, essa matéria prima natural só nos últimos anos que vem ganhando espaço e se destacando no mercado nacional. O uso do bambu justifica-se pela grande presença nas regiões de clima tropical, fácil cultivo e facilidade de manuseio, além de ser renovável. O sistema desenvolvido, além de ter excelentes características mecânicas, pode ser economicamente viável e ecoeficiente.

A investigação focou-se no desenvolvimento e na caracterização de painéis modulares pré-moldados reforçados com a mencionada espécie de bambu. O estudo inovou não apenas na composição material dos painéis, mas também na engenharia de seu design, incluindo o desenvolvimento de sistemas de encaixe tipo macho-fêmea e a criação de diversas tipologias de moldes para construção modular.

Esse trabalho contribuiu para desenvolvimento da pesquisa do bambu no Brasil, apresentando mais um sistema construtivo viável. Um dos resultados mais significativos e relevantes desse trabalho foi mostrar que é possível utilizar o bambu dentro de uma matriz cimentícia sem que ocorra grandes fissurações, o que vinha sendo testado a alguns anos sem sucesso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAINÉIS

Os painéis de vedação podem ser um dos principais elementos construtivos em uma edificação. Os mesmos podem ser executados de diversas maneiras, com o emprego de tecnologias que variam de região para região, levando-se em consideração o clima, a necessidade de vedação total ou parcial da

edificação ou dos ambientes, a cultura construtiva, dentre outros fatores que condicionam a escolha do tipo de painel.

Segundo Teixeira (2013), devido à grande preocupação que se tem hoje com as questões ligadas ao desequilíbrio ambiental, é cada vez maior a busca por materiais de baixos impacto ambiental e energético, capazes de reduzir o uso de materiais industrializados, os quais utilizam tecnologias que agridem o meio ambiente.

Para Ganapathy et al. (2002), o primeiro painel de bambu foi produzido na China, em 1940. Desde então, dezenas de tipos de painéis foram desenvolvidos. Todavia, do total de painéis produzidos, apenas alguns como o Bamboo Mat Board e o Bamboo Strip Board são provenientes de detalhadas investigações e produzidos em escala industrial. Entre os países produtores destacam-se a China, Índia, Tailândia, Vietnã, Costa Rica e Malásia.

Deve ser ressaltado que a grande vantagem da produção de painéis de bambu é o baixo conhecimento técnico necessário para produção dos mesmos, sendo possível a produção por comunidades dispondo apenas de conhecimentos básicos. Pode-se citar o exemplo da Colômbia onde se produzem painéis em pequenas comunidades sem a intervenção da indústria na produção dos mesmos.

Os painéis de bambu geralmente são caracterizados em duas categorias diferentes: os artesanais e os pré-fabricados. Dentre os pré-fabricados destacam-se os painéis de vedação e os painéis de bambu estruturais ou autoportantes. Esses pré-fabricados surgem como uma importante opção frente às exigências de qualidade e produtividade no mercado. Atualmente, é buscada cada vez mais a racionalização das obras civis, na tentativa de evitar desperdícios, perda de tempo e aumento da produtividade.

Diferentes tecnologias podem ser empregadas na produção de fechamentos verticais com painéis de bambu. Desde esteiras entrelaçadas até módulos pré-fabricados com o uso de madeira e de bambu, os quais podem ser revestidos ou não, e cuja ligação pode ser feita com o uso de fibras naturais ou sintéticas, adicionando mais um detalhe à estrutura (TEIXEIRA, 2013).

Para melhor ilustrar a classificação dos painéis de bambu foi confeccionado um fluxograma que descreve as categorias mais estudadas e desenvolvidas, conforme apresentado na Figura 1.

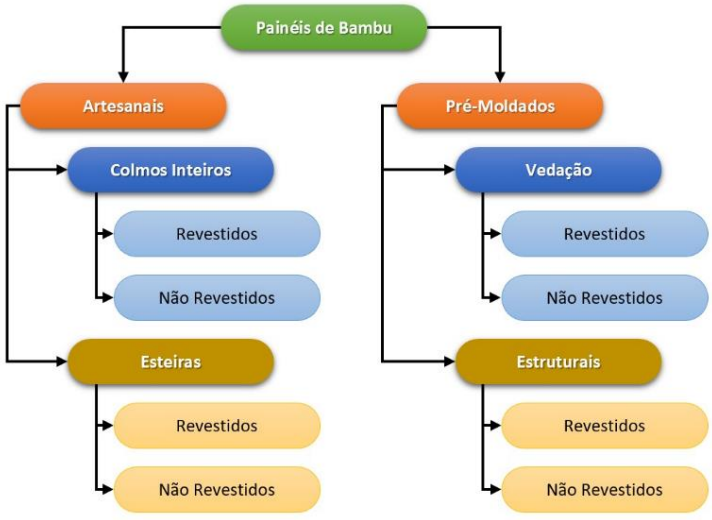


Figura 1: Fluxograma de classificação de tipos de painéis de bambu

Destaca-se ainda que dentre os painéis revestidos podem existir inúmeras variações e combinações de revestimentos tais como: terra, gesso, cimento Portland, etc, os quais, podem ser combinados com fibras naturais ou fibras artificiais. Também podem ser empregados outros materiais como EVA, EPS, argilas expandidas, entre outros, que podem entrar na mistura como agregados leves. Já os que não possuem revestimentos podem ser diferenciados com diferentes tipos de ligações e uniões efetuadas entre os colmos.

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 PAINEL MODULAR

O painel modular desenvolvido consiste em uma estrutura pré-fabricada de bambu revestido por um concreto, produzido fora do canteiro de obras. Depois do devido processo de cura, pode ser transportado para o local da obra onde será posicionado e fixado por meio do encaixe macho-fêmea em outro painel semelhante e por uma cinta de amarração que une todos os painéis utilizados.

No estudo foi desenvolvido um painel com as seguintes dimensões: 40 cm de largura, 12 cm de espessura e 260 cm de altura (Figura 2). Possui encaixe do tipo macho – fêmea nas laterais e o bambu sobressai no topo 5cm para engaste na cinta de amarração superior.

A espessura de 12 cm foi adotada porque o bambu utilizado é da espécie Bambusa vulgaris que tem certa tortuosidade. Com um bambu mais linear, como o Mossô (Phyllostachys pubescens) poder-se-ia chegar à espessura de 10 cm.

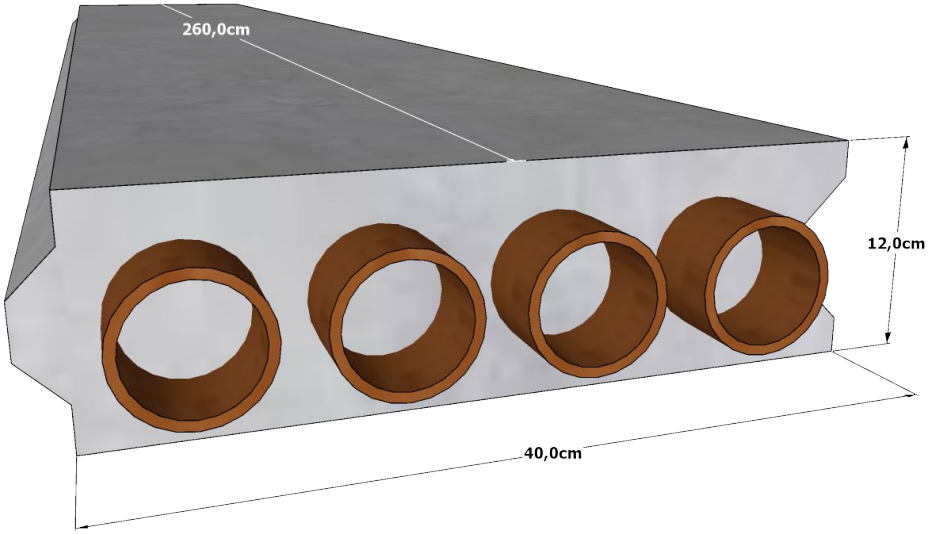


Figura 2: Painel modular desenvolvido

Para o painel modular apresentado foram usados 4 colmos de bambu da espécie B. vulgaris com o diâmetro externo máximo de 7 cm. Essa medida justifica-se para que seja possível garantir o recobrimento mínimo de 2,5 cm para cada lado do painel uma vez que o mesmo possui 12 cm de espessura.

Naturalmente, por ser um material que não passou por nenhum processo industrial, os colmos de bambu apresentam uma grande variação geométrica (diâmetro, espessura da parede, e comprimento do internó), além da tortuosidade natural, que é uma característica dessa espécie.

Em conjunto com os colmos de bambu foi utilizada uma matriz cimentícia com a incorporação de particulas de bambu da especie Bambusa vulgaris que passaram por um processo de trituração em um moinho de martelo e posteriormente em um moinho de facas. Foi incorporado 45% do volume da matriz cimentícia com essas partículas, o que garantiu uma menor massa específica e resistência à tração da matriz.

3.2 FÔRMA METÁLICA

Para produção dos painéis foi necessário o desenvolvimento e confecção de uma fôrma que pudesse suportar o peso do painel sem sofrer deformações, e também que facilitasse a desfôrma da peça. A fôrma projetada deveria atender ainda o requisito de durabilidade uma vez que com a mesma fôrma seriam moldados vários painéis, logo deveria possuir dispositivos que permitissem a montagem e desmontagem sem perder suas dimensões.

A Figura 3 mostra o projeto 3D da fôrma. O material escolhido para sua confecção foi a chapa de aço de 2mm, a escolha desse material deu-se pela sua resistência e durabilidade.

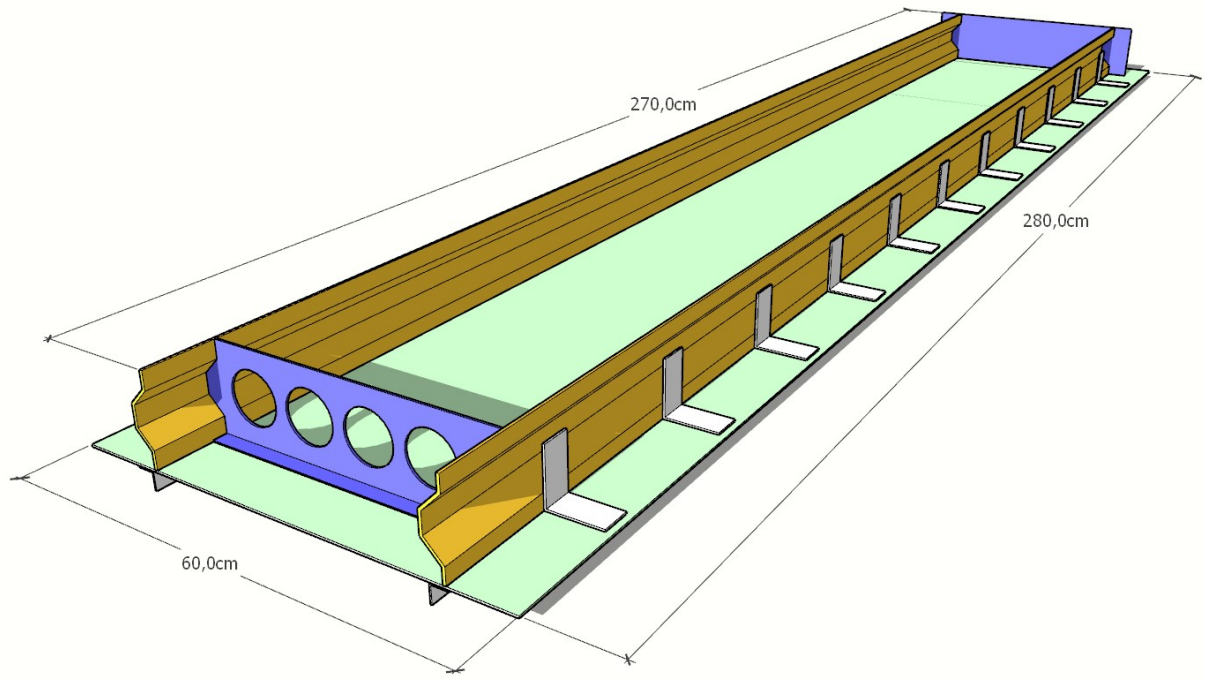


Figura 3: Forma metálica desenvolvida para os painéis modulares

A chapa de aço de 2mm foi utilizada para todas as partes da fôrma (base/fundo e laterais). A fôrma possui laterais com encaixes macho-fêmea que foram confeccionadas com a chapa de aço dobrada em uma dobradeira industrial para garantir os ângulos corretos desenvolvidos no projeto. O serviço de corte e dobra das chapas de aço foi terceirizado e o serviço de solda foi feito no próprio laboratório. A fôrma possui em todo o entorno dispositivos que garantem o esquadro das faces laterais. São 11 suportes em cada lateral e 3 na parte de baixo. Todas os equipamentos são soldados nas laterais de chapa dobrada e parafusadas na chapa da base com parafuso, arruelas lisas, arruelas de pressão e porcas (Figura 4), o que garante uma segurança para não afrouxar durante a vibração da forma no processo de moldagem.

Figura 4: Detalhe da forma, mãos francesas

Na parte de baixo da base foi adicionado uma trama de cantoneiras de 1 polegada e soldadas na chapa de aço de base para garantir que a fôrma não entorte ou saia do nível durante o processo de moldagem. A Figura 4 mostra o detalhe do encaixe macho-fêmea.

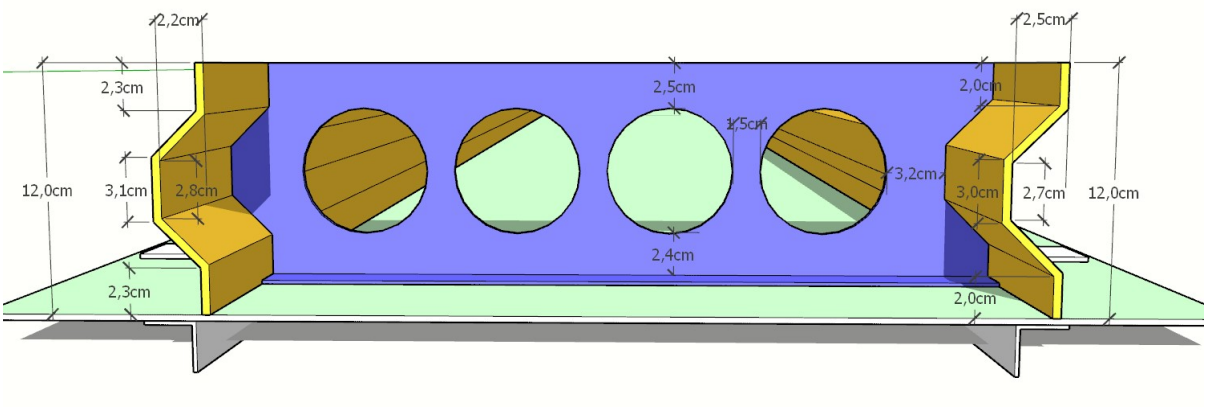


Figura 4: Detalhe do encaixe macho-fêmea da forma

Para o desenvolvimento do sistema construtivo como um todo é necessário a produção de pelo menos 3 tipos de painéis sendo, o painel tradicional de 260cm de altura, o meio-painel com 110cm de altura e o painel de canto. A Figura 5 a seguir mostra o design dos paineis citados.

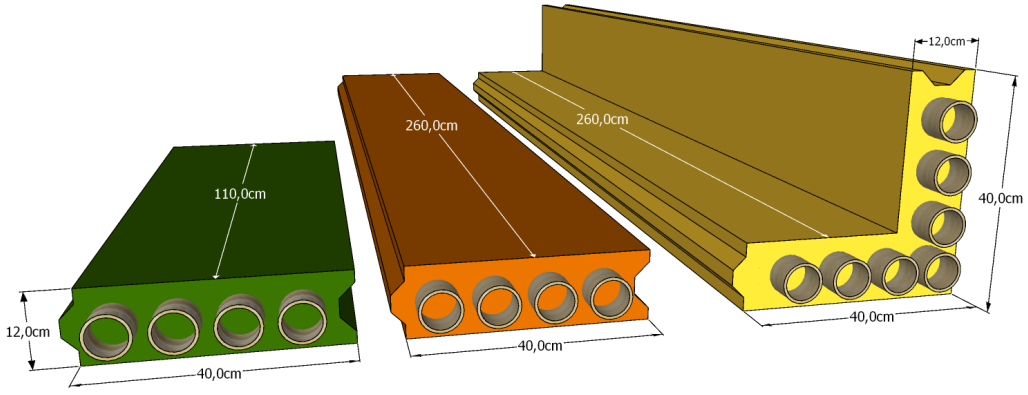


Figura 5: Tipos de painéis desenvolvidos para sistema construtivo.

Para moldar o painel de canto foi desenvolvido uma fôrma que foi elaborada para realizar o lançamento e adensamento do bio-concreto utilizado nos paineis na forma vertical. A fôrma foi desenvolvida para ser preenchida em três estágios visto que é necessário o correto adensamento para evitar vazios. A Figura 6 mostra o projeto da fôrma supracitada.

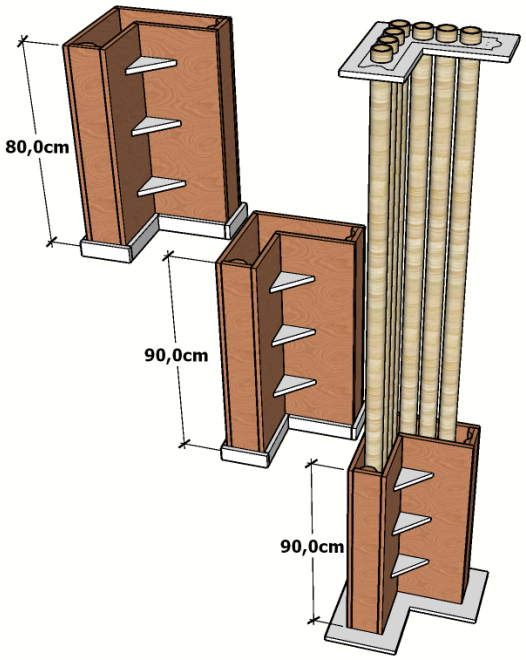


Figura 6: Forma para painel de canto

3.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Para determinação da resistência a compressão os painéis foram ensaiados em pares, denominados de módulos. O módulos contem dois paineis unidos pelo encaixe macho-femea e sobre eles foi posicionado um perfil H de aço de 12cm de altura para distribuição da carga. Foram ensaiados dois módulos em um pórtico de ensaios estruturais com uma célula de carga de 500kN. Na Figura 7 a seguir pode observar o projeto do posicionamento dos módulos no equipamento.

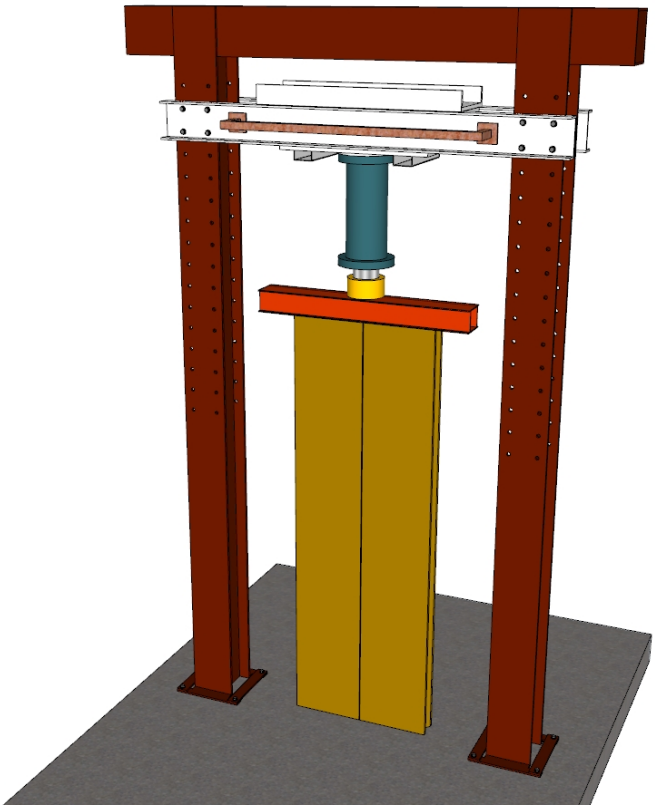


Figura 7: Esquema de fixação dos painéis para de ensaio de compressão

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 mostra a forma do painel modular com os colmos de bambu posicionados, travados, espaçadores fixados na parte inferior e limitadores de movimento do bambu fixados.

Foi utilizado como espaçadores pequenos pedaços de concreto oriundos de sobras de outros ensaios na espessura de 2,5cm. Os limitadores de movimento foram utilizados para reduzir a movimentação do bambu durante a moldagem uma vez que os colmos tendem a subir, devido ao seu baixo peso específico. Esses limitadores foram feitos de ripas de bambu e posicionados por cima os colmos e sobre pressão das laterais da forma de aço.

A Figura 9 mostra o processo durante a moldagem. Todos os painéis foram moldados com a forma de aço sobre uma mesa vibratória, que ajudou nesse processo.

Figura 8: Forma do painel modular pronto para concretagem

Figura 9: Painel modular durante o processo de moldagem sobre a mesa vibratória

No ensaio de compressão foi aplicada um carga de compressão crescente e com velocidade constante nos módulos até a sua ruptura. Para registrar o deslocamento foi utilizado um relógio comparador de precisão 0,01mm. A carga ruptura dos Módulo 1 e 2 foi de 296kN e 285kN, respectivamente, o que corresponderia a uma tensão média de aproximadamente 3MPa no módulo. Porém a tensão no bambu é muito superior porque o módulo de elasticidade dele é superior ao do concreto com partículas de bambu, por metro linear a carga de ruptura seria 370kN/m. A Figura 10 e Figura 11 mostram o estado final de ruptura dos Módulos 1 e 2.

Figura 10: Imagem da ruptura final do Módulo 1

Figura 11: Imagem da ruptura final do Módulo 1

Pode-se observar que os módulos obtiveram formas de ruptura distintas. O Módulo 1 rompeu na região central do painel, um tipo de deformação já esperada devido a esbeltez dos painéis. Já o Módulo 2 teve sua ruptura na parte superior, provavelmente por imperfeição na transmissão de carga do perfil metálico para o de bambu. Houve uma desagregação do concreto que contribuiu para rompimento da peça.

Acrescenta-se que os painéis, mesmo após esse ensaio, mantiveram sua integridade após remoção da carga, o que mostra que a adição de partículas de bambu ao concreto garantiu boas propriedades de resistência à tração.

Buscando-se na literatura por outros estudos foi possível identificar estudos que realizaram teste e compressão semelhantes ao realizado nesse estudo e criar uma tabela (Tabela 1) comparativa de resistências a compressão para diversos tipos de sistemas construtivos.

Tabela 1: Resistencias a compressão de paredes de diferentes sistemas construtivos

Tipo de Sistema	Autor	Ano	Tensão (MPa)	Carga (kN/m)
Painéis cimentícios com reforço de bambu (e = 12cm)	Gomes Neto	2021	3,0	370,0
Painéis cimentícios com reforço de bambu (e = 10cm)	Gomes Neto	2017	3,0	300,0
Parede de Blocos de GessoPET – RF	Medeiros	2016	2,2	300,0
Parede de Blocos de GessoPET – EVA	Medeiros	2016	1,75	250,0
Parede de Blocos de GessoPET – EPS	Medeiros	2016	1,3	160,0
Parede de Adobe	Silveira et al.	2015	---	275,0
Parede de Adobe	Wu et al.	2012	0,93	---
Parede de Bloco de Terra Comprimida	Queiroga	2016	1,30	208,0
Parede de Blocos Cerâmicos de Alvenaria Estrutural (29 cm)	Nessralla	2013	2,28	320,0
Parede de Blocos Cerâmicos de Alvenaria Estrutural (44 cm)	Nessralla	2013	1,91	270,0

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi utilizada a espécie de bambu Bambusa vulgaris como reforço estrutural de painéis modulares pré-moldados de matriz cimentícia com adição de partículas de bambu.

No processo de moldagem dos painéis foram utilizadas técnicas desenvolvidas para garantir um adequado travamento das peças dentro da forma. Foi desenvolvido ainda o projeto e confecção de uma forma metálica desmontável para moldagem dos painéis, que se mostrou adequada.

Os painéis ficaram com uma massa de aproximadamente 106kg após 28 dias de cura.

O ensaio de compressão do painel mostrou que os módulos (dois painéis conectados) apresentaram resistência próxima de 300 kN, que representa por metro linear uma capacidade de carga de cerca de 370 kN/m. Mesmo considerando-se um fator de segurança de 3, a carga de serviço seria adequada para edificações de mais de dois pisos.

Os resultados indicam que o painel proposto apresentou comportamento adequado os testes realizados, e mostram que é possível desenvolver projetos arquitetônicos com seu emprego, atendendo aos requisitos mínimos de desempenho nas edificações. Também indicam que o Bambusa vulgaris tem propriedades que lhe permitem ser utilizado estruturalmente.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Normando Perazzo. Considerações sobre Materiais de Construção Convencionais e Não-Convencionais. (Artigo Técnico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

GANAPATHY, P. M.; HUAN-MING, Z.; ZOOLAGUD, S. S. Bamboo panel boards: a state of the art review. Beijing, 2002.

GOMES NETO, J. A. Painel modular intertravado de matriz cimentícia com reforço estrutural de Bambusa vulgaris. 131p. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.

MEDEIROS, M. P. Desempenho térmico de blocos de vedação com o uso de gesso e de resíduos poliméricos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

NESSRALLA, M. A. Resistência a compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Belo Horizonte, 2013.

QUEIROGA, M. S. Resistencia a compressão de painéis reduzidos de alvenaria de BTC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

SILVEIRA, D., VARUM, H., COSTA, A., CARVALHO, J. Mechanical properties and behavior of traditional adobe wall panels of the Aveiro District. J. Mater. Civ. Eng., 2015, 27(9): 04014253

TEIXEIRA, A. A. Desempenho de Painéis de Bambu para habitações econômicas: Aplicação na Arquitetura e Ensaios de Durabilidade. 274p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – UNB, Brasília, 2013.

WU, F., LI, G., LI, H., JIA, J. Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry. Materials and Structures (2013) 46:1449–1457. DOI 10.1617/s11527-012-9987-y

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO MECÂNICO E POROSIDADE DE AGLOMERANTE OBTIDO DA DESIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND

Edinéia Alves Benjamin[a]; Augusto César da Silva Bezerra[b]; Eduardo Chahud[c]; Dayana Cristina Silva Garcia [d]; Maria Teresa Paulino Aguilar[e]

[a]UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil, neiaengenharia@gmail.com

[b]CEFET- MG- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5.253, Belo Horizonte, MG, Brasil, augustobezerra@cefetmg.br

[c] UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil, chahud@ufmg.br

[d]UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil, dayanacsgarcia@ufmg.br

[e]UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil, teresa@ufmg.br

1 RESUMO

A grande quantidade de resíduos de construção e demolição que são depositados em aterros aumenta o impacto ambiental, e é um desafio no contexto da construção sustentável. Uma das alternativas de minimização desses impactos é a utilização desses resíduos, após reciclagem, como agregados. No entanto, essa solução agrega pouco valor aos resíduos e em longo prazo, pode causar maiores problemas ao se reciclar os concretos com agregados reciclados. Uma possibilidade mais interessante, mas ainda pouca estudada é a utilização dos resíduos de concretos para produção de um novo aglomerante. Neste contexto, este trabalho analisa o desempenho de argamassas para fins estruturais fabricadas com aglomerante obtido a partir de resíduos de pastas de cimento Portland e areias tratadas. Para a obtenção do aglomerante alternativo, pasta de cimento de alta resistência inicial foi submetida à britagem, moagem e tratamento térmico por 2 horas a 700°C, seguido de resfriamento rápido. Foram então, produzidas argamassas contendo o material desidratado para substituir 0, 25%, 50%, 75% e 100% do cimento Portland pelo aglomerante alternativo, areia tratada mecanicamente com tamanho médio de 3,6 µm e areia normatizada. Foram utilizados dois fatores água cimento: um de 0,5 para as amostras com 0, 25%, 50% de substituição do CPV pelo aglomerante alternativo; e outro de 0,7 para as amostras com 50%, 75% e 100%. Essas duas condições foram realizadas, porque o cimento reciclado demanda muita água. Após a cura submersa por 7 e 28 dias, foi realizado o ensaio de resistência à compressão e porosidade. Também aos 28 dias foi realizado ensaio de resistividade elétrica volumétrica. Os resultados indicam que a resistência à compressão aumentou com a utilização do aglomerante alternativo, obtendo o maior valor de 48,9 MPa na amostra com 50% de substituição do cimento Portland e relação água/cimento de 0,5. Nas amostras com relação água/cimento de 0,7 o maior valor de resistência à compressão foi de 36,9 MPa na amostra com 75% de substituição. No entanto, em termos comparativos, a resistividade elétrica das argamassas contendo material desidratado reduziu o que indicaria uma maior conectividade dos poros, o que torna os compostos mais suscetíveis aos agentes agressivos externos.

1.1 PALAVRAS-CHAVE

Cimento alternativo, desidratação, resistência mecânica, resistividade elétrica.

2 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um insumo essencial no setor da construção civil, sendo um elemento fundamental para a produção de concretos e argamassas. Contudo, durante seu processo produtivo ocorre liberação de CO_2, e em uma escala global a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% de dióxido de carbono produzido pela humanidade (SNI, 2019). A crescente urbanização e a modernização de infraestruturas, que ocorrem mundialmente, acarretam uma maior demanda por concreto. Logo, é fundamental reduzir o impacto ambiental vinculado à produção do concreto no contexto do desenvolvimento sustentável. (AKHTAR; SARMAH, 2018). Por outro lado, em todo o planeta é crescente a produção de resíduos provenientes tanto de construção quanto de demolição (DUAN *et al.,* 2019). A reciclagem desses resíduos é uma contribuição positiva para a sustentabilidade pois pode minimizar os impactos ambientais uma vez que a maior parte dos resíduos de concreto é enterrada como lixo (WANG; MU; LIU, 2018).

A reutilização de resíduos de construção e demolição (RCDs) pode reduzir de maneira expressiva o uso de recursos naturais e contribuir para a redução da emissão de gases de efeito estufa (PAZ *et al.*, 2023). Estudos indicam que a substituição parcial do cimento Portland por pó misto reciclado (RMP) originado de resíduos de construção e demolição pode melhorar o desempenho mecânico de pastas. Essa estratégia seria eficaz para viabilizar uma economia circular e apresenta-se como uma alternativa sustentável na construção civil (OLIVEIRA *et al.*, 2024). Uma solução abrangente para lidar tanto com os RCDs quanto com os desafios enfrentados na produção de cimento seria a reutilização de argamassas presentes nesses resíduos. Estudos de HE *et al.* (2019) apontam que a desidratação de pastas em temperaturas elevadas gera o chamado cimento reciclado (RC). Outra pesquisa mostra que o RC obtido a partir de resíduos apresentou propriedades físicas semelhantes às obtidas do cimento Portland, além de reduzir a emissão de CO_2 e o consumo de energia (WANG; MU; LIU, 2018). Nessa linha, XU *et al.* (2022) recomendam uma temperatura de ativação térmica ótima na faixa de 650°C a 750°C, com uma taxa de aquecimento de 10° C por minuto e um tempo de tratamento de 2 horas. Indicam ser necessária a adição de um componente mineral como ganga de carvão e escória de alto-forno para melhorar o desempenho. Sugerem um resfriamento rápido e natural, e que a dimensão máxima ideal as partículas do RC seja semelhante à do cimento Portland. A utilização de agentes redutores de água e retardadores de pega contribuem para os efeitos da demanda de água promovendo significativamente a redução do impacto ambiental. Também existem pesquisas que indicam que areia, natural ou presente nos RCDs, poderia ser utilizada como um material cimentício suplementar, pozolana, quando ativada mecanicamente, atingindo granulometria em torno de 5 µm (BENEZET e BENHASSAINE 1999; MENEZES *et al.*, 2018).

Neste contexto, este estudo de caráter exploratório tem como objetivo obter e avaliar um aglomerante alternativo por meio de processamento térmico e mecânico, utilizando pastas de cimento Portland CPV-ARI e areia ativada mecanicamente. Tais procedimentos permitiriam a desidratação do cimento e a ativação areia, que funcionaria com um material cimentício suplementar, gerando assim um aglomerante alternativo de baixo impacto ambiental, cimento reciclado, para a construção civil. Acredita-se, que, assim, se teria melhor compressão dos mecanismos envolvidos no aproveitamento de resíduos de argamassas pela eliminação de interferências inerentes ao estudo envolvendo resíduos.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Para obtenção do aglomerante alternativo foram utilizados cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV – ARI) e água potável. Com cimento reciclado foram produzidos compostos cimentícios utilizando areia quartzosa normatizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), areia ativada

por tratamento mecânico (tamanho médio de 3,6 µm, 37.400m^2/g de área superficial, 958,2mg de $Ca(OH)_2$ fixado/g), aditivo superplastificante à base de policarboxilato, borato de sódio como retardador de pega e água potável. Os compostos foram caracterizados quanto à porosidade, resistência à compressão e resistividade elétrica.

3.1 OBTENÇÂO CIMENTO RECICLADO

O cimento reciclado foi obtido por meio de tratamento termomecânico de pastas de cimento produzidas em laboratório, de modo a se ter um maior controle do processo. As pastas foram confeccionadas com relação água/cimento de 0,5 e curadas em câmara úmida (umidade relativa acima de 95%) por 28 dias. Posteriormente, o material endurecido passou por dois britadores de mandíbulas com aberturas distintas, para obtenção de um material com dimensão máxima de 20 mm. Esse material foi seco em estufa a 100°C por 24 horas e moído em um moinho de bolas horizontal por 3 horas.

O pó obtido foi tratado termicamente em forno com taxa de aquecimento de 10°C/min, temperatura de termoativação de 700°C e tempo de permanência de 2 horas. Em seguida, o material foi retirado do forno e resfriado ao ar até a temperatura ambiente, obtendo-se então o cimento reciclado. O processo de obtenção do cimento reciclado pode ser visualizado na Figura 1. O material final apresenta D50 de 10,69 µm.

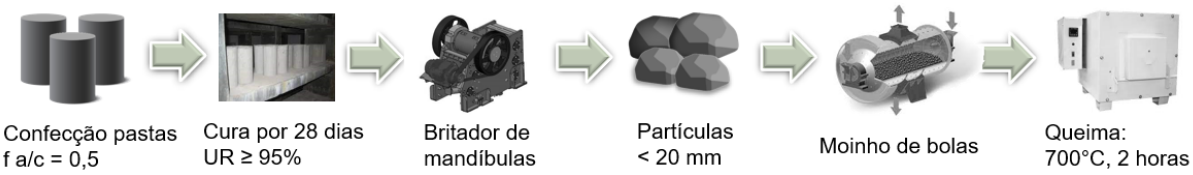


Figura 1 – Esquema da obtenção do cimento reciclado

3.2 OBTENÇÃO DO COMPOSTO CIMENTÍCIO

Para determinar o comportamento do cimento reciclado, foram moldadas argamassas com substituição do cimento CPV por 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de cimento reciclado. O traço utilizado foi de 1:0,25:3:0,5 (aglomerante, areia ativada, areia e água) com base na NBR 7215/19. Embora essa norma traga o valor de relação água/cimento de 0,48, decidiu-se utilizar o valor de 0,50 como alguns pesquisadores (DE ARAÚJO *et al.*, 2017). Para proporções acima de 50% de substituição foi utilizada relação água cimento de 0,7. Esse ajuste foi feito devido a maior demanda de água pelo cimento reciclado, procedimento também adotado por outros pesquisadores (XU *et al.*, 2022). É importante ter em mente que, nesse caso, tem-se duas condições: a primeira com maior teor de cimento CPV e relação água cimento de 0,5; e a segunda com maior teor de cimento reciclado e relação água de cimento de 0,7.

No Quadro 1 estão apresentadas as misturas realizadas para a confecção dos corpos de prova. O aditivo superplastificante foi ajustado para que todas as amostras apresentassem valores de fluidez no teste *flow table* de 300 mm ± 30 mm. Essa fluidez mais alta foi escolhida para permitir a moldagem mais fácil e rápida. Decidiu-se utilizar o borato de sódio para controle do tempo de pega. O teor foi fixado em 2% de bórax em relação a massa de cimento reciclado. Segundo estudos de XU

et al., (2022) a utilização de retardadores de pega juntamente com redutores de água podem reduzir os efeitos adversos da alta demanda de água e o curto tempo de pega inicial.

Quadro 1 – Proporção das misturas utilizadas para confecção das amostras

Amostra	CPV (g)	Cimento reciclado (g)	Areia (g)	Areia ativada (g)	Água (g)	Aditivo superplastificante (g)	Bórax (g)	Relação água/cimento
CPV-ARI	400	-	1200	100	200	2,0	0	0,5
25RC	300	100	1200	100	200	7,6	2,0	0,5
50RC	200	200	1200	100	200	14,0	4,0	0,5
50RC	200	200	1200	100	280	2,8	4,0	0,7
75RC	100	300	1200	100	280	6,0	6,0	0,7
100RC	-	400	1200	100	280	20,0	8,0	0,7

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os procedimentos de moldagem de corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015d). As misturas foram então vertidas em moldes cúbicos de 40 mm e compactadas em duas camadas adequadamente usando uma mesa vibratória para o adensamento. Os corpos de prova foram identificados e recobertos com plástico filme e mantidos nos moldes por 24 horas. Em seguida, as amostras foram desmoldadas e submetidas à cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio à 23 ± 2°C, conforme recomendações da 5738 (ABNT, 2015d). As idades para a realização dos ensaios foram de 7 e 28 dias, e os resultados corresponde à média de 6 corpos de provas.

O ensaio foi realizado equipamento Shimadzu Autograph modelo AGS-X com capacidade máxima de 300 KN, o carregamento utilizado seguiu as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT, 2018) de 0,45 ± 0,15 $MPa.s^{-1}$ e todo controle do ensaio, bem como a captação de dados, foi realizado com apoio de equipamentos computacionais.

3.4 POROSIDADE

A porosidade das amostras foi avaliada por meio do índice de vazios determinado com base nas recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009) Os valores foram obtidos por meio da Equação 1.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \; x \; 100$$

Em que I_v é o Índice de vazios, expresso em %, m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura, expressa em g, m_s é massa da mostra seca em estufa, expressa em g, e m_i é massa da amostra imersa em água após fervura, expressa em g.

3.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA

A determinação da resistividade elétrica volumétrica se baseou nas recomendações da NBR 9204 (ABNT, (2012) e IBRACON (2021). Para esse ensaio foram utilizadas apenas as amostras moldadas com fator água/aglomerante de 0,5, em função do fator água cimento utilizado e dos resultados do ensaio de resistência à compressão. Os procedimentos de moldagem de corpos de prova e curas

foram os mesmos da resistência à compressão, exceto pela utilização de moldes cilíndricos (50mm de diâmetro por 100 mm de comprimento). As amostras foram adensadas em duas camadas usando mesa vibratória por 30 segundos. O ensaio foi realizado na idade de 28 dias.

Para determinar a resistividade elétrica volumétrica, um circuito em série foi construído (Figura 1), composto por duas resistências elétricas: uma do equipamento e outra da amostra. Foram inseridas duas placas de cobre com palhas de aço umedecidas na superfície de contato entre elas e as amostras, assegurando a condição da corrente elétrica. Após a montagem do equipamento, uma tensão de 6,9 volts foi aplicada entre as placas (dois eletrodos situados nas superfícies da base e do topo das amostras). Logo, foram realizadas leituras da corrente elétrica que atravessa a amostra.

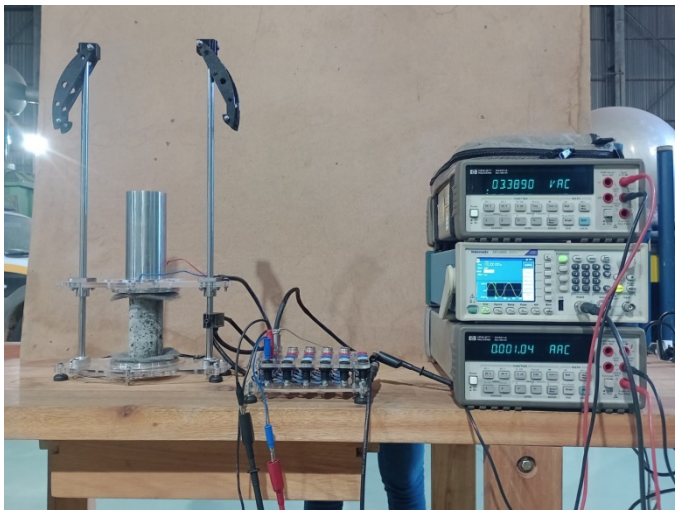


Figura 1 - Sistema utilizado para o ensaio de resistividade elétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 2 estão apresentados os resultados de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 para as amostras com relação água/cimento de 0,5. Ao utilizar a relação água/cimento de 0,5 procurou-se analisar o teor máximo de substituição do cimento Portland CPV-ARI por cimento reciclado. Na idade de 7 dias, praticamente não se observa influência do uso de cimento reciclado. Aos 28 dias, observa-se que a amostra com 50% de cimento reciclado apresentou o maior ganho de resistência (48,9 MPa), com aumento de aproximadamente 15% em comparação a amostra referência (41,9 MPa).

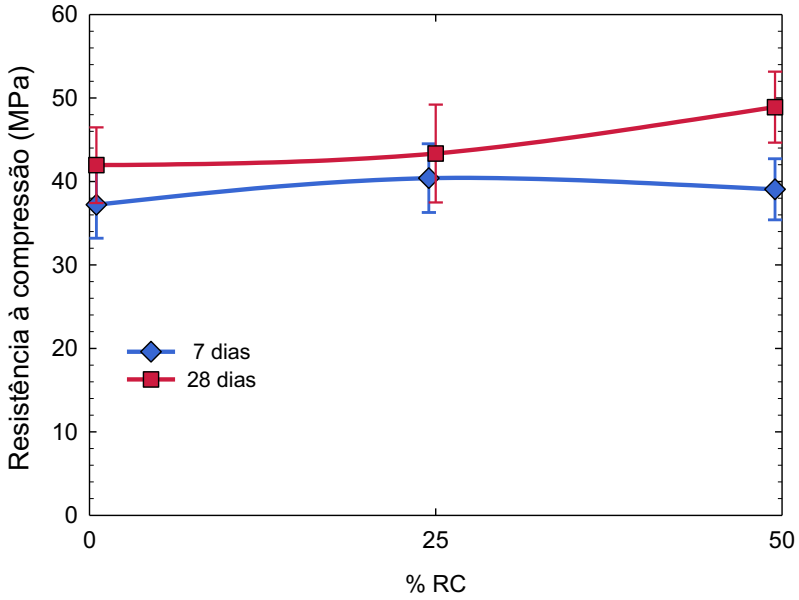


Figura 2 - Resistência média à compressão aos 7 e 28 dias para as amostras com relação água/cimento de 0,5.

Na Figura 3 são apresentados os valores médios da resistência à compressão das argamassas moldadas com relação água/cimento de 0,7, contendo 50%, 75% e 100% de cimento reciclado. Nas condições em que foi utilizada relação água/cimento de 0,7, buscou-se avaliar o teor máximo de cimento reciclado que poderia ser utilizado em argamassas. Em todos os casos, observa-se um ganho nos valores de resistência à compressão aos 28 dias em relação aos 7 dias. Na idade de 7 dias, observa-se que o menor valor de resistência à compressão foi obtido na amostra com 50% de cimento reciclado (26,7 MPa) e com valores próximos a 30 MPa para as amostras 75RC e 100RC. Além disso, o maior valor foi obtido na amostra RC75 aos 28 dias, na qual, esse valor é aproximadamente 19,2% superior ao observado na argamassa feita com 50% de cimento reciclado (RC50) e praticamente o mesmo da argamassa confeccionada com 100% de cimento reciclado (RC100).

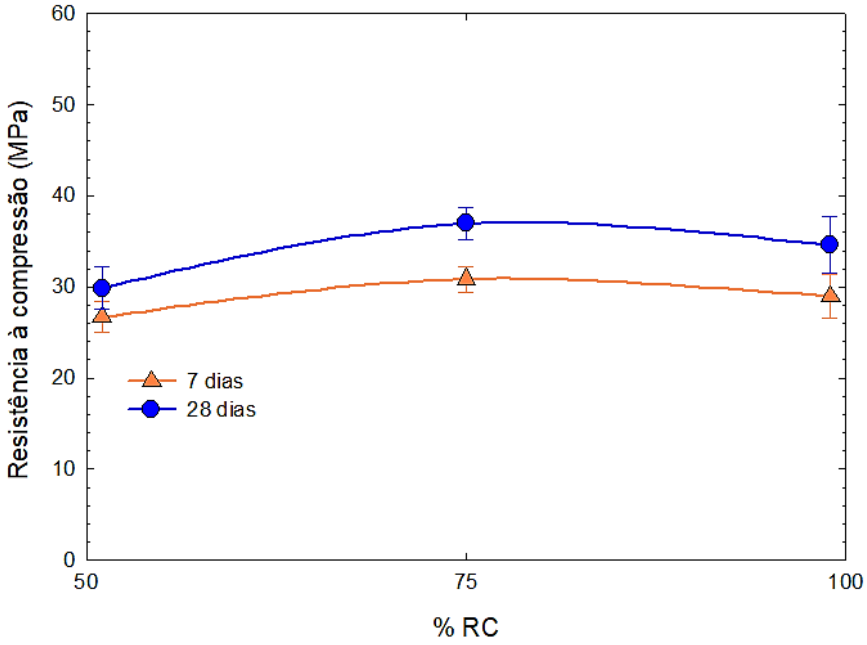


Figura3 - Resistência média à compressão aos 7 e 28 dias relação água/cimento de 0,7.

No estudo conduzido por (CARVALHO, 2020) foram analisados como a temperatura de ativação afeta as características do cimento reciclado e as propriedades das pastas produzidas por ele. Foram confeccionadas pastas de cimentos reciclados ativados nas temperaturas entre (400-900°C), de uma maneira geral foi observado que as pastas com cimento reciclado demandaram maior exigência por água podendo alcançar de 2 a 3 vezes as pastas produzidas com cimento não tratado nas pastas feitas com cimento reciclado tratado a 700°C foi utilizado uma relação água/cimento de 0,72. Contudo, foi observado que a resistência máxima alcançada aos 28 dias foi de 19,2 MPa em pastas com uma relação água/cimento de 0,72 e com utilização de cimento reciclado tratado a 650°C. Por outro lado, conforme destacado por (XU *et al.*, 2022) uma boa pasta de cimento termicamente ativado pode atingir uma resistência média à compressão de 32 MPa aos 28 dias.

4.2 POROSIDADE

Os resultados de porosidade das amostras estão apresentados na Figura 4. É possível observar a tendência de redução da porosidade aos 28 dias. Observa-se que as amostras com relação água/cimento de 0,7 possuem porosidade de praticamente o dobro em comparação com a porosidade das amostras com relação água/cimento de 0,5. Além disso, nota-se que, com relação água/cimento de 0,7 houve aumento da porosidade com o aumento da quantidade de cimento reciclado.

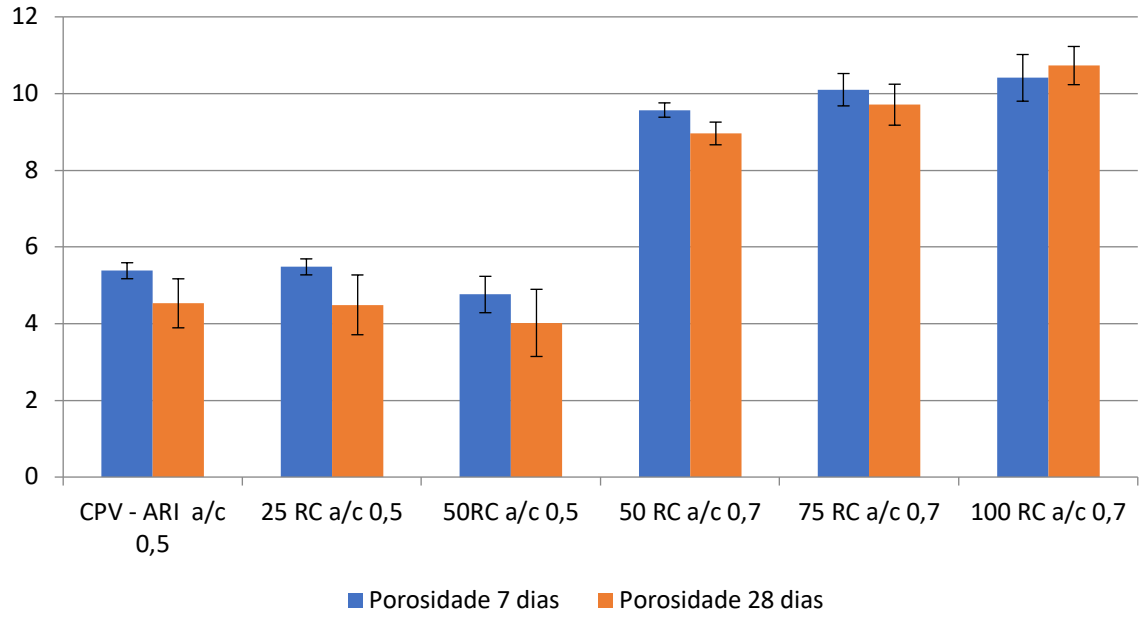


Figura 4 – Porosidade das argamassas nas idades de 7 e 28 dias.

Observa-se que nas amostras com relação água/cimento de 0,5 há uma relação mais clara entre melhoria da resistência mecânica e redução da porosidade. O maior valor foi obtido na amostra RC50 que apresentou o maior valor de resistência à compressão e menor valor de porosidade dentre todas as amostras. Ao mesmo tempo, as amostras com relação água/cimento de 0,7 apresentaram resistência à compressão menor, provavelmente devido ao aumento da porosidade. O fato de se ter praticamente a mesma porosidade e resistência maiores quando se usa cimento reciclado, pode-se estar relacionado a maior reatividade do cimento reciclado e a reação pozolânica com a areia tratada mecanicamente. De acordo com (SHUI *et al.*, 2009), o cimento reciclado reage mais rápido nas idades iniciais. Nas pesquisas de (MENEZES *et al.*, 2018), foi mostrado que a areia tratada mecanicamente, mesma utilizada neste trabalho, apresenta reatividade pozolânica. Por fim, outra possibilidade a ser investigada é a alteração da estrutura do silicato de cálcio hidratado, uma vez que, a alteração da estrutura deste composto hidratado afeta a resistência mecânica de materiais cimentícios (MEHTA; MONTEIRO,2014).

4.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Os resultados alcançados pelo ensaio de resistividade elétrica relativa utilizando o método volumétrico aos 28 dias estão apresentados na Figura 4. Dos resultados obtidos nota-se que a argamassa confeccionada com o cimento de referência CPV-ARI apresenta maior valor de resistividade elétrica volumétrica relativa quando comparados aos traços onde foram utilizados 25% de cimento reciclado e 50% de cimento reciclado.

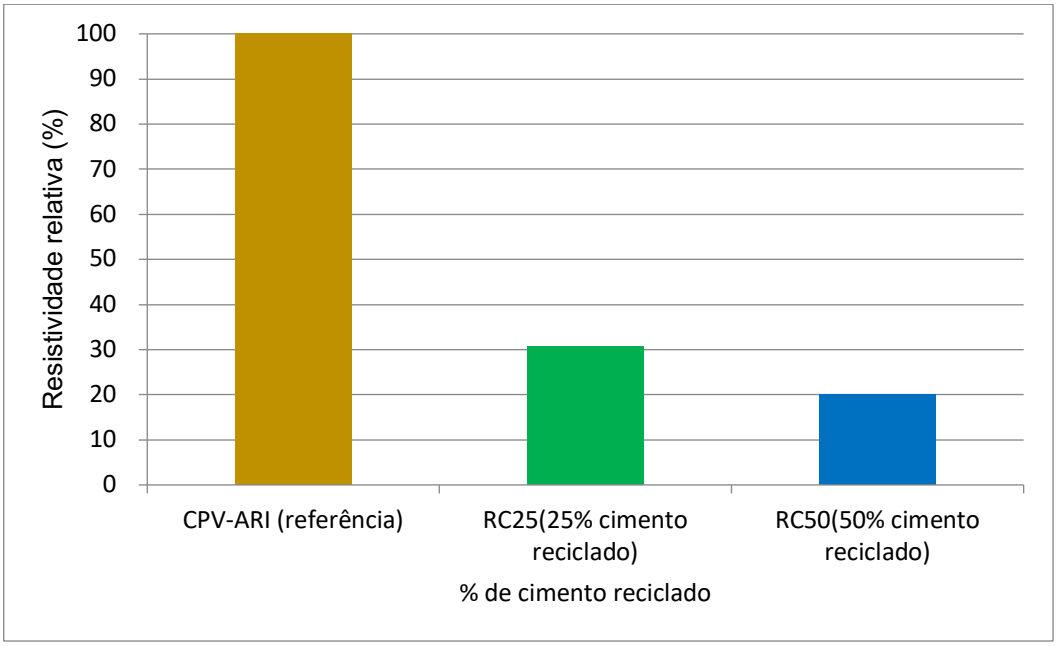


Figura 4 - Resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias.

Os fatores que podem estar relacionados podem ser relativos à porosidade e interconectividade dos poros, o que torna os compostos confeccionados com cimento reciclado mais suscetíveis à agentes agressivos externos. O estudo desenvolvido por Zanovello *et al*. (2023), sobre o impacto da proporção água/aglutinante na porosidade e na resistência à compressão da pasta de cimento Portland reciclada, apontaram a importância de reduzir a demanda de água, pois, assim, a porosidade diminui e se obtém, consequentemente, melhores valores de resistência à compressão.

5 CONCLUSÕES

Foram moldadas argamassas com diferentes teores de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) do cimento CPV por cimento reciclado. Devido à maior demanda de água do cimento reciclado, optou-se por fazer duas condições: relação água/cimento de 0,5 para as amostras com 0%, 25%, 50%; e relação água/cimento de 0,7 para as amostras com 50%, 75% e 100%, devido à maior demanda de água do cimento reciclado. As argamassas foram caracterizadas quanto à resistência à compressão, porosidade e resistividade elétricas. As seguintes conclusões foram observadas:

- Com relação água/cimento de 0,5, a substituição de cimento CPV pelo cimento reciclado foi benéfica, aumentando a resistência à compressão, devido a redução da porosidade. O maior valor de resistência à compressão foi na amostra RC50 com 48,9 MPa.
- A resistência à compressão foi menor das amostras com relação água/cimento de 0,7. Além disso, com 75% de substituição obteve-se o maior valor de resistência à compressão (36,9 MPa).
- Observa-se redução da resistividade elétrica nas amostras com utilização de cimento reciclado em comparação com a amostra referência, indicando uma maior porosidade e/ou conectividade dos poros.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG APQ-04155-23), à Rede Mineira de Desenvolvimento Científico e Inovação (FAPEMIG RED-00191-23) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq- PQ- 308343/2022-0) pelo apoio financeiro. Também agradecem à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFMG.

REFERÊNCIAS

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, [*s. l.*], v. 186, p. 262–281, 2018.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. Concreto ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204. Concreto endurecidos – Determinação de resistividade elétrico-volumétrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012

DE ARAÚJO, A. G. *et al.* Estudo do reaproveitamento do cimento Portland de alta resistência inicial. Ceramica, [*s. l.*], v. 63, n. 365, p. 58–64, 2017.https://doi.org/10.1590/0366-69132017633652052

DUAN, Huabo *et al.* Construction debris becomes growing concerns of growing cities. Waste Management, [*s. l.*], v. 83, p. 1–5, 2019. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044

HE, Zhijun *et al.* Comparison of CO 2 emissions from OPC and recycled cement production. Construction and Building Materials, [*s. l.*], v. 211, p. 965–973, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289

J.C. BENEZET, A. Benhassaine. The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powders. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees, [*s. l.*], n. 219, p. 17, 1999.

MENEZES, RMRO et al. Hydraulic binder obtained from recycled cement and sand powder Aglomerante hidráulico obtido de cimento reciclado e pó de areia. 2018. November, 2018. https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600003

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola *et al*. Mixed construction and demolition powder as a filler to Portland cement: study on packaged pastes. Ambiente Construído, v. 24, p. e131882, 2024.

http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100715

PAZ, Candida Fachinetto *et al*. Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 25, n. 2, p. 1082-1095, 2023. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01594-y

SNIC. ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019. https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap-Tecnologico-Cimento-Brasil-Book-1.pdf.

SHUI, Z.; XUAN, D.; WAN, H., CAO, B. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. Science Direct, Madrid, p. 531-537. 2009. https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016

WANG, Junjie; MU, Mulan; LIU, Yongliang. Recycled cement. Construction and Building Materials, [*s. l.*], v. 190, p. 1124–1132, 2018.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181

XU, Lei *et al.* A systematic review of factors affecting properties of thermal-activated recycled cement. Resources, Conservation and Recycling, [*s. l.*], v. 185, n. April, p. 106432, 2022. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106432

ZANOVELLO, Mateus *et al.* Strength-porosity correlation and environmental analysis of recycled Portland cement. Resources, Conservation and Recycling, [*s. l.*], v. 190, n. June 2022, 2023. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106763

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE AGLOMERADO DE CORTIÇA PARA TEMPERATURAS ELEVADAS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA

António Renato Bicelli[a]; Pedro Cantor[a]; Mário Rui Arruda[a]; António Duarte[a]; Carlos Tiago[a]; Fernando Branco[a] e Joanna Trindade[b]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, antonio.bicelli@tecnico.ulisboa.pt

[b]Gerente de Projeto, Amorim Cork Composites, Lisboa, Portugal

RESUMO

Esta pesquisa realiza uma avaliação das propriedades termofísicas do aglomerado de cortiça, analisando um painel sanduíche exposto à curva de fogo nominal ISO–834 dentro de um forno industrial controlado. A investigação inclui o monitoramento da temperatura em várias camadas do painel durante o ensaio. Uma análise inversa é realizada para determinar o calor específico e a condutividade térmica do aglomerado de cortiça para temperaturas elevadas. Posteriormente, é realizada uma análise térmica transiente não linear usando um modelo numérico bidimensional que emprega o método convencional dos elementos finitos. A simulação numérica utiliza condições de fronteira adiabáticas, de convecção, e de radiação para modelar a transferência de calor na superfície exposta ao fogo. Em conclusão, a avaliação do aglomerado de cortiça como material resistente ao fogo demonstra atributos promissores.

Palavras-chave: Aglomerado de Cortiça, Método dos Elementos Finitos, Análise Inversa, Campanha Experimental, Análise Térmica Transiente.

1 INTRODUÇÃO

A cortiça é um material natural e altamente renovável, com propriedades muito particulares que, nas últimas décadas, a tornaram um material adequado para diferentes aplicações na construção. Os aglomerados de cortiça expandida, são utilizados na construção civil, por exemplo em isolamentos térmicos, acústicos e antivibráticos, de paredes exteriores (fachadas -capoto), de telhados e sótãos, de paredes com caixa de ar no seu interior (Lopes 2011).

É importante destacar que as placas de cortiça expandida são predominantemente recicladas ou reutilizadas, enquanto a incineração para recuperação de energia e a deposição em aterros são opções utilizadas em menor escala. Ao término da vida útil dos aglomerados de cortiça expandida, que coincide com a vida útil do edifício (aproximadamente 60 anos), a recolha e reciclagem dessas placas são viáveis. O processo de reciclagem envolve a trituração dos aglomerados, resultando em granulado de cortiça expandida, que pode ser usado como material inerte no fabrico de betões e argamassas leves (Lopes 2011). Dessa forma, o aglomerado de cortiça pode desempenhar um papel significativo na promoção da sustentabilidade na indústria da construção. No entanto, é necessário avaliar o ciclo de vida do material com análises mais aprofundadas sobre seu impacto ambiental.

O uso da cortiça como material retardante de fogo está alinhado com esta tendência sustentável e é uma excelente alternativa aos produtos não renováveis, como a lã de rocha mineral ou espumas sintéticas organizacionais. Nos últimos anos, houve um aumento tremendo no número de incêndios devastadores na interface urbano-florestal (IUF) devido às mudanças climáticas, práticas de gestão de combustível e ao aumento do desenvolvimento humano em áreas de IUF (Caton, Hakes et al. 2017, Hakes, Caton et al. 2017).

Os incêndios florestais são recorrentes devido às mudanças climáticas que têm ocorrido no sul da Europa, na Austrália e na América do Norte, compostos por grandes áreas de florestas e savanas cercadas por elementos que funcionam como combustível para os incêndios florestais. Além disso, o clima é um dos principais fatores para um incêndio florestal. Todavia, os incêndios florestais podem ser provocados intencionalmente para limpar a vegetação, acidentais, de causas naturais ou indeterminadas (Gil 2015). Além disso, a topografia é relevante, se a velocidade do vento for baixa e a umidade também for baixa, a probabilidade de um incêndio florestal se espalhar em alta velocidade é maior (Westhaver 2017).

Portanto, a cortiça, sendo um material que pode ser frequentemente introduzido na indústria e cujas propriedades não são significativamente afetadas em um incêndio florestal, torna-se um material ideal (Pereira 2007). Vale lembrar que o incêndio em Pedrógão Grande em 2017(Domingos Xavier Viegas, Raposo et al. 2017, Guerreiro J., Iglésias E. et al. 2018) deixou muitas casas destruídas, que foram reconstruídas com os mesmos materiais, de modo que, quando um incêndio florestal se repetir, destruirá a casa novamente. Assim, introduzir a cortiça como material de primeira linha de defesa nas partes vulneráveis dos edifícios é uma proposta inovadora e altamente eficaz (Tenreiro 2018).

Finalmente, o principal objetivo deste artigo é avaliar a eficiência do aglomerado de cortiça por meio de uma campanha experimental e numérica utilizando a curva ISO-834 proveniente do Eurocódigo 1 (CEN 2002). Esses modelos numéricos térmicos são então comparados em termos de distribuição do campo de temperatura, com os dados adquiridos na campanha experimental anterior.

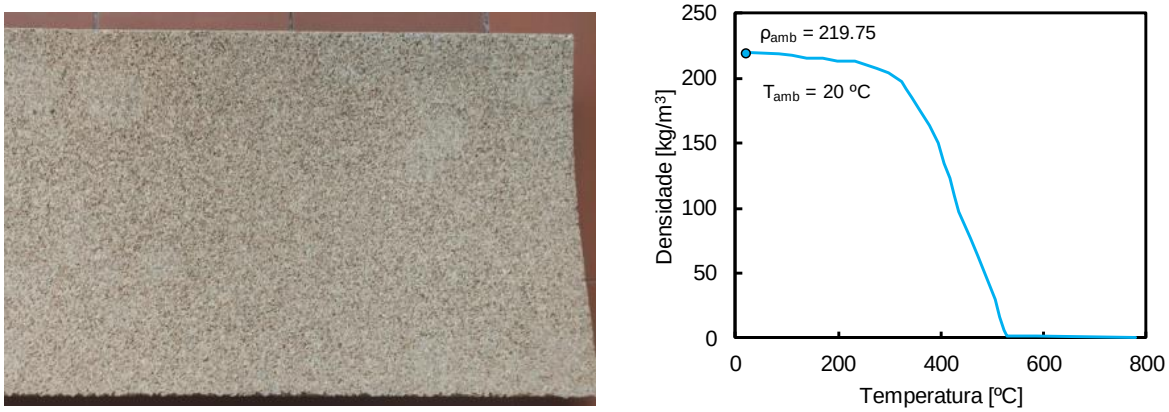
Este artigo começa com a apresentação da campanha experimental, seguida por uma descrição de como abordar as propriedades térmicas do aglomerado de cortiça em função da temperatura para temperaturas elevadas. Posteriormente, aborda o modelo de elementos finitos utilizado para a análise de transferência de calor transiente não linear, concluindo com observações finais. Este estudo

também pode ser entendido como uma extensão da investigação em andamento sobre proteção contra incêndios florestais (Arruda, Tenreiro et al. 2021, Cantor, Arruda et al. 2022, Bicelli, Cantor et al. 2023, Cantor, Arruda et al. 2023). Recentemente, os mesmos autores deste trabalho também propuseram novas diretrizes de construção à prova de fogo para habitações contra incêndios florestais (Arruda, Tenreiro et al. 2021), mas estas foram baseadas em uma curva de incêndio interior de 60 minutos, que é mais severa do que a de incêndios florestais exteriores, e, por essa razão, podem não ser economicamente competitivas. Os mesmos autores também propuseram novas curvas de dimensionamento para incêndios florestais (Cantor, Arruda et al. 2022), para simular a ação térmica de queima de árvores ou arbustos perto de uma habitação isolada no campo florestal, mas estas não simularam a ação indireta das fagulhas na habitação, que foi estudada em (Bicelli, Cantor et al. 2023, Cantor, Arruda et al. 2023).

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

Foi caracterizada uma folha de cortiça fornecida pela Amorim Cork Composites. Este tipo de laminado também é conhecido como aglomerado de cortiça expandida. Neste trabalho, foi utilizado apenas aglomerado de cortiça, portanto, os termos “cortiça” e “aglomerado de cortiça” referem-se ao mesmo material (Figura 1a).

O aglomerado de cortiça expandida utilizado tinha uma geometria de 66x33x3 cm, para se ajustar à geometria necessária para o forno industrial, com densidade de 219 Kg/m^3. As propriedades termofísicas, em temperatura ambiente (20 °C), foram obtidas através de um analisador de propriedades térmicas (TPA) da ISOMET, modelo 2114 – Condutividade Térmica 0,05 W/(mK) e Calor Especifico 907,9 J/(KgK). Finalmente, a perda de massa da cortiça para temperaturas elevadas foi retirada da literatura (Morgado 2018), e a dependência da densidade com a temperatura é exibida na Figura 1b.



(a) (b)

Figura 1 – (a) Aglomerado de cortiça expandida, (b) Densidade do aglomerado de cortiça para temperaturas elevadas.

Os painéis sanduíche consistiam de duas chapas de aço (partes superior e inferior), com a mesma geometria que o aglomerado de cortiça, com espessura de 5 mm, e duas placas de cortiça com 30 mm de espessura cada, usadas como núcleo (Figura 2). É importante destacar que as chapas de aço foram utilizadas nos painéis sanduíche para facilitar a determinação subsequente das propriedades termofísicas da cortiça por meio do procedimento analítico-numérico delineado na secção 3. Essa abordagem é viável devido ao conhecimento bem estabelecido das propriedades dependentes da temperatura do aço (CEN 2005).

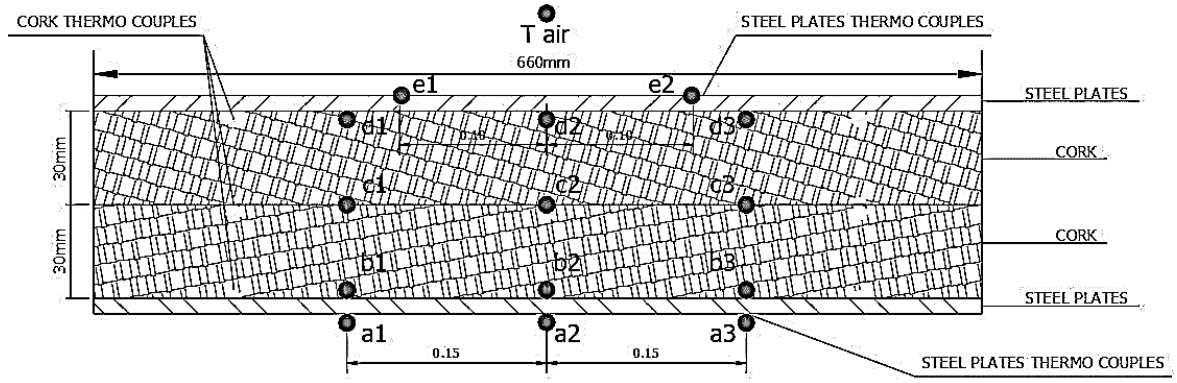


Figura 2 – Posição dos termopares no painel sanduíche.

Os testes de fogo foram realizados usando um forno industrial com dimensões externas de 120×135×210 cm e uma área de abertura superior de 95×80 cm. Uma vez que a amostra foi colocada, o forno foi ligado e a parte inferior do painel sanduíche foi submetida à curva tempo-temperatura ISO-834. A Figura 3 mostra a amostra posicionada dentro do forno industrial, com isolamento ao longo das bordas da placa utilizando lã de rocha. Este esquema de isolamento pretende reproduzir um cenário de transferência de calor unidimensional ao longo da espessura, sem perder calor para o ambiente através das bordas, garantindo, na maior medida possível, condições de fronteira adiabáticas.

Durante o teste experimental, o comportamento da temperatura foi registrado usando um registrador de dados HMB a uma frequência de 1 Hz, ao longo de um período de 1600 s. Além deste período, foi observado que o material começou a inflamar. Adicionalmente, é importante destacar que não é possível determinar se a inflamação do aglomerado de cortiça se deu devido à cola utilizada no processo de aglomeração ou se foi a própria matéria-prima cortiça que inflamou. Por motivos de segurança, o forno foi posteriormente desligado.

Figura 3 – Painel sanduíche posicionado no forno.

Finalmente, a Figura 4 revela os valores finais da campanha experimental, utilizando os dados previamente registrados dos termopares, e apresenta a média desses resultados para obter um valor representativo que corresponda à temperatura experimental na superfície de cada camada. Ao todo foram realizados três ensaios e os valores apresentados correspondem a sua média. Esses valores são utilizados para comparação com os resultados numéricos das analises não-lineares das secções 3 e 4.

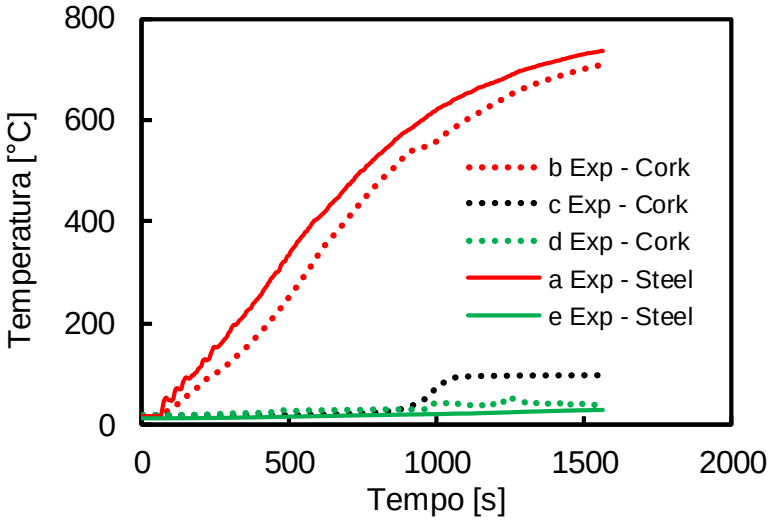


Figura 4 – Temperatura experimental nas superfícies.

3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE INVERSA NUMÉRICA

As propriedades termofísicas dependentes da temperatura do aglomerado de cortiça (sem mudança de fase) foram estimadas com base em um procedimento de análise inversa, desenvolvido usando MATLAB (MathWorks 2022). As etapas do procedimento são apresentadas na Figura 5. Informações detalhadas sobre este procedimento podem ser consultadas em (Duarte, Mazzuca et al. 2023), aplicadas à obtenção de propriedades termofísicas dependentes da temperatura de espumas poliméricas.

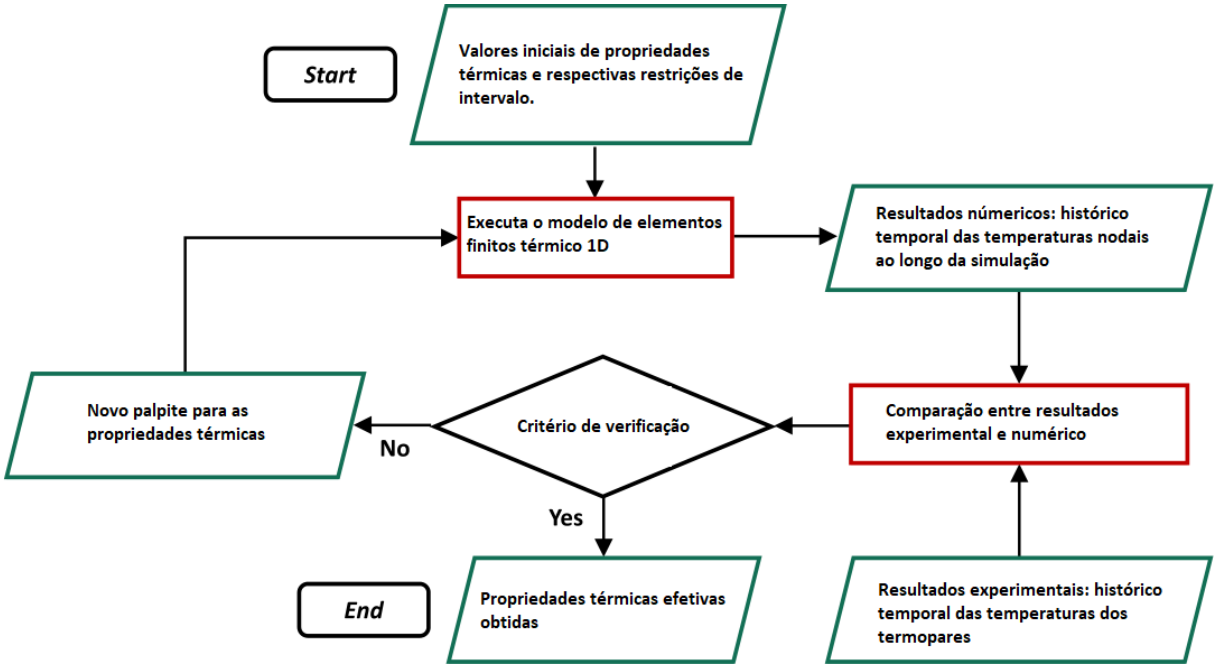


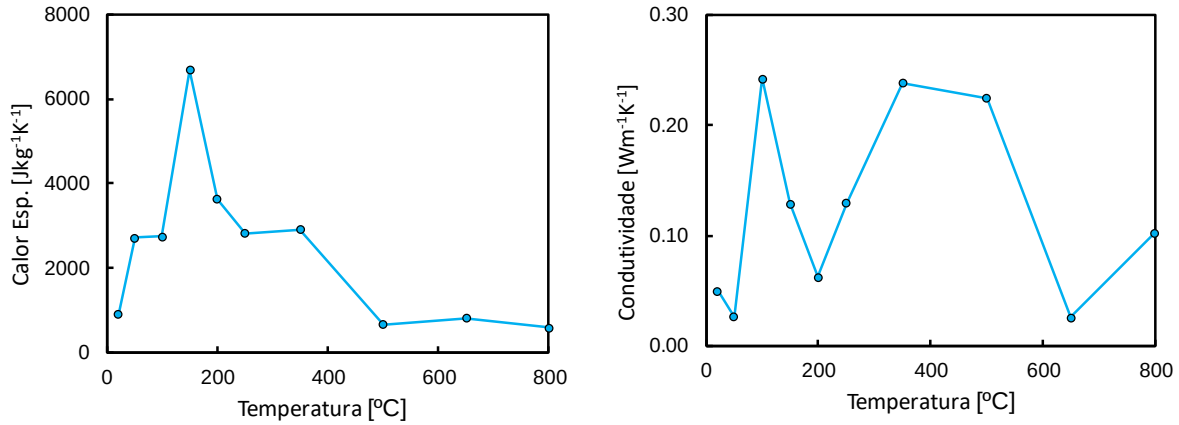
Figura 5 – Flowchart da implementação global (adaptado de (Duarte, Mazzuca et al. 2023)).

O procedimento é essencialmente composto por duas partes: (i) uma rotina de otimização, "fminsearchbnd"(D'Errico 2020), que tem como objetivo encontrar um mínimo limitado de uma função objetivo e (ii) um modelo de elemento finito térmico unidimensional, que tem como objetivo simular os testes de fogo descritos anteriormente. Portanto, a rotina de otimização é executada

recursivamente, com estimativas atualizadas das propriedades termofísicas a serem determinadas, enquanto a norma da diferença entre as curvas de temperatura em função do tempo numéricas (dadas pelo modelo de elemento finito térmico unidimensional) e experimentais (dadas pelos testes de fogo) não é suficientemente pequena.

Os valores iniciais das propriedades termofísicas a temperatura ambiente (20 °C), apresentados na secção 2, foram considerados. A condutividade térmica e o calor específico foram então determinados por análise inversa para temperaturas de 20 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 350 °C, 500 °C, 650 °C e 800 °C. Para a temperatura ambiente, permitiu-se que as propriedades variassem dentro de ±10% de seus valores determinados experimentalmente para levar em conta a variabilidade do material e as diferentes naturezas de ambos os procedimentos (determinação de propriedades à temperatura ambiente e teste de fogo).

As propriedades termofísicas efectivas para temperaturas elevadas adotadas no modelo numérico, determinadas pelo procedimento de análise inversa são apresentadas na Figura 6. Nota-se que os pontos azuis são os quais as propriedades térmicas foram determinadas.



(a) Calor Especifico (b) Condutividade térmica

Figura 6 – Propriedades termofísicas efectivas do aglomerado de cortiça.

4 VALIDAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS EFECTIVAS

As propriedades termofísicas determinadas na secção 3 são agora utilizadas para simular a experiência descrita na secção 2. Vale a pena notar que o modelo de elementos finitos usado nesta secção é mais abrangente do que o modelo utilizado para determinar as propriedades termofísicas. O modelo utilizado na última secção não considerava a interação de radiação entre superfícies, que ocorre na prática. Presumia-se que os materiais estavam perfeitamente conectados, com a transferência de calor ocorrendo predominantemente por condução. No entanto, essa característica é agora incorporada no modelo numérico seguinte. O modelo de elementos finitos presente é 2D. As análises não lineares foram realizadas utilizando o *software* comercial ABAQUS (Dassault Systemes Simulia Corp 2018) , e todos os parâmetros adotados são abordados abaixo. É importante destacar que no modelo examinado neste artigo, não foi considerada nem a geração interna de calor, nem uma mudança de fase no material.

A metodologia utilizada neste trabalho é apresentada nesta secção, onde a campanha experimental foi simulada numericamente e os valores medidos nos termopares b e c foram comparados na distribuição do campo de temperatura. A geometria adotada no modelo numérico é mostrada na Figura 7, onde podem ser observadas as condições de fronteira utilizadas. É importante salientar que

esta solução permanece constante ao longo da direção-*x*, devido às condições de fronteira adiabáticas. Assim, estas dimensões são apenas para fins de visualização, pois não há necessidade de usar mais do que um elemento na direção vertical, uma vez que a solução não apresenta variação ao longo desse eixo. O modelo numérico usou 50% do tamanho do experimento devido à teoria de simetria e para reduzir os custos computacionais, e nessa fronteira, a condição térmica adiabática também é atribuída. Por essa razão, as dimensões 330x70 mm foram adotadas. Uma vez que todas as propriedades térmicas variam com a temperatura, uma análise térmica não linear é realizada usando o método iterativo de Newton-Raphson incremental, para controlar o fluxo.

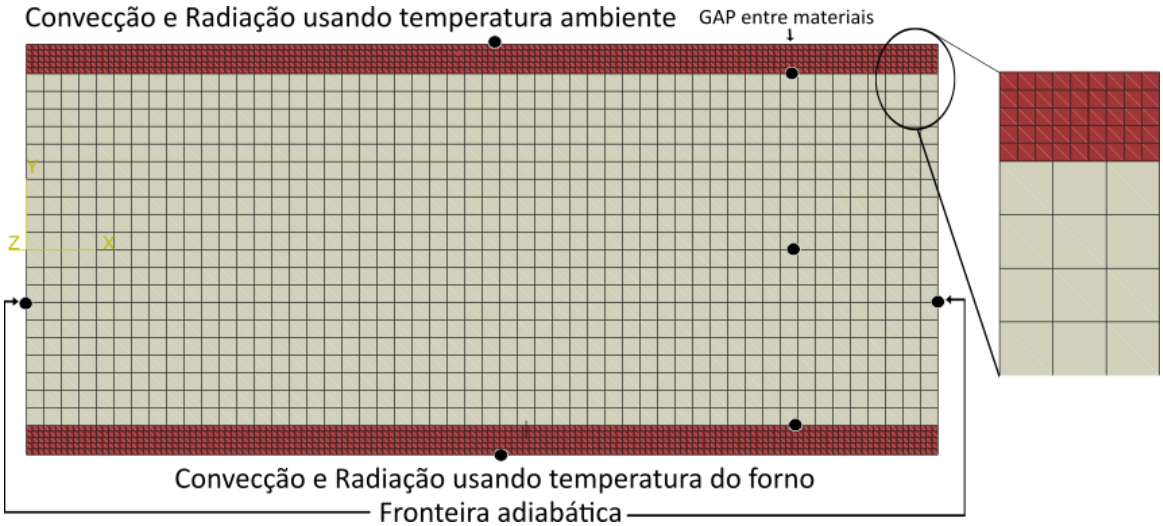


Figura 7 – Geometria, condições de fronteira e malha utilizada (vermelho – aço e bege – cortiça).

As propriedades do aço utilizadas no modelo foram retiradas do Eurocódigo 3:1-2 (CEN 2005), e os valores são mostrados na Figura 8. Para a densidade do aço, foi utilizado um valor constante de 7850 kg/m³, uma vez que a temperatura máxima da superfície de contato da chapa de aço está abaixo de 800 °C.

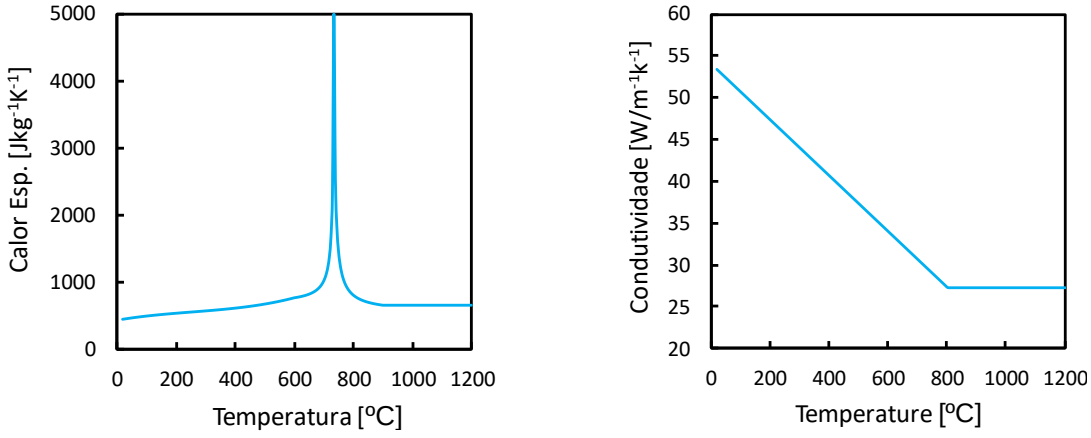


Figura 8 – Propriedades termofísicas do aço para elevadas temperaturas.

A carga térmica foi aplicada à fronteira inferior do modelo, conforme a curva nominal de incêndio ISO-834 (CEN 2002). Na campanha experimental, foi utilizada a ISO-834 na fronteira inferior do painel sanduíche, onde foi aplicada em um forno controlado, no entanto, no modelo numérico foi utilizada a temperatura do forno, que é a temperatura real que entrou em contato com a superfície inferior porque o forno tentou ajustar a temperatura usando a ISO-834 como referência, como mostrado na

Figura 9. No entanto, para a fronteira superior do modelo, foi adotada uma temperatura ambiente constante ($T_{amb} = 20$ °C).

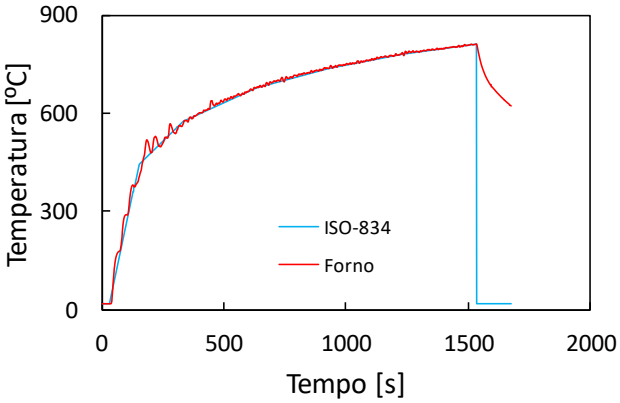


Figura 9 – Curvas ISO-834 e do Forno.

De acordo com os trabalhos publicados (Bearinger, Hodges et al. 2021, Bicelli, Cantor et al. 2023), foi demonstrado que as fagulhas podem transmitir fluxo de calor por radiação e convecção em superfícies planas. Os parâmetros de convecção térmica superficial e radiação são os propostos para o caso da simulação de incêndios naturais ($h_f = 25W/(m^2K)$, $\varepsilon = 0.7$, e $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}W/(m^2K^4)$(CEN 2002). Este procedimento está de acordo com o dimensionamento de segurança contra incêndios em códigos estruturais, quando uma estrutura é submetida à ação de um incêndio nominal ou de base de desempenho. Portanto, o fluxo de calor prescrito é dado por:

$$q_n = -h_f\left(T_{Superfície} - T_{forno}\right) - \sigma\varepsilon\left(T^4_{Superfície} - T^4_{forno}\right) \quad \text{para a fronteira inferior} \quad (1)$$

$$q_n = -h_f\left(T_{Superfície} - T_{amb}\right) - \sigma\varepsilon\left(T^4_{Superfície} - T^4_{amb}\right) \quad \text{para a fronteira superior} \quad (2)$$

$$q_n = q_{gap} \quad \text{para o gap entre materiais} \quad (3)$$

onde q_n é o fluxo de calor na direção-*n*. A interação térmica entre materiais foi simulada utilizando a propriedade de radiação por *gap* — funcionalidade disponível no ABAQUS para simular interações de radiação entre superfícies separadas por uma pequena lacuna — devido à presença de lacunas estreitas que requerem avaliação. Portanto, o fluxo de calor por unidade de área de superfície, q_{gap}, atravessando a lacuna é dado por:

$$q_{gap} = C\left(T^4_{Superfície\ a} - T^4_{Superfície\ b}\right) \quad (4)$$

$$C = \frac{F * \sigma}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \quad (5)$$

onde F é o fator de visão efetivo, que corresponde à visualização da superfície *a* à partir da superfície *b*. O fator de visão deve ter um valor entre 0 e 1, onde 0 significa que não há transferência de calor radiativo e 1 significa que não há lacuna entre as superfícies (Dassault Systemes Simulia Corp 2018). O fator de visão foi calculado assumindo que a lacuna mede menos de 1 mm, e consequentemente, foi utilizado um valor de 0,99 (Hottel 2023). Note que todas as equações envolvendo radiação, as temperaturas são expressas em Kelvin.

A Figura 7 mostra a malha usada na análise de elementos finitos. Também foi testada uma malha mais refinada para todo o modelo, mas não apresentou diferenças significativas na distribuição de temperatura. O tipo de elemento usado foi um DC2D4 (quadrilátero de transferência de calor linear de 4 nós) com integração total, que faz parte da família de transferência de calor do ABAQUS, e foi admitido um tamanho máximo de 3 mm para a cortiça e 1 mm para a chapa de aço (ver Figura 7 detalhe de malha) .

Os resultados da análise térmica não linear do painel sanduíche são apresentados nas Figura 10,11 e 12. Os valores foram medidos no elemento finito mais próximo da superfície de contato com o fogo, utilizando os pontos de integração de Gauss e selecionando o valor mais alto registrado. Além disso, devido às condições de fronteira, é importante observar que esta solução permanece constante ao longo da direção-*x* (Figura 12). Os valores experimentais são representados pelas linhas pontilhadas e os valores numéricos são representados pelas linhas normais, com as mesmas cores que as experimentais.

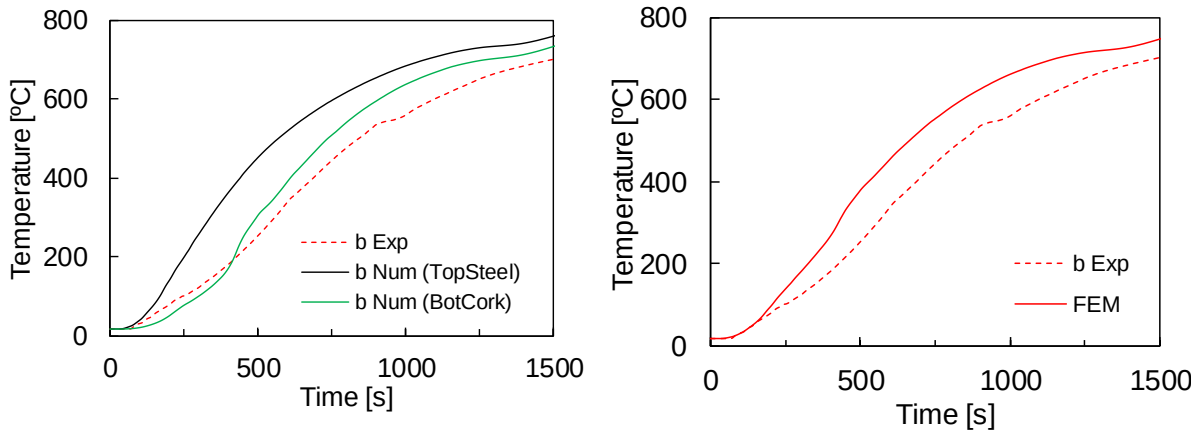


Figura 10– Comparação entre valores experimentais e numéricos no termopar b.

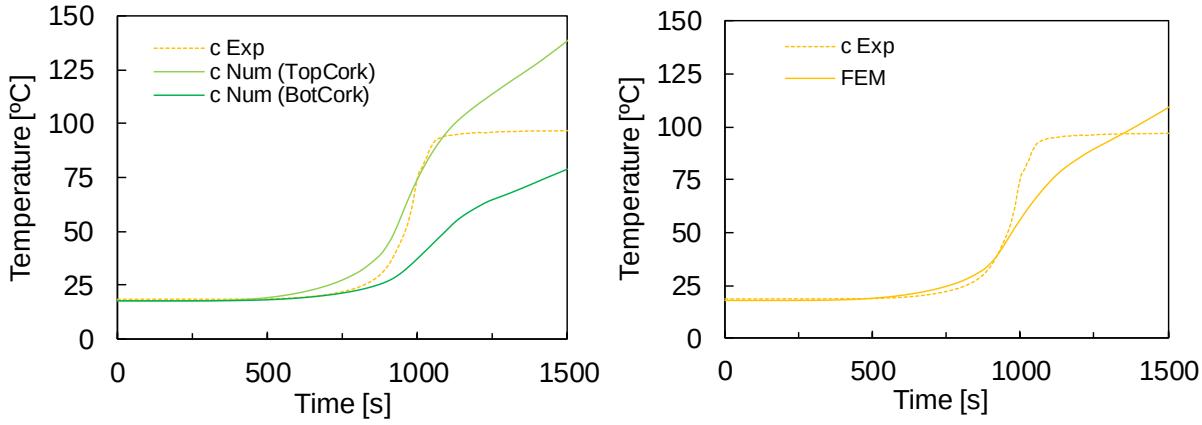


Figura 11– Comparação entre valores experimentais e numéricos no termopar c.

A temperatura entre ambos os materiais é comparada com os resultados experimentais. Devido à lacuna entre materiais, os valores experimentais e numéricos não são diretamente comparáveis. Por esse motivo, para comparar diretamente os valores experimentais dos termopares, é utilizada uma média numérica dos lados superior e inferior. Isso significa que se espera que a distribuição do campo de temperatura possa apresentar algumas descontinuidades entre as folgas (Figura 12). Nesse contexto, existem duas camadas a serem comparadas. A 1ª camada é a folga entre o lado inferior da

placa de cortiça e o lado superior da chapa de aço inferior, que corresponde ao termopar b. A 2ª camada é a folga entre o lado inferior da placa de cortiça superior e o lado superior da placa de cortiça inferior, que corresponde ao termopar c.

A observação desses resultados suscita as seguintes observações: (i) Na 1ª camada, o valor médio de temperatura numérica proporciona uma comparação aceitável com o valor experimental; (ii) Na 2ª camada, o modelo numérico capturou satisfatoriamente o aumento da temperatura e a evaporação da água a 100 °C, portanto a propriedade termofísica proposta leva em consideração o efeito da evaporação da agua no calor específico.

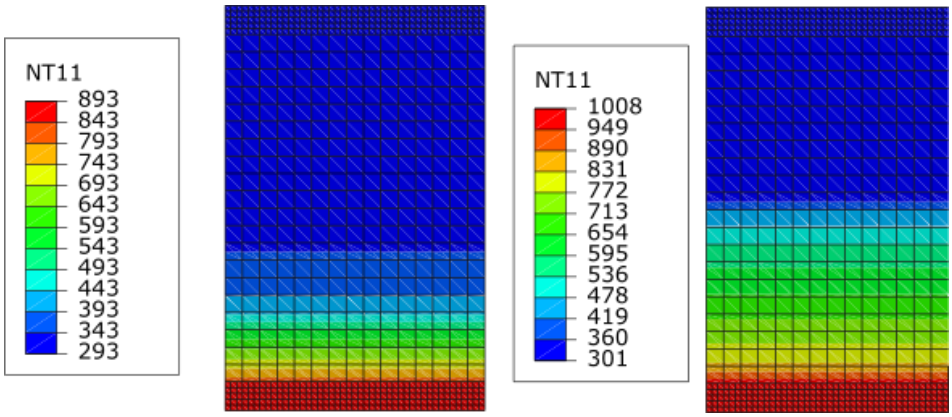


Figura 12 – Distribuição do campo de temperatura para 850s e 1600s (temp. em Kelvin).

5 CONCLUSÕES

Compreender como os materiais se comportam em temperaturas elevadas é essencial para o desenvolvimento de modelos numéricos avançados usados na análise e no dimensionamento de estruturas expostas ao fogo. Neste trabalho, foi apresentada uma campanha experimental em painéis sanduíche compondo o núcleo de aglomerado de cortiça e as extremidades com placas de aço, submetendo a superfície inferior a um forno industrial capaz de replicar a curva de fogo ISO-834. Também foi empregado um procedimento de análise inversa numérica para obter as propriedades termofísicas em função da temperatura para o aglomerado de cortiça, especificamente, condutividade térmica e calor específico. Essas propriedades foram determinadas até 800 °C, utilizando estimação inversa com base em um modelo de transferência de calor de elementos finitos não linear unidimensional e nos dados experimentais. Além disso, as propriedades termofísicas obtidas para a cortiça foram validadas utilizando o *software* comercial de elementos finitos, ABAQUS, por meio de transmissão de fluxo de calor por convecção e radiação prescritas.

Foi concluído que o modelo de elementos finitos utilizado neste trabalho pode ser considerado satisfatoriamente validado, uma vez que os valores numéricos seguem os mesmos padrões dos dados experimentais para temperaturas elevadas. Os modelos derivados de propriedades termofísicas foram capazes de simular com sucesso a redução da temperatura durante a evaporação da agua. A partir disso, pode-se concluir que o método numérico determina efetivamente a condutividade térmica e o calor específico efetivo em função da temperatura para o aglomerado de cortiça para temperaturas elevadas. Consequentemente, as propriedades termofísicas efetivas propostas podem ser utilizadas para analisar estruturas expostas ao fogo.

O próximo passo nesta investigação em curso envolve explorar uma abordagem diferente para avaliar a distribuição de temperatura ao longo da espessura num modelo 3D de elementos finitos.

Paralelamente, também é preciso avaliar a aplicação do aglomerado de cortiça no envolvente vertical exterior dos edifícios quando exposta à ação do fogo. Isso implicará simular numericamente o calor latente e a possível geração de energia interna que ocorre dentro da cortiça durante a fase de aquecimento.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), de Portugal, pelo Projeto "Novas Habitações à Prova de Fogo para Incêndios Florestais PTDC/ECI-CON/2240/2020" (DOI: 10.54499/PTDC/ECI-CON/2240/2020). Os autores também agradecem o apoio da FCT por meio do financiamento UIDB/04625/2020 para a unidade de pesquisa CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020) e pelas bolsas de doutoramento SFRH/BD/03935/2023 (DOI: 10.54499/2023.03935.BD) e SFRH/BD/04011/2023 (DOI: 10.54499/2023.04011.BD).

REFERÊNCIAS

Arruda, M. R. T., T. Tenreiro and F. Branco (2021). "Rethinking How to Protect Dwellings against Wildfires." Journal of Performance of Constructed Facilities **35**(6): 06021004.

Bearinger, E. D., J. L. Hodges, F. Yang, C. M. Rippe and B. Y. Lattimer (2021). "Localized heat transfer from firebrands to surfaces." Fire Safety Journal **120**: 103037.

Bicelli, A. R., P. Cantor, M. R. Arruda, C. Tiago, E. Bernardes de Assis and F. Branco (2023). "Numerical Assessment of Standard Firebrand Accumulation Curve When Transferring Temperature to Contact Surfaces." Applied Sciences **13**(17): 9657.

Cantor, P., M. R. T. Arruda, J. Firmo and F. Branco (2022). "Proposal of Standard Wildfire Curves for the Design Protection of Dwellings against Wildland Fire." Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste **26**(3).

Cantor, P., M. R. T. Arruda, J. Firmo and F. Branco (2023). "Development of a standard firebrand accumulation temperature curve for residential wildfire protection system." Results in Engineering **17**: 100935.

Caton, S. E., R. S. P. Hakes, D. J. Gorham, A. Zhou and M. J. Gollner (2017). "Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions." Fire Technology **53**(2): 429-473.

CEN (2002). Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1991-1-2: 2002.

CEN (2005). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1995-1-2:2005.

D'Errico, J. (2020). fminsearchcon - https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8277-fminsearchbnd-fminsearchcon. MATLAB Central File Exchange, Mathworks.

Dassault Systemes Simulia Corp (2018). ABAQUS. Johnston, RI, USA.

Domingos Xavier Viegas, M. F. A., Luís Mário Ribeiro, Jorge, M. T. V. Raposo, Ricardo Oliveira, Daniela Alves, Cláudia Pinto, and A. R. Humberto Jorge, Davi Lucas, Sérgio Lopes, Luís Filipe Silva (2017). O COMPLEXO DE INCÊNDIOS DE PEDRÓGÃO GRANDE E CONCELHOS LIMÍTROFES, INICIADO A 17 DE JUNHO DE 2017.

Duarte, A. P. C., P. Mazzuca, J. M. Lopo de Carvalho, C. Tiago, J. P. Firmo and J. R. Correia (2023). "Determination of the temperature-dependent thermophysical properties of polymeric foams using numerical inverse analysis." Construction and Building Materials **394**: 131980.

Gil, L. (2015). Cork. Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design. M. C. Gonçalves and F. Margarido. Cham, Springer International Publishing**:** 585-627.

Guerreiro J., F. C., Salgueiro A., Fernandes P., Lopez, d. N. R. Iglésias E., Mateus F., Castellnou Ribau M., Sande Silva J., Moura J. M., Castro and R. F. e. C. D. N. (2018). Avaliação dos Incêndios ocorridos entre 14 e 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental.

Hakes, R. S. P., S. E. Caton, D. J. Gorham and M. J. Gollner (2017). "A Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part II: Response of Components and Systems and Mitigation Strategies in the United States." Fire Technology **53**(2): 475-515.

Hottel, H. C. (2023). "Radiant Heat Transmission Between Surfaces Separated by Non-Absorbing Media." Transactions of the American Society of Mechanical Engineers **53**(3): 265-271.

Lopes, G. A. (2011). Avaliação do Ciclo de Vida de dois materiais de isolamento utilizados na construção civil: o poliestireno expandido e o aglomerado de cortiça expandida. PhD, Universidade do Porto.

MathWorks (2022). "MATLAB R2020a, MathWorks: Natick, MA, USA. ."

Morgado, T. M. R. (2018). Thermal and structural response of pultruded GFRP profiles under fire exposure. PhD, Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico.

Pereira, H. (2007). Cork: Biology Production and Uses, Elsevier Science.

Tenreiro, T. C., Branco, F. A. (2018). Rethinking Houses for Wildland Fires Protection. The Euro-American Congress. Granada, Spain.

Westhaver, A. (2017). Why some homes survived: Learning from the Fort McMurray wildland/urban interface fire disaster. Toronto, Canada, Institute for Catastrophic Loss Reduction.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRODUÇÃO DE COMPONENTES SUSTENTÁVEIS E NA CONSTRUÇÃO DE UNIDADES HABITACIONAIS

Sobrinho, Carlos Welligton de A. Pires [a,b]

[a]Escola Politécnica de Pernambuco, Av. Benfica, 455, 50720-001, Recife, Brasil, carlos.sobrinho@upe.br

[b]Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 700, 50750-545, Recife,Brasil, carlositep@gmail.com

RESUMO

Sustentabilidade é um termo associado à capacidade de conservação/sustentação de um sistema ou de um processo. Associado a isso, se faz necessário implementar o desenvolvimento sustentável e a capacitação técnica, considerando o capital humano, os recursos naturais e na produção e distribuição dos bens produzidos.

O artigo trata do reaproveitamento de resíduos oriundos no processo de produção do gesso(gesso de chão de fábrica), no processo de produção de pré-moldados de gesso(aproveitamento de quebras da produção de pré-moldados) e na produção de componentes rústicos utilizados na construção de casas no Sertão de Pernambuco-Brasil.

A utilização de bloquetes, componentes rústicos utilizados na construção de alvenarias, são utilizados na construção de casas na região de maior produção de gesso e de pré-moldados do Brasil, sendo uma realidade constatada pela imensa quantidade de casas construídas com estes componentes.

Embora os produtos em gesso apresentam solubilidade em água corrente ou renovável, esta velocidade de dissolução é significativamente reduzida em água saturada em sulfato, e quanto mais espesso e compacto for o componente, menor a redução de suas características mecânicas.

Por outro lado, a utilização componentes produzidos regionalmente e com materiais locais reduz a necessidade de transporte de longa distância, diminuindo a pegada de carbono e promovendo a sustentabilidade ambiental, bem como a valorização e preservação da cultura local e do fortalecimento da economia regional.

Palavras-chave: Sustentabilidade, economia regional, construção de casas, reaproveitamento na produção, tecnologia alternativa.

1 INTRODUÇÃO

Nos cinco primeiros meses do ano de 2004, ocorreu uma precipitação pluviométrica atípica na região do Araripe, sertão de Pernambuco, com uma precipitação da ordem de 930mm, notadamente superior ao valor da precipitação média anual de 700mm/ano (APAC, 2019). Como consequência ocorram enchentes em várias localidades desta região, inundando e desmoronando casas, a maioria destas construídas em tijolos maciços de barro cozido[1] ou mesmo de taipa (barro e gravetos de madeira em trama).

Por outro lado, as casas construídas com bloquetes de gesso mantiveram-se estáveis, resistindo imersos durante todo o período de inundação que durou cerca de 6 meses. A figura 1 mostra aspectos de uma das casas construídas em bloquetes de gesso no ano de 2018, outro ano de pluviometria elevada na região similar ao ocorrido em 2004.

Figura 1- Casa em bloquete de gesso inundada após fortes chuvas em Trindade abril 2018

Fato este que provocou a discussão sobre a estabilidade e a durabilidade de edificações construídas em componentes de gesso.

No ano de 2005 foi construído um conjunto com 24 casas em alvenaria de blocos de gesso no Alto da Bela Vista em Araripina, que ainda hoje apresentam-se estáveis e quase sem degradação, algumas com presença de manchas de umidade e perda de pintura, porém praticamente intactas no que se refere a integridade das alvenarias.

Estas foram construidas com a estrutura da coberta sustentada por pilares em alvenaria de blocos cerâmicos, sob a preocupação da sus estabilidade, porém grande parte dessas casas sofreram ampliações, muitas com bloquetes, e aplicação de revestimentos variados. A figura 2 mostra aspectos de algumas destas casas construídas no Conjunto.

[1] Tijolo de barro cozido não necessariamente e cerâmico, já que este e moldado e sua calcinação é realizada em caeiras formadas pelos próprios tijolos e queimados com gravetos e só algumas partes destes atingem mais de 780ºC (temperatura mínima para transformar argila em cerâmica).

Foto 02- Casas no Conjunto Alta da Bela Vista -Araripina (fonte: Google Maps em 2020)

No sertão de Pernambuco, região do Araripe, concentram-se as maiores mineradoras de gipsita do Brasil, responsáveis por 83% da produção nacional deste minério (DNPM, 2015). A produção mundial de gipsita em 2014 foi estimada em 246 milhões de toneladas/ano, ficando o Brasil na 13º posição da produção mundial (DNPM, 2018).

Os gessos obtidos pala calcinação da gipsita consomem cerca de 58% da produção da gipsita(DNPM, 2009) cujos destinos em ordem decrescente são: pré-moldados (placas para forro, blocos para alvenaria e elementos decorativos), revestimentos e gessos para drywall.

Historicamente, em Pernambuco, a gipsita começou a ser comercializada nos anos 50, com a abertura da primeira mina, pertencente ao Grupo Itaú. No início, só se comercializava a rocha bruta. Com o passar dos anos, foram surgindo outras minas que passaram a exportar a pedra para cimenteiras de vários Estados. Na década de 70 foi implantada a primeira fábrica de gesso calcinado (Wikipédia, 2019)

As primeiras fábricas de gesso utilizavam fornos em formato de circular, tipo panela, em alvenaria de tijolos cerâmicos que antes eram utilizados para fabrico de farinha de mandioca, dando início a fabricação do gesso e a implantação de fábricas de giz escolar e de componentes de gesso como placas para forro e blocos para alvenaria para construção civil.

Os blocos de gesso utilizados em alvenaria são produzidos nas dimensões (66,7x50,0)cm^2 com espessuras que variam de 7,0cm e de 10cm em formato prismático com arestas tipo macho-fêmea, podendo ser maciços ou vazados com furos cilíndricos no interior. Quando aditivados com silicone, são classificados como hidrófugos ou quando não aditivados, são classificados como standard. A maioria é ainda produzida de forma artesanal por moldagem em mesas de vidro e réguas de duralumínio no formato macho-fêmea, outra quantidade são fabricada mecanicamente em processo automatizado.

Os bloquetes fabricados no formato prismático fêmea-fêmea, com dimensões médias de (30x17x12)cm^3, são moldados de forma artesanal com gessos oriundos de chão de fábrica e/ou de sobras de pastas de gesso quando da fabricação de placas e blocos de gesso e com inserção de pedaços de pré-moldados quebrados no processo de produção.

As fotos 3a e 3b, na figura 3, mostram aspectos de produção industrial de blocos e artezanal de bloquetes de gesso, respectivamente.

a)fabricação mecanizada de blocos de gesso

b) fabricação artezanal de bloquetes

Figura 3- Processos de fabricação de componentes em gesso

Em toda região do Araripe existem inúmeras casas térreas construídas em alvenaria de blocos de gesso e em alvenaria de bloquetes de gesso, estes últimos em maior quantidade encontrados nas áreas mais pobres. A questão que se coloca é quanto a estabilidade e a durabilidade destas construções, já que existe uma falsa ideia de que componentes e construções a base de gesso são pouco duráveis. Na realizadade, devem ser consideradas a tipologia, sua utilização e as condições ambientais de exposição.

2 MÉTODO / CASO DE ESTUDO

2.1 IMPACTO AMBIENTAL

O polo gesseiro do Araripe, localizado do serão setentrional de Pernambuco, possui 55 mineradoras de gipsita, 185 industrias de calcinação e 270 industrias de pré-moldados de gesso, responsáveis por um faturamento de R$ 1.4 bilhão anual e a geração de 13,9 mil empregos diretos e 69 mil indiretos(SINDUSGESO, 2014).

O Gesso de chão de fábrica é o principal resíduo do processo de calcinação da Gipsita para produção do gesso, sendo este processo o principal responsável pelos principais impactos ambientais. Durante esse processo, a gipsita, em pedra, é moída e submetida à calcinação. A depender da logística, controle na produção e do tipo de forno, são geradas poeiras e sobras das limpezas dos fornos, sendo estes caracterizados como “gesso de chão de fábrica”.

Embora a geração de resíduos seja um problema em qualquer atividade, merecendo atenção especial para ações de gestão e gerenciamento (Costa et al., 2017), no caso específico da calcinação da gipsita essa geração não chega a ser tão expressiva, principalmente devido à elevada pureza do minério, que atinge 98%. Também se observa que esse material, por vezes, é reaproveitado e usado com outros materiais na fabricação de blocos e tijolos, empregados na construção de habitações na região (Araújo; Martins, 2012).

O Gesso de chão de fábrica é o principal resíduo do processo de calcinação da Gipsita para produção do gesso, sendo este processo o principal responsável pelos principais impactos ambientais. Durante esse processo, a gipsita em pedra é moída e submetida à calcinação. A depender da logística, controle

na produção e do tipo de forno, são geradas poeiras e sobras das limpezas dos fornos, sendo estes caracterizados como “gesso de chão de fábrica”.

Embora a geração de resíduos seja um problema em qualquer atividade, merecendo atenção especial para ações de gestão e gerenciamento (Costa et al., 2017), no caso específico da calcinação da gipsita essa geração não chega a ser tão expressiva, principalmente devido à elevada pureza do minério, que atinge 98%. Também se observa que esse material, por vezes, é reaproveitado e usado com outros materiais na fabricação de blocos e tijolos, empregados na construção de habitações na região (Araújo; Martins, 2012).

A figura 4 apresenta as etapas de produção do gesso e as fontes de geração dos resíduos durante o processo de fabricação do gesso.

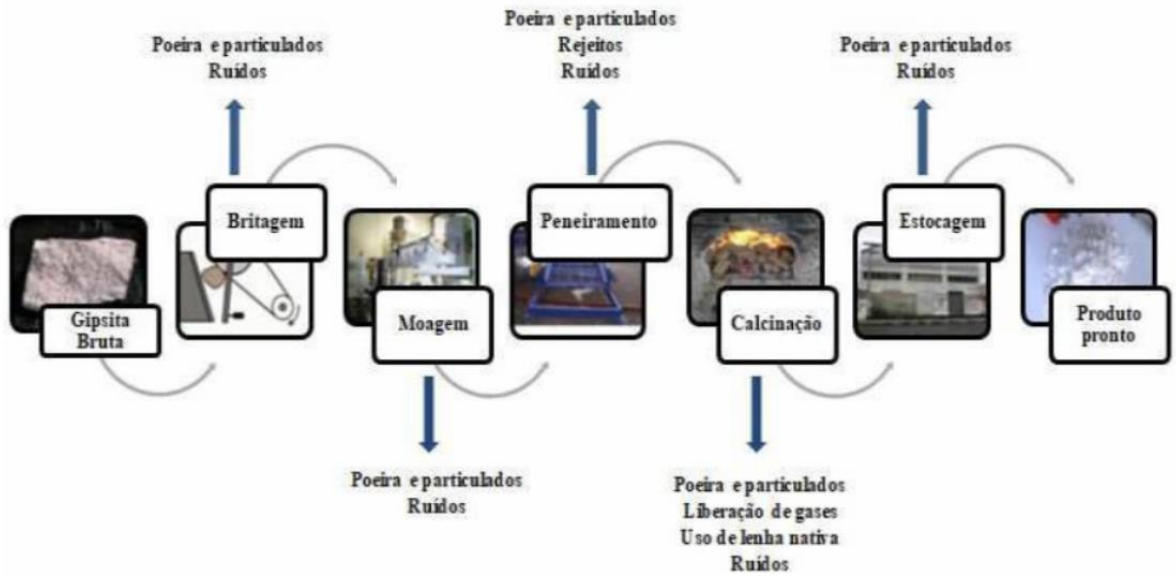


Figura 4- Fluxograma da etapa de beneficiamento do gesso e impactos negativos associados (Soraya, 2019)

2.2 PRODUÇÃO DE BLOQUETES

A atual produção de gesso no APL (Arranjo Produtivo Local) do Araripe atual é de cerca de 4,44 milhões t/ano e a extração total de gipsita estaria próxima a 15,8 milhões de toneladas/ano (SINDUSGESSO, 2023). Desse montante, apenas 35% da gipsita extraída destina-se para a fabricação de gesso, ou seja, cerca de 5,53 milhões de toneladas/ano.

Com base nesta estimativa global, a geração de resíduo de gesso, na forma de poeira, rejeitos e partículas expurgadas na produção, é de cerca 0,7% do gesso produzido, chegando a 38 toneladas anuais.

A linha de produção de bloquetes está maioria associada às fábricas de componentes pré-moldados (blocos para alvenaria e placas para forro), cujas quebras são incorporadas, juntamente com as sobras da produção artesanal dos componentes, ao fabrico de bloquetes. Existindo ainda pequenas fabriquetas que recolhem os gessos de chão de fábrica e restos das fábricas de componentes pré-moldados para fabricação de briquetes. A Figura 5 mostra o processo de produção de bloquetes associada a linha de produção de pré-moldados de gesso.

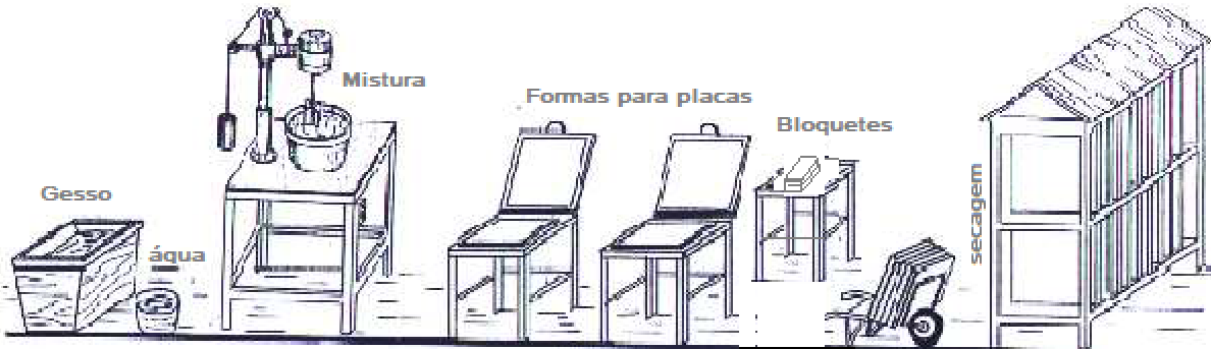


Figura 5- Linha de produção artezanal de pré-moldados de gesso com a incorporação de produção secundária de bloquetes.

2.3 CONSTRUÇÃO DE CASAS COM BLOQUETES DE GESSO

A construção das casas com a utilização de bloquetes de gesso é feita na forma rústica, como os blocos são produzidos no formato prismático fêmea-fêmea, no assentamento destes são utilizadas argamassas a base de cimento e areia, alguma vezes se utiliza também barro. No embasamento das paredes também são utilizados bloquetes de gesso. O telhado em telhas de fibrocimento ou cerâmica capa-canal sobre estrutura de madeira. A figura 6 mostra aspectos de um galpão de produção de bloquetes e de casas construídas e em construção sob esta tecnologia.

Figura 6- Edificações construídas e em construção com bloquetes de gesso

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em termos de sustentabilidade a indústria da construção civil está inserida nessa complexa problemática tendo um importante papel de desenvolver e disseminar sistemas construtivos capazes de suprir a demanda por habitações para a população alvo, mais carente de recursos para adquirir uma moradia.

Por outro lado o setor da construção civil é reconhecida como uma das atividades de maior interferência na ecologia em nosso planeta. Segundo dados das Nações Unidas(IPCC,2015), a construção consomiu em 2010 aproximadamente 32% de toda energia da produção, representando 8,8 giga toneladas de CO_2, equivalente a 18,4% das emissões globais.. Infelizmente, a construção também não fica atrás quando se trata de emissões atmosféricas, respondendo por 1/3 do total de emissões de gases de efeito estufa.

Neste contexto a produção de uma tonelada de gesso necessidade de energia associada a sua produção de aproximadamente 0,017 tep(toneladas equivalente de petróleo). Já o consumo energético para se produzir uma tonelada de cal varia de 3,6 a 7,5 tep. Para se produzir 1 tonelada de

cimento são necessários 70 tep (Bajay et al., 2010), isto sem considerar a inerente produção de CO_2 que varia enormemente com a matriz energética utilizada. Embora tenham sido observados avanços tecnológicos na diminuição de CO_2 no processo deprodução de cimentos, em 2010 ainda se registrava 0,153t de CO_2 para cada tonelada de cimento produzida(Hauke, 2007).

Neste contexto os bloquetes produzidos de forma artesanal em gesso e a construção das casas cumpre três funções importantes:

a) Aproveita os resíduos do pó do chão da fabricação do gesso, e dos pedaços e quebras oriundos da fabricação de pré-moldados na região produtora;
b) Reduz o custo na construção de casas com componentes que facilitam a construção;
c) Movimenta a economia local na produção de componentes de fácil assimilação da comunidade local.

As construções de edificações térreas em alvenaria de componentes (blocos e bloquetes) de gesso, são comuns e volumosas nas proximidades das regiões produtoras de gesso, principalmente nas que apresentam clima de baixa precipitação pluviométrica.

As construções de edificações térreas em alvenaria de componentes (blocos e bloquetes) de gesso, embora pouco citadas na literatura, são comuns nas proximidades das regiões produtoras de gesso, principalmente pela disponibilidade dos insumos e por apresentam clima de baixa precipitação pluviométrica.

Em uma das poucas publicações, Nolhier, em seu livro “Construire em plâtre” (Nolhier, 1986), apresenta vários casos de construções com produtos de gesso, construídas tanto em interiores quanto em exteriores, em diversos países da África e Ásia. Na região do Sertão do estado de Pernambuco, existem centenas de edificações térreas construídas em alvenaria de vedação em blocos e bloquetes de gesso, como alternativa para as edificações (Sobrinho, 2021).

É importante contextualizar que o foco deste artigo é mostrar um estudo de caso, considerando a disponibilidade dos insumos, a cultura regional, a sinergia das pessoas com os materiais e os produtos e os aspectos econômicos que impulsionam a produção deste tipo de componente e a construção das casas na região de produção de gesso, bem como os aspectos de climáticos da região.

REFERÊNCIAS

APAC (2019)- Agência Pernambucana de águas e Clima, Acesso em novembro de 2019. https://www.apac.pe.gov.br.

Araújo, S. M. S., Martins, L. A. M. (2012) A Indústria Extrativa Mineral do Polo Gesseiro do Araripe e seus Impactos Socioambientais. Revista de Geografia, 29(1), 91-112.

BAJAY S.V e SANT’ANA P.H.MCNI (2010)-Confederação Nacional da Industria. Acesso novembro 2014 http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/262/20121127135747236198i.pdf [acesso 20.11.2014].

Costa, A. R. S., Santos, T. C. G., Kozmhinsky, M., Alencar, S. K. P, Valle, G. (2017) Aplicação da Matriz GUT na Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Recife-PE. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, 10(2), 201-213.

DNPM (2018) - Departamento Nacional de Produção Mineral, acesso em out 2018. https://antigo.mme.gov.br/acesso-a-informacao

HAUKE, B (2007)- Environmental Product Declaration for structural steel as basis for sustainability assessment of constructions. XI DBMC, Istanbul, 2007

IPCC. Climate Change (2015)- Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary. In: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: . Acesso em: 20 mar. 2017. 2015.

INMET-acesso site setembro 2019- http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos

Nohier Marc - Construire en plâtre . –ed. L' Harmattan, 1986.

SINDUSGESSO(2014)- Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco-O Polo Gesseiro. Acesso em novembro de 2023. Disponivel em: http://www.sindusgesso.org.br/polo_gesseiro.

Sobrinho, C.W.A.P (2021) - Durabilidade das Alvenarias de Blocos de Gesso- Limites de sua Utilização. Tese de Doutorado, FEUP 218pg (2021) *https://hdl.handle.net/10216/136064*

Soraya El Dier(2019)- Produção de gesso no Araripe pernambucano: impactos ambientais e perspectivas futuras. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, Vol. 12, No.3, 496–509 DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.3.62953

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESCÓRIA DE SOLDAGEM COMO AGREGADO EM ARGAMASSAS – UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL

Schneider Almeida Paiva[a]; Viviane Drumond Rodrigues[b]; Manoel Milton Barros Pereira[c]; José Augusto Gomes Neto[d]; Romildo Berenguer[e]; Tiago Felipe de Abreu Santos[f]

[a]UFPE (Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil), schneider.paiva@ufpe.br

[b]UFPE (Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil), viviane.drumond@ufpe.br

[c]AESA (Autarquia de Ensino Superior de Arcoverde, Arcoverde – PE, Brasil), miltonbpereira@hotmail.com

[d]IFPB (Instituto Federal da Paraíba, Princesa Isabel – PB, Brasil), jaugustogn@hotmail.com

[e]UPE (Universidade de Pernambuco, Recife – PB, Brasil), romildo.berenguer@upe.br

[f]UFPE (Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil), tiago.felipe@ufpe.br

RESUMO

A soldagem por arco submerso (SAW) é um processo que protege a poça de fusão da contaminação atmosférica através de fluxo granular. Durante o processo, uma grande quantidade de escória é formada e descartada. Tendo em vista que a quantidade de areia e cimento, materiais cruciais na construção civil, reflete o desenvolvimento econômico e social de uma região, e para um desenvolvimento sustentável há uma necessidade imperativa de práticas condizentes, esforços ativos estão sendo feitos para explorar materiais alternativos que minimizem o impacto ambiental da extração de areia. A pesquisa está focada na reutilização de escórias de soldagem como substituto parcial da areia grossa em várias aplicações, incluindo produtos e subprodutos da construção civil. As amostras de escória de soldagem foram separadas por granulometrias, permitindo diferentes incorporações. A caracterização química foi realizada por ensaios de fluorescência de RX, apresentando um material rico em óxidos e características básicas de pH, composição química amplamente utilizada e normalizada para uso em matriz cimentícia. Os resultados dos ensaios após 21 dias de cura mostraram resistência mais elevada em comparação com a amostra padrão. As escórias de soldagem parecem ser ideais para diversas aplicações na construção civil, podendo ser moídas e utilizadas para substituir todos os grânulos de agregado fino.

Palavras-chave: Arco-submerso, Escória, Argamassa, Agregado, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa sobre a integração de detritos de escória de soldagem por arco submerso em argamassas de cimento é fundamentada em vários aspectos ligados à sustentabilidade e ao gerenciamento apropriado de resíduos industriais. A geração de resíduos industriais é uma realidade nas operações de fabricação, especialmente na indústria metalúrgica, tornando-se essencial a adoção de estratégias eficazes para minimizar o impacto ambiental resultante. A escória de soldagem por arco submerso é um desses resíduos, produzido em grandes volumes e frequentemente descartado de maneira insustentável (Viana *et al*., 2009). De acordo com Morete *et al.* (2006), a produção deste resíduo no Brasil é próxima de 500 toneladas por mês.

O descarte impróprio da escória é um problema ambiental, pois pode poluir o solo e os recursos hídricos, além de ocupar grandes espaços em aterros sanitários. Nesse contexto, a incorporação dessa escória em argamassas de cimento pode ser uma alternativa viável de reutilização, evitando a extração de recursos naturais para a produção na construção civil (Morete *et al.*, 2006; Viana *et al.*, 2009). Ao empregar os resíduos de escória na fabricação de argamassas, é possível diminuir a necessidade de extração de matérias-primas naturais, como areia e pedra britada, que são componentes essenciais desses materiais. Isso contribui para a preservação dos recursos naturais e para a redução do impacto ambiental causado pela atividade de extração. Além disso, a incorporação de resíduos de escória de soldagem por arco submerso em argamassas de cimento pode oferecer vantagens técnicas, como o aumento da resistência mecânica e durabilidade do material. Estudos indicam que essa incorporação pode melhorar a coesão e estabilidade da argamassa, tornando-a mais resistente e capaz de suportar esforços físicos e químicos (Moura *et al.*, 2024, Morete *et al*., 2006; Viana *et al*., 2009).

Em pesquisas com as palavras-chaves "arco submerso" OR "soldagem por arco submerso" OR "submerged arc welding" nas bases de dados SCOPUS e WOS foram encontrados 8061 e 1392 artigos respectivamente. Restringindo ao tema deste trabalho com a pesquisa, 10/8061 artigos na SCORPUS e 2 /1392 na WOS mostram que o estudo poderia preencher uma lacuna importante na literatura científica existente. Além disso, discutir a relevância e o impacto potencial de suas descobertas em um campo tão especificamente definido reforça a natureza inovadora do trabalho.

Outro aspecto importante é a preocupação atual com o marco do saneamento no Brasil, formalmente conhecido como a Lei nº 14.026, foi sancionado em 15 de julho de 2020, e trouxe mudanças significativas para a prestação de serviços de saneamento básico no país. O objetivo principal do marco é universalizar e qualificar os serviços de saneamento básico no Brasil, que incluem o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos, além do manejo de águas pluviais. Nesse cenário, a utilização de resíduos de escória de soldagem em argamassas de cimento pode contribuir para o desenvolvimento de uma indústria mais sustentável, alinhada com os princípios de reutilização e reciclagem de materiais.

1.1 ARGAMASSA

As argamassas são combinações de aglomerantes e agregados usadas para conectar elementos de construção, como tijolos, blocos e pedras. Elas são aplicadas em camadas e endurecem ao longo do tempo, formando uma ligação robusta e duradoura entre os elementos.

As argamassas podem ser categorizadas em diferentes tipos, dependendo da proporção dos materiais precursores e da finalidade pretendida (Metha e Monteiro, 2014). De acordo com Clara Ribeiro (2022),

existem vários tipos de argamassas, cada uma com composições e proporções específicas para usos distintos. Alguns dos tipos mais comuns incluem argamassa de assentamento, argamassa colante, argamassa de revestimento, argamassa para pisos e argamassa de grauteamento.

A areia é um componente principal das argamassas, compreendendo até 80% do volume total, ajuda a prevenir a perda de umidade, que pode causar rachaduras e fissuras na construção. A qualidade da areia usada na produção de argamassas é crucial para garantir a resistência e durabilidade do material. A areia deve ser limpa, livre de impurezas e ter uma granulometria adequada para o tipo de argamassa que será produzida.

A extração de areia é uma atividade que pode causar impactos ambientais significativos, como a degradação e poluição de rios e lagoas, erosão do solo e perda da biodiversidade. O governo brasileiro tem combatido severamente a extração ilegal no país, chegando a valores surpreendentes, Ele foi estimado em R$ 8.898.637.488,00 (R$ 8,9 bilhões), no ano de 2018, segundo Ramadon Porto Alegre em Jeronymo (2023). Além disso, a extração ilegal de areia pode levar à erosão e ruptura das cavas, com risco de alterar o regime hidrológico do entorno e contaminar as fontes de água com partículas, inclusive de rejeito. A extração de areia é uma atividade que pode causar impactos ambientais significativos, como a degradação e poluição de rios e lagoas, erosão do solo e perda da biodiversidade. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - Pnuma alerta que a areia é o segundo recurso mais usado no mundo, atrás apenas da água, e que seu uso deve ser estratégico para evitar impactos ambientais.

Algumas formas alternativas para reduzir a extração de areia incluem:

1. Reciclagem de materiais de construção: A reutilização de materiais de construção, como concreto e tijolos, pode diminuir a demanda por areia e outros recursos naturais.

2. Uso de pedras britadas: As pedras britadas, que são rochas trituradas em diversos tamanhos, podem ser empregadas como alternativas à areia em certas aplicações. Elas são obtidas através da britagem de rochas e estão disponíveis em várias granulometrias.

3. Areia de minério: A areia de minério, um subproduto da mineração, pode ser usada como substituto da areia natural. Ela é derivada dos resíduos da mineração e pode ser encontrada em várias granulometrias.

4. Mudanças na legislação: Alterações nas leis podem contribuir para a diminuição da extração ilegal de areia e promover práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil.

1.2 SOLDAGEM

A soldagem por arco submerso é um processo de soldagem que emprega um arco elétrico entre um eletrodo consumível e a peça a ser soldada. Este método é protegido por uma camada de fluxo granular que resguarda o arco e a poça de fusão da atmosfera (Smith, 2019). Este processo é amplamente adotado na indústria metalúrgica para unir peças de aço, aço inoxidável, cobre, níquel, entre outros metais (Johnson, 2020).

A soldagem por arco submerso apresenta várias vantagens em comparação com outros processos de soldagem, como alta taxa de deposição, baixa emissão de fumos e respingos, boa qualidade e penetração do cordão de solda e possibilidade de automatização (Smith, 2019). No entanto, também possui algumas limitações, como a necessidade de preparação prévia das juntas, o alto custo dos

equipamentos e do fluxo, a dificuldade de inspeção visual do cordão de solda e a restrição ao uso em posições plana e horizontal (Johnson, 2020).

Os resíduos de fluxo de solda por arco submerso são materiais que restam após o processo de soldagem. Esses resíduos podem conter elementos metálicos, óxidos, sílica, flúor e outros compostos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana (Martinez, 2021). Portanto, é importante realizar um tratamento adequado desses resíduos, que pode envolver processos de separação, reciclagem, neutralização ou disposição final adequada (Martinez, 2021).

O tratamento adequado dos resíduos de escória de solda pode trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais, como a redução do consumo de matérias-primas, a diminuição da geração de resíduos perigosos, a preservação dos recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores e da comunidade (Martinez, 2021).

1.3 RESÍDUOS

Os resíduos sólidos da indústria metalmecânica representam um significativo desafio ambiental, pois têm potencial para contaminar o solo, a água e o ar com metais pesados e substâncias tóxicas. Além disso, esses resíduos ocupam grandes espaços em aterros sanitários e geram custos para as empresas que precisam descartá-los de maneira adequada. (Silva, 2022) Uma solução sustentável para mitigar o impacto desses resíduos é o seu reaproveitamento na construção civil, como matéria-prima para a produção de novos materiais. Esta prática traz benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia, pois reduz a extração de recursos naturais, a emissão de gases de efeito estufa e o consumo de energia. (Rodrigues *et al*., 2023)

Vários estudos têm sido realizados indicando como os resíduos sólidos da indústria metalmecânica podem ser utilizados na construção civil. Um dos exemplos mais conhecidos é o uso de resíduos de ferro e aço na fabricação de concreto. Esses resíduos podem substituir parte da areia e do cimento, aumentando a resistência e a durabilidade do material. Além disso, o concreto com resíduos metálicos tem propriedades magnéticas que podem ser exploradas em aplicações como sensores, atuadores e blindagens. (Martins; Lopes, 2021)

Outro exemplo é o uso de resíduos de alumínio na produção de argamassa. Esses resíduos podem melhorar as características térmicas e acústicas da argamassa, além de reduzir o seu peso específico. A argamassa com resíduos de alumínio também pode ser usada como isolante térmico em edificações. (Ferreira *et al.*, 2022)

Um terceiro exemplo é o uso de resíduos de cobre na fabricação de cerâmica. Esses resíduos podem conferir à cerâmica uma coloração avermelhada e propriedades bactericidas, que podem ser úteis em revestimentos e louças sanitárias. A cerâmica com resíduos de cobre também pode ter uma maior resistência ao desgaste e à corrosão. (Almeida; Santos, 2022)

A escória é um resíduo sólido gerado pela fundição de minérios metálicos, que pode ser aproveitado como matéria-prima para a fabricação de argamassas. A escória pode substituir parcialmente a areia nas argamassas, conferindo-lhes propriedades como maior resistência mecânica, menor absorção de água e melhor isolamento térmico. (Souza *et al.*, 2021)

A utilização da escória na fabricação de argamassas traz benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a indústria da construção civil. Do ponto de vista ambiental, a escória evita a extração de areia

dos rios e lagos, reduz o volume de resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e diminui as emissões de gases de efeito estufa. Do ponto de vista econômico, a escória reduz o custo das argamassas pela possibilidade de diminuir custos de extração de agregados naturais, aumenta a produtividade dos operários pela melhor trabalhabilidade. (Costa; Silva, 2023)

Para fabricar argamassas com escória, é preciso seguir algumas recomendações técnicas, como: escolher uma escória com granulometria adequada, que não contenha impurezas ou elementos nocivos; realizar ensaios de caracterização física e química da escória e da argamassa; definir a proporção ideal de escória, cimento e água para cada tipo de aplicação; armazenar adequadamente os materiais e as argamassas; e aplicar as argamassas seguindo as normas de execução e controle de qualidade. (Oliveira *et al*., 2022)

A escória é um resíduo sólido que pode ser transformado em um recurso valioso para a fabricação de argamassas. Com isso, contribui-se para o desenvolvimento sustentável da indústria metalmecânica e da construção civil, preservando os recursos naturais e gerando economia e eficiência.

Assim, a utilização de resíduos siderúrgicos projeta a possível criação, aprimoramento e desenvolvimento de tecnologia e novos materiais, analisando e aperfeiçoando suas características, para as suas possíveis aplicações em diversas áreas da engenharia. (Martins *et al.*, 2023)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizado o Cimento Portland CP-II-Z-32-RS, segundo o site cimento.org (2010) é composto com Pozolana no teor que varia de 6% a 14% em massa. O cimento CP II-Z, também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. Segundo a NBR 16697:2018, a adição de Pozolana ao cimento proporciona impermeabilidade e com isso maior durabilidade, apresentando maior resistência mecânica à compressão em comparação ao concreto de cimento Portland. Foi escolhido este tipo de cimento por tratar-se de um produto com mais disponibilidade no mercado da região e também por ser o cimento mais utilizado na construção civil em geral na região.

A porção de agregados é composta por areia natural e brita, adquirida em três municípios Recife (em Armazém local), Santa Cruz do Capibaribe (Fábrica de pré-moldados JK Construções) e Pesqueira (Fábrica de pré-moldados Pesqueira Pré-moldados). Sendo de diferentes origens, contribuirá para análise de impactos por diferentes granulometrias e composições químicas.

Por fim, sendo chave do estudo, a amostra de resíduo de escória de fluxo de soldagem utilizada foi coletada em indústrias do setor metalmecânico na Região Metropolitana do Recife. O agregado industrial de resíduo de escória de fluxo de soldagem após coletado foi submetido a processo de moagem para produção de agregado.

2.2 MÉTODOS

Após cominuição do material através de britador de mandíbulas, foi feita a caracterização granulométrica, por peneiramento segundo NBR 17054:2022, e a caracterização físico-química por ensaios de difração e fluorescência de Raios-X (tabela 2).

Vencida a etapa 01, foi feita a moldagem de 06 (seis) corpos de prova, com a homogeneização manual, seguindo os métodos práticos de campo. As misturas foram testadas para substituição de 0% (traço de referência do estudo), 10%, do agregado miúdo pelo resíduo de escória de fluxo de soldagem por arco-submerso. Estudos anteriores, mostram ganhos nas propriedades mecânicas utilizando esta proporção (Morete *et al.*, 2006). Foram feitos ensaios de resistência a compressão, determinação de massa específica, consistência, com o objetivo de identificar o melhor traço para uso em larga escala.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resíduo de escória, foi submetido a uma classificação granulométrica após o processo britagem (Figura 1), cuja distribuição dos grãos é apresentada na Tabela 1. O gráfico resultante é mostrado na Figura 2.

Tabela 1 – Separação granulométrica pós-britagem

Peneira (mesh)	Espaçamento (mm)	Retido (g)	% Retida	% Passa
4	4.8	286.50	11.69	88.31
8	2.4	1187.00	48.45	39.86
16	1.2	318.50	13.00	26.86
30	0.6	333.00	13.59	13.27
50	0.42	325.00	13.27	0.00
		2450	100	

Figura 1. (a) Amostra de escória de soldagem por arco submerso e (b) amostra após a britagem.

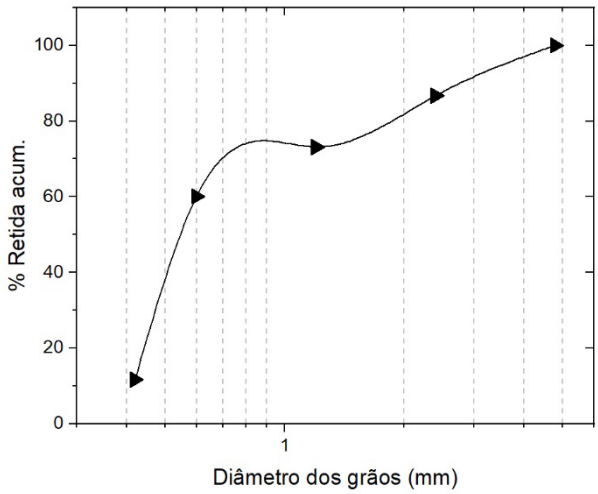


Figura 2. Curva granulométrica do resíduo de escória, diâmetro das partículas versus percentual passante.

Tabela 2 – Caracterização química por fluorescência de raios-X das amostras de escória, (a) fluxo de solda parcialmente fundido e (b) região completamente fundida.

Composto	**Concentração (%p.)**			
	Fluxo de escória parcialmente fundido		**Escória**	
CaO	46,2522	46,7764	45,9420	47,0891
Al_2O_3	1,5972	12,9891	0,0766	0,0555
SiO_2	0,1048	0,0000	5,0856	1,3248
Mn_2O_3	19,9145	19,7058	25,1368	24,5393
Fe_2O_3	19,0673	18,2719	6,4815	7,4307
ZrO2	8,2329	8,6502	14,4053	14,3902
BaO	1,4086	2,1410	1,3795	1,3523
TiO_2	0,7070	0,6600	1,0267	0,8731
Nb_2O_5	0,1625	0,3261	0,3031	0,3056
SrO	0,0684	0,0788	0,0737	0,0702
Y_2O_3	0,0478	0,0520	0,0686	0,0694
ZnO	0,2933	0,3078	0,0206	0,0127

Para os estudos foi utilizado o resíduo retido entre as peneiras # 30 e # 50, por se assemelhar à granulometria areia grossa lavada.

Nesta moldagem foram fabricados 6 corpos de prova adotando-se o traço usual para argamassa de assentamento com a proporção de cimento:areia de 1:3. Como a proposta é de substituição em 10%, foi utilizado o resíduo retido entre as peneiras # 30 e # 50 a partir dos seguintes valores:

Tabela 3- Traço utilizado em peso e volume, com adição de resíduo

Cimento :	**Areia :**	**Resíduo :**	**Água**
1	2,7	0,3	0,48
800g	2160g	240g	384g

O material apresentou consistência adequada e não apresentou exsudação. Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4, observa-se uma baixa dispersão, sendo que a resistência média foi 42 ± 1,8 MPa. Esse resultado se mostrou promissor visto que a resistência padrão de uma amostra sem adição de resíduo é de 20 MPa para tempo de cura de 27 dias.

Tabela 4 - Resistência à compressão de corpos de prova com adição de escória.

Argamassa com adição de 10% de escória como substituinte da areia em argamassa (1:2,7:0,3)				
Nome	**Massa úmida (g)**	**Tempo de cura**	**Carga (kgf)**	**Tensão (MPa)**
CP_1	433,0	21d	8240	41,15
CP_2	430,5	21d	8730	43,60
CP_3	434,5	21d	8210	41,00
CP_4	436,5	21d	7920	39,56
CP_5	433,0	21d	8920	44,55
CP_6	436,5	21d	8430	42,10

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a fase silicato de cálcio hidratado (CSH) compõe aproximadamente entre 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta hidratada, sendo sem dúvida a fase mais importante e determinante das suas propriedades. O silicato de cálcio hidratado (CSH) é formado por camadas com cadeias de SiO4 com possíveis alterações, ou seja, substituição do silício por alumínio. Na Figura 3 observa-se pronunciada a formação do CSH no ponto 1, 2 e 3, levando em consideração que a escória apresenta em sua composição, elementos favoráveis a formação da fase CSH, corroborando o incremento na resistência mecânica das amostras com adição de escória na Tabela 2.

Por outro lado, a portlandita (CH) se apresenta com formato característico de cristais prismáticos hexagonais, constituindo cerca de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. As formações desses cristais são afetadas pela disponibilidade de espaço, pela temperatura na qual está sendo realizada a hidratação do cimento, dentre outros fatores que agem diretamente nessa formação; a portlandita, presente no ponto 4 da Figura 3, contribui de maneira pouco expressiva para a resistência mecânica do concreto, principalmente por ter menor área superficial. Pode-se ainda destacar a formação de etringita com sua característica morfológica em formato de agulhas, de acordo com o observado nos pontos 5 e 6. A etringita se forma devido a interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas, em formato de cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Porém, a formação mais preponderante foi de cristais CSH, o que contribuiu para o aumento da resistência mecânica.

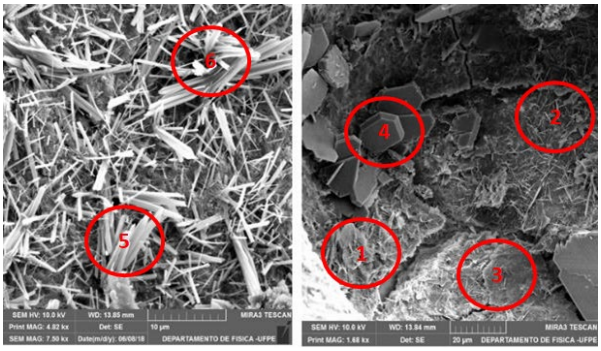


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura de amostras.

4 CONCLUSÕES

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) da escória de soldagem identificou óxidos significativos como CaO, Mn_2O_3, ZrO_2 e Fe_2O_3, além de características básicas de pH. Essa composição química é amplamente utilizada e padronizada para uso em pavimentação de vias. Os resultados após 21 dias de cura mostraram uma resistência mais alta em comparação com a amostra padrão (amostra padrão sem resíduos - 20 MPa). Quando a substituição de 10% de areia foi combinada com 21 dias de cura, a amostra atingiu o dobro da resistência da amostra padrão, ou seja, 40 MPa.

Esses resultados indicam fortemente a substituição do agregado pela escória, trazendo benefícios não apenas econômicos, mas também de desempenho mecânico. A análise microestrutural revelou a presença predominante da fase CSH, que contribuiu para o aumento da resistência mecânica dos corpos de prova. No entanto, também foram identificadas as fases etringita e portlandita. Essas descobertas sugerem que a escória de soldagem tem potencial para ser reutilizada de maneira eficaz na indústria da construção civil, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência do setor.

5 REFERÊNCIAS

ADMIN. 2010, “CP II Z – Cimento Portland composto com pozolana.” Disponível em: <https://cimento.org/cp-ii-z-32-cimento-portland-composto-com-pozolana/>.

Almeida, P.; Santos, R. Utilization of copper waste in ceramic production: Benefits and applications. Journal of Cleaner Production, v. 278, p. 123456, 2022.

Costa, L.; Silva, R. Environmental and economic benefits of slag utilization in mortar production. Construction and Building Materials, v. 310, p. 124876, 2023.

Ferreira, P. *et al.* Innovative uses of metallurgical slag in construction. Materials Science and Engineering: A, v. 812, p. 141231, 2022.

Jeronymo, G., (2023) "Extração ilegal de areia se aproxima de R$ 20 bilhões ao ano" Disponível em: https://umsoplaneta.globo.com/sociedade/noticia/2023/06/14/extracao-ilegal-de-areia-se-aproxima-de-r-20-bilhoes-ao-ano.ghtml. Acesso em: 1 out. 2023

Johnson, L. (2020). "Advantages and Limitations of Submerged Arc Welding". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 104, no. 5-8, pp. 2659-2668.

Martinez, R. (2021). "Treatment and Reuse of Submerged Arc Welding Slag: A Review". Journal of Cleaner Production, vol. 279, 123622.

Martins, J.; Lopes, A. Viabilidade técnica do uso de resíduos metalúrgicos em matrizes cimentícias. Journal of Materials Research and Technology, v. 12, p. 1234-1242, 2021.

Martins, T. et al. Sustainable applications of metallurgical waste in civil engineering. Journal of Environmental Management, v. 300, p. 113694, 2023.

Metha, P.K. e Monteiro, P.J.M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais, São Paulo, Pini, 2014.

Modenesi, P., Marques, P. "Introdução aos Processos de Soldagem". Disponível em: <introduo-aos-processos-de-soldagem.pdf (infosolda.com.br) >. Acesso em: 1 out. 2023.

Morete, G.F., Paranhos, R.P.R. e Holanda, J.N.F. Avaliação de algumas propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos incorporados com resíduo de escória de soldagem. (2006) Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 232-237.

Moura, M.V., Paiva, S.A., Rodrigues, V.D. *et al.* (2024) Analysis of the influence of mechanical properties of cementitious composites using submerged arc welding (SAW) slag recycled aggregate. Revista Gestão e Secretariado, v. 15, n. 3, p. 1-7, 2024.

NBR 13279:1995 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão

NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão - Método de ensaio

NBR 13278 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - Método de ensaio

Oliveira, M. et al. Technical guidelines for the incorporation of slag in mortars. Construction and Building Materials, v. 298, p. 123456, 2022.

Pagio, M. Z. *et al.* (2022), "Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias". Ambiente Construído, v. 22, n. 2, pp1. 167–186, jun. 2022.

Rodrigues, V. et al. Sustainable reuse of metallurgical waste in the construction industry: Benefits and challenges. Sustainable Materials and Technologies, v. 25, p. e00234, 2023.

Silva, R. et al. Benefícios da utilização de escória de soldagem como substituto de agregados em argamassas. Revista de Engenharia e Construção, v. 34, n. 2, p. 112-120, 2022.

Souza, D. et al. Mechanical properties and durability of slag-based mortars. Materials & Design, v. 204, p. 109678, 2021.Viana, C.E, Dias, D.P., Holanda, J.N.F. *et al.* (2019) The Use of Submerged-Arc Welding Flux Slag as Raw Material for the Fabrication of Multiple-use Mortars and Bricks. Soldagem & Inspeção, v. 14, n. 3, p. 257-262, 2009.

Smith, J. (2019). “Submerged Arc Welding: An Overview”. Journal of Welding and Joining, vol. 45, no. 2, pp. 123-130.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE METACAULIM EM RELAÇÃO A PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TRANSPORTE DE CLORETOS

Maria Silva Freitas [a, b]; Gibson Rocha Meira [b, c]

[a] Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em engenharia Civil, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife, Brasil, maria.msfreitas@ufpe.br

[b] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Grupo de Pesquisa em Materiais e Resíduos da Construção, Av. João da Mata, 256, 58015-020, João Pessoa, Brasil, gibson.meira@ifpb.edu.br

[c] Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, Via Expressa Padre Zé, 655, 58050-425, João Pessoa, Brasil.

RESUMO

Este trabalho avaliou o impacto da substituição do cimento Portland por 10% de metacaulim, em massa, nas suas propriedades mecânicas e de transporte de massa em concretos. Para tanto, foram moldadas amostras cilíndricas, 100 x 200 mm, com duas relações água/aglomerante 0,45 e 0,55. Após a cura de 28 dias as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, resistividade elétrica superficial e difusão de cloretos. Os resultados dos ensaios, resistência à compressão e absorção de água, realizados aos 90 dias, mostram que teve reatividade mais elevada do cimento CP V ARI conduziu a valores de resistência à compressão mais elevados e valores de absorção mais baixos. Contudo, o refinamento dos poros, proporcionado pelo metacaulim, conduziu a valores de resistividade elétrica superficial mais elevados para as dosagens com essa adição mineral. No que se refere ao transporte de cloretos, as dosagens com metacaulim apresentaram menor coeficiente de difusão. Esse comportamento está relacionado não só ao refinamento dos poros, mas também à maior capacidade de fixação desses íons nos concretos com metacaulim. Desta forma, verifica-se que os concretos com metacaulim, mesmo com menor resistência mecânica na idade de 90 dias, apresentaram melhor desempenho em ambientes com cloretos.

Palavras-chave: Adições minerais, concreto, difusão de cloretos, metacaulim, resistividade.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, grande parte das pesquisas científicas no ramo de materiais cimentícios tem focado no desenvolvimento sustentável. Isso envolve desde o desenvolvimento de novos materiais até o aprimoramento de misturas já existentes.

O impacto ambiental provocado pela produção de cimento tem instigado o desenvolvimento de novos compósitos, como os cimentos compostos e substituição de cimento por pozolana ou filler. A IEA - International Energy Agency. Publicou recentemente um roteiro tecnológico - Transição de Baixo Carbono na Indústria do Cimento, com perspectivas para o ano 2050. Nesse roteio, estima-se que a produção de cimento global contará com 8% de argila calcinada – metacaulim, em sua composição.

O metacaulim ganhou espaço no meio acadêmico devido a sua alta reatividade, como material pozolânico, e, na produção de concretos geopoliméricos, essa característica é resultado da estrutura tridimensional e anidra de aluminossilicato (Dai e Tran, 2014).

De acordo com Li *et al*., (2022) a incorporação do metacaulim nas misturas de concreto e argamassa pode resultar em misturas de menor porosidade, com microestrutura densa, devido aos produtos de hidratação adicionais como a etringita e o gel hidratado com silicato de cálcio (alumínio) (C-(A)-S-H), além da reação pozolânica. Para Ferreira *et al*., (2016) a descontinuidade de poros, resultado da reação do hidróxido de cálcio com o metacaulim, melhorou tanto a resistência à compressão, quanto a resistividade elétrica superficial das misturas, além de ser um aliado em ambiente contaminado por íons cloreto. Segundo Moffatt e Thomas, (2018) o uso do metacaulim em misturas de concreto possibilita maior capacidade de fixação de íons cloreto à matriz cimentícia.

Para tanto, os efeitos do metacaulim nas misturas de concreto tem ganhado espaço. A pesquisa envolveu desde as caracterizações na fase anidra, até pastas e concretos. Essa investigação avaliou, dentre outras características: o desempenho mecânico e o transporte de massa, com enfâse aos ambientes agressivos, considerando as suas qualidades químicas.

Assim sendo, Figueiredo *et al*., (2014) investigou misturas de concreto com 10% de substituição de cimento Portland de alta resistência inicial por metacaulim – HP, usando duas relações a/agl, 0,60 e 0,68. Eles concluíram que a substituição apresentou aumento na fixação de cloreto na matriz, com aplicação da técnica de difração de raio – X, observaram picos mais acentuados de sal de Friedel. Quanto a resistência mecânica houve uma redução de 20% em relação a mistura de referência.

Ferreira *et al*., (2015) variou o teor de substituição em 10%, 15% e 20%. Os autores compreenderam que o teor de substituição foi positivo para o aumento da capacidade de ligação de cloretos a matriz. De forma progressiva, o maior teor de substituição, gerou menor coeficiente de difusão e maior capacidade de ligação dos íons cloreto. Ainda observaram o aumento progressivo da resistividade em função do tempo de cura.

Semelhantemente Valipour; Shekarchi e Arezoumandi, (2016) substituíram teores de 5%, 10% e 15% de cimento Portland por metacaulim, sendo o teor de 10% o mais eficiente, pois essa mistura apresentou menor coeficiente de difusão, e maior tempo de despassivação da armadura.

Considerando que esta seja uma adição de uso crescente nos próximos anos, com expectativa de futuro, é evidente a necessidade de conhecer o comportamento das misturas de concreto com substituição de cimento por metacaulim.

Diante disso, tem-se como objetivo avaliar o impacto da substituição do cimento Portland por 10% de metacaulim, em massa, nas suas propriedades mecânicas e de transporte de massa de concretos.

Materiais e MÉTODOS

1.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI),

livre de pozolana em sua composição.

Para composição das misturas com adição mineral foi utilizado o metacaulim (MK) industrializado da marca HP. A Tabela 1 apresenta a composição química desses materiais. Quanto aos agregados, foi empregada, areia média de rio e brita granítica com diâmetro máximo característico de 19 mm. Além disso, um aditivo superplastificante foi usado nas misturas quando necessário, para manter o Slump de 80 ± 10. A água empregada foi água de rede publica de distribuição.

A distribuição granulométrica dos agregados e dos aglomerantes são vistas na Figura 1. Nos aglomerantes, CPV ARI e MK, também foram realizados os ensaios de fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios-X (DRX), cujos resultados estão expostos nas Tabela 2 e Figura 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição química dos aglomerantes

Amostras	CaO (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	SrO (%)	ZnO (%)	Zr_2O (%)	Total (%)
CP V ARI	62,25	22,11	3,41	3,99	0,96	0,37	0,15	0,06	0,03	100
MK	0,82	49,74	6,79	38,78	1,27	0,05	0,05	0,26	0,26	100

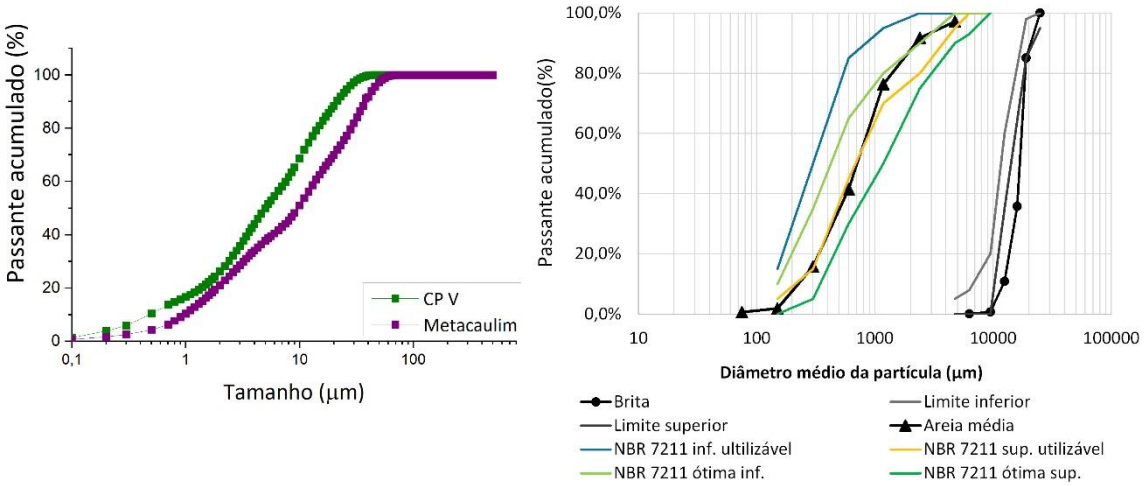


Figura 1 - Distribuição granulométrica dos materiais

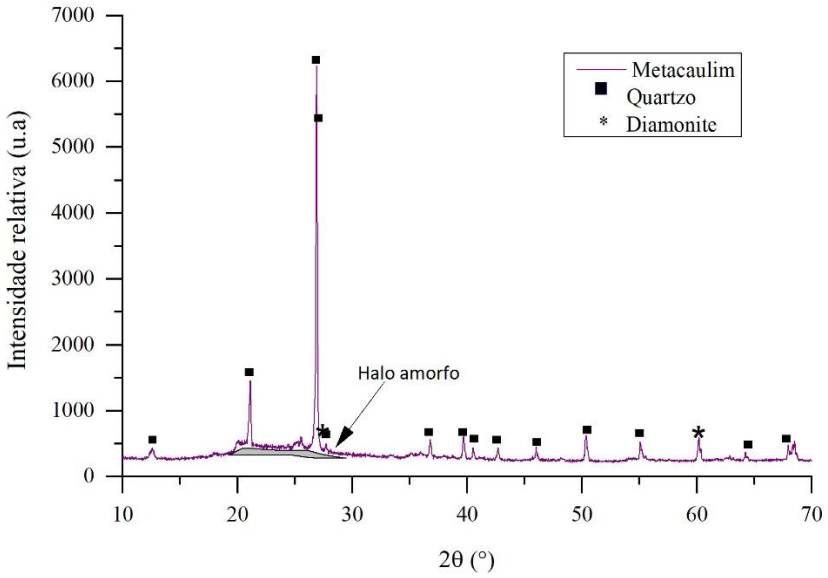


Figura 2 – Difração de raios-X do metacaulim.

1.2 PRODUÇÃO DAS MISTURAS

Na produção dos concretos, foram trabalhadas duas relações água/aglomerante, 0,55 e 0,5, sendo uma mistura referencia e outra com substituição de cimento Portland por 10% de metacaulim, em massa, totalizado quatro misturas, apresentadas na Tabela 2. Todos os CPs foram do tipo cilíndricos, medindo 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.

Tabela 2 - Dosagens de concreto para 1 m³

Mistura	CP V - ARI (Kg)	Metacaulim (Kg)	Relação a/ag	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)	Aditivo (%)
R55	367	-	0,55	837	977	202	-
K55	330	37	0,55	837	977	202	0,3
R45	464	-	0,45	754	939	213	0,3
K55	417	47	0,45	754	939	213	0,4

1.3 MÉTODO DE ENSAIOS APLICADOS

2.3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

O processo de hidratação das misturas foram avaliadas por ensaio de difração de raio-X realizado em pastas nas mesmas proporções de a/agl dos concretos (0,55 e 0,45) aos 90 dias de cura. Após a cura, as pastas foram maceradas em almofariz e peneiradas em peneira de 75 µm. Em seguida, as amostras foram pulverizadas e encaminhadas para o ensaio. Como parâmetros do ensaio foi aplicada uma varredura de 5 – 70° (2θ) com uma taxa de varredura de 0,5°/ min.
Em complemento a essa técnica, as amostras foram submetidas ao ensaio de termogravimetria. O ensaio foi realizado com atmosfera do forno de gás nitrogênio (N_2), com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min entre 25 °C e 1000 °C em cadinho de alumina. A aplicação desse ensaio teve o objetivo de estimar o percentual de hidratos, hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio nas pastas.

2.3.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para avaliar o desempenho mecânico dos concretos foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial de acordo com o procedimento da NBR - 5739 (2018), nas idade de 28 e 90 dias.

2.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Absorção de água por imersão e o índice de vazios (%) do concreto endurecido foi obtido seguindo as recomendações da NBR - 9778 (2005). Este ensaio foi realizado na idade de 90 dias de cura.

2.3.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

A resistividade elétrica superficial das misturas de concreto foi medida nas idades de 28 e 90 dias. As amostras foram ensaiadas na condição saturada superfície seca, como recomendado por Chen; Chang e Yeih, (2014), com espaçamento de 3 cm entre os elétrodos, seguindo as recomendações da RILEM 154 - EMC (2000), utilizando um equipamento da MIKII da CNS Farnell.

2.3.5. TRANSPORTE DE MASSA

O transporte de íons cloreto nas amostras de concreto foi avaliado pelo metodo de ensaio de difusão, normatizado pela NT BUILD 443: 1995, que expressa o fluxo de íons partido da região externa, mais concentrada, para a parte interna como mostra a figura 3A. Após 90 dias de exposição à solução rica em cloreto de sódio, 165 ± 1 g/l [2,8 M], as amostras foram pulverizadas, em distintas camadas (0-1, 1-3, 3-5, 5-8, 8-12, 12-16, 16-20, 20-25 e 25-30 mm), como disposto na figura 3B.

Com as amostras em pó, as concentrações de cloretos livres (solúveis em água) e cloretos totais (solúveis em ácido), em relação a massa de cimento, foram determinadas por titulação potenciometrica, seguindo as recomendações da ASTM C 114 (2018).

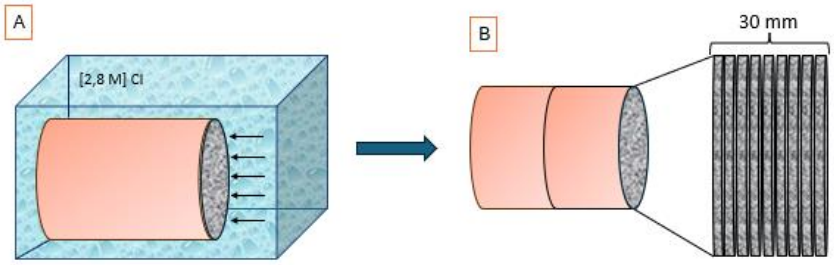


Figura 3 – Representação esquemática do ensaio da NT Build 443: 1995. Sendo 3 A o tempo o arranjo de exposição da amostra e 3 B a frações de coleta retirada amostras e posteriormente pulverizada para ensaios seguintes.

Após obter as concentrações de cloreto (livres e totais) em suas respectivas profundidades, foram realizados ajustes da segunda lei de Fick (Equação 1)aos dados experimentais, para obtenção da concentração superficial de cloretos – Cs e do coeficiente de difusão aparente - Dns.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i)erf\frac{x}{\sqrt{4.D_{ns}.t}} \qquad (1)$$

Onde: *C(x,t)*: concentração dos cloretos na profundidade média do intervalo de coleta (x) no tempo *t*); *x*: profundidade (cm); *t*: tempo de exposição a solução concentrada de cloreto (s), *Ci*: concentração inicial de cloretos em relação a massa de aglomerante; *Cs*: concentração de cloretos na superfície em relação a massa de aglomerante; *erf*: função de Erro de Gauss; *Dns*: coeficiente de difusão no tempo *t* (cm²/s).

2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

Na figura 4 são mostrados os padrões difratómetros das pastas cimentícias, de referência e com 10% de substituição de CPV por metacaulim, em massa, para as relações a/agl 0,55 e 0,45, com 90 dias de cura.

Embora tenham ocorrido os picos em pontos semelhantes, a intensidade do pico indica a diferença entre as pastas. A redução de intensidade dos picos de Portlandita representa a atividade pozolanica do metacaulim. Além disso, as pastas com metacaulim registaram mais picos de quartzo e gipsita, diferente das pastas referencia. Além disso, foram identificados picos de calcita, resultante de carbonatação das amostras.

As análises Termogravimétricas das pastas são apresentadas nas Figuras 5 e 6 considerando as relações a/agl, 0,55 e 0,45, respetivamente. Esse método de ensaio é importante para acompanhar a transição vítrea de materiais. Com isso, podemos avaliar a estabilidade térmica e perda de água, baseando-se na medição da decomposição em massa, em função da temperatura em um ambiente controlado. Corroborando os resultados de difração de raio-X, os ensaios de TG/DTG mostraram sintonia com os picos identificados no ensaio de DRX.

Desse modo, em relação à pasta de referência, a pasta com metacaulim apresentou aumento no teor de água na primeira faixa de pico da TG, de 25 °C até 409 °C, contemplando toda água presente nas fases iniciais de decomposição de massa anterior a fase do hidróxido de cálcio, e redução no teor de hidróxido de cálcio ((Ca $(OH)_2$), o que era esperado considerando a reação pozolanica da adição.

Apenas a pasta K45 apresentou aumento no teor de carbonato de cálcio em comparação a pasta de referência, conforme mostra na tabela 3.

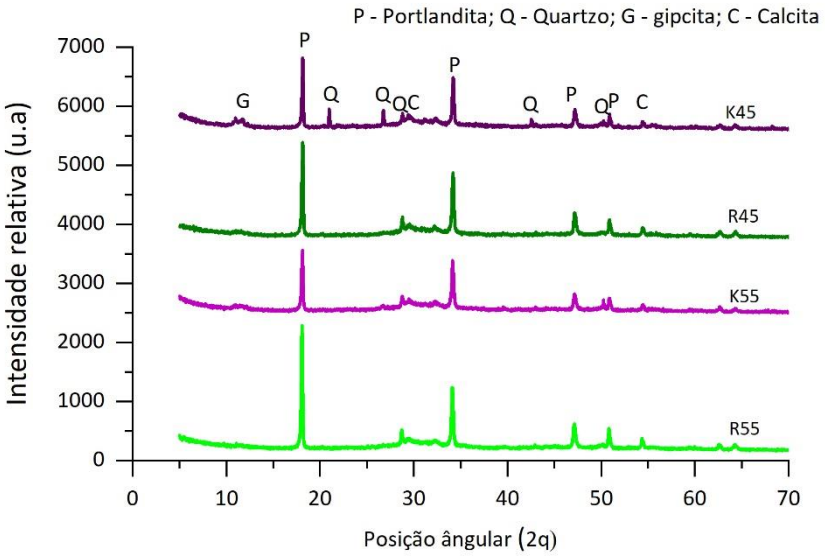


Figura 4 – Difratogramas das pastas cimentícias analisadas com 90 dias de cura.

Tabela 3 - Perdas de massa (TG/DTG) das pastas estudadas com 90 dias de cura.

Pasta	Água presente até ≈ 400 °C (%)	(Ca(OH)2 (%)	(CaCO3) (%)
R55	13,79	21,37	9,18
K55	15,89	14,79	7,10
R45	12,96	14,50	4,61
K45	17,26	13,76	9,45

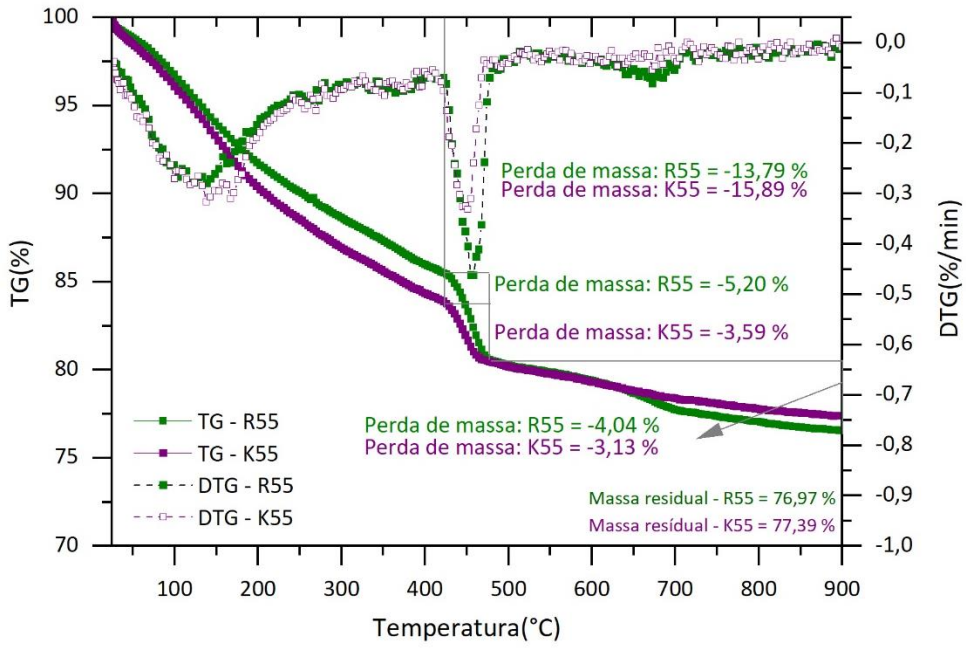


Figura 5 – Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas R55 e K55 com 90 dias de cura.

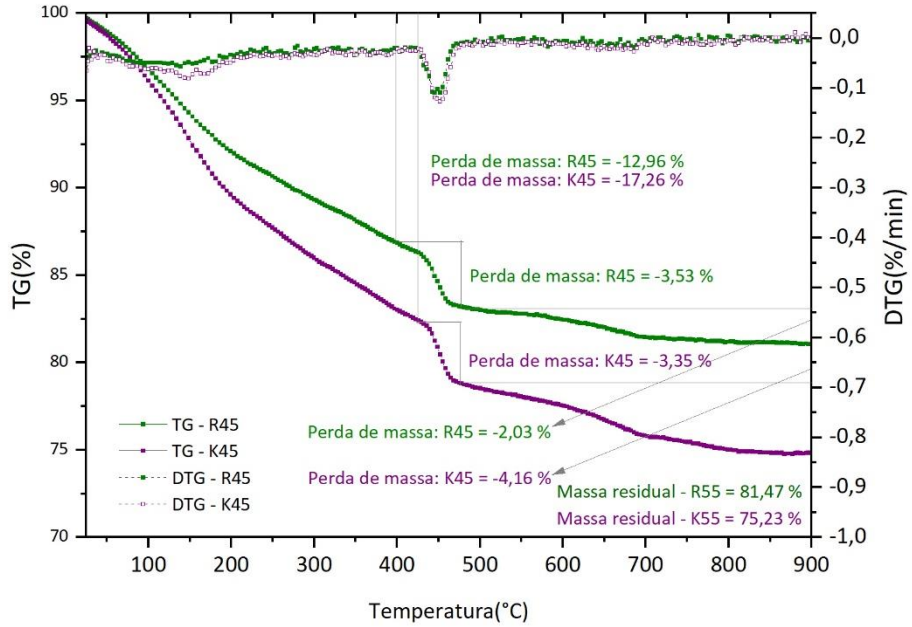


Figura 6 – Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas R45 e K45 com 90 dias de cura.

A maior fração de água presente na fase inicial ≈ 400 °C , nas pasta com metacaulim, pode ser resultado da necessidade de desidratação da quantidade maior de gipsita presente nas pastas no intervalo considerado (Scrivener; Snellings e Lothenbach, 2018).

3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MECÂNICA E ABSORÇÃO TOTAL DE ÁGUA.

Na Figura 7 é mostrado a resistência mecânica dos concretos produzidos, na idade de 28 e 90 dias de cura.

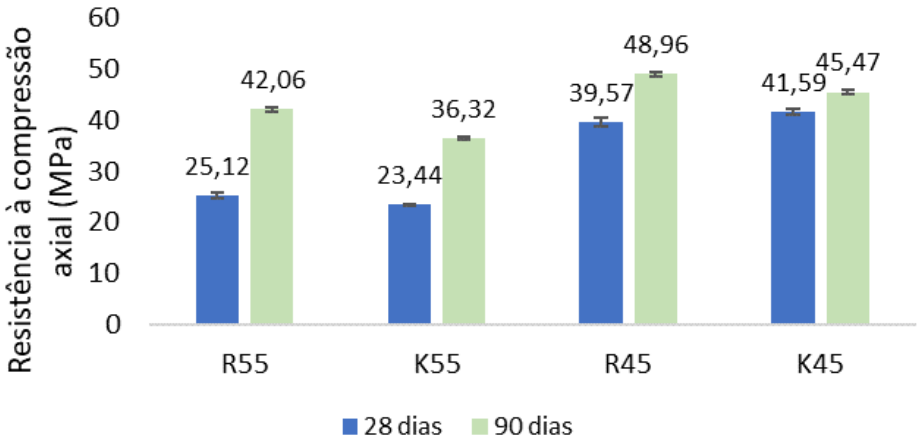


Figura 7 – Resistência à compressão axial das misturas estudadas.

Comparando-se esses resultados com resultados da literatura, pode-se observar que resultados semelhantes foram semelhantes foram obtidos nos estudos de Al-Alaily e Hassan (2016) e Figueiredo *et al*., (2014), conforme pode ser observado na Figura 8 que compila esses e outros resultados.

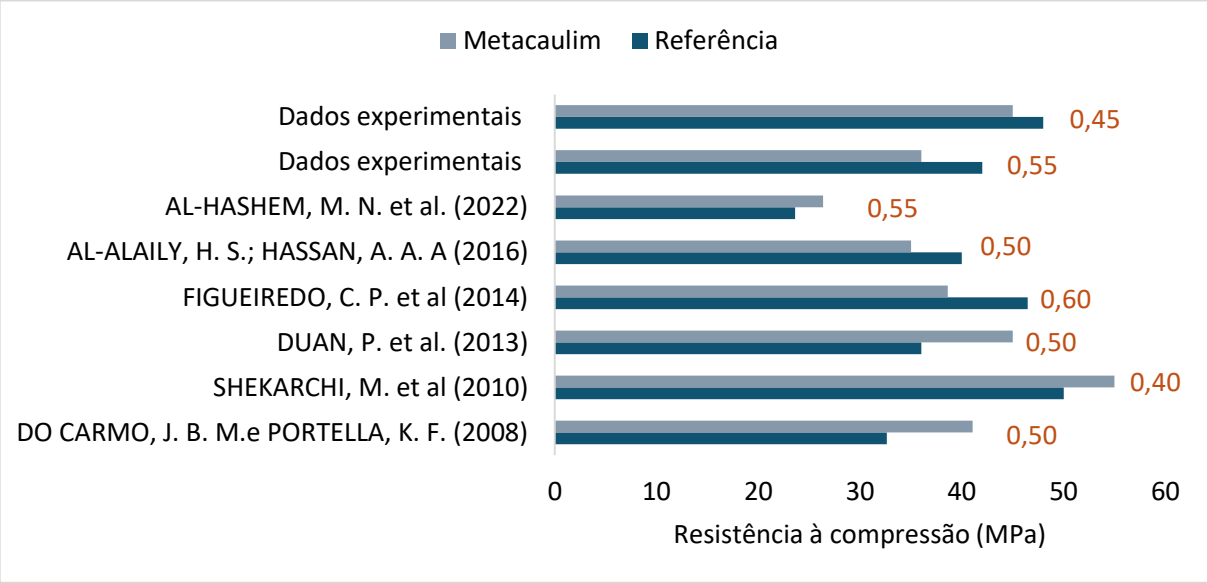


Figura 8 – Resistência à compressão de mistura de concreto na idade de 90 dias.
Fonte: (Al-Alaily e Hassan, 2016; Al-Hashem *et al*., 2022; Do carmo; Portella, 2008; Duan *et al*., 2013; Figueiredo *et al*., 2014; Shekarchi *et al*., 2010)

Como pode-se notar, os resultados experimentais encontram-se em harmonia com outros resultados da literatura. Além do mais, a resistências mecânica alcançadas nessas misturas as classificam para aplicação em todas as classes de agressividade apresentadas na norma brasileira NBR - 12.655 (2015).

Segundo Taylor (1997) o produto de hidratação tem um papel fundamental na resistência a compressão mecânica do concreto, mas a porosidade da mistura não deve ser desconsiderada, sendo ela, característica responsável pelo aumento ou redução do desempenho mecânico.

Na Figura 9 podemos verificar essa relação ao associar aos resultados de resistência à compressão, com os resultados de absorção, consequentemente como índice de vazios. Nesse sentido, os concretos R55 e R45, apresentam maior resistência à compressão e de forma direta, menor índice de vazios.

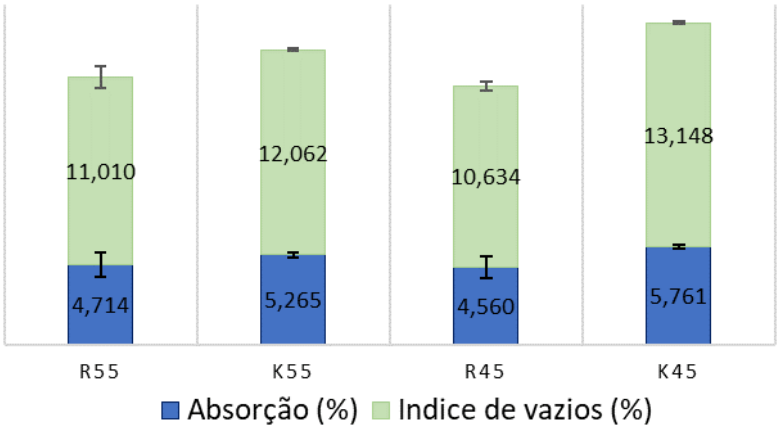


Figura 9 - Indice de vazios e absorção total por imersão das misturas de concreto com 90 dias de cura

3.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

Os resultados apresentados na Figura 10 são uma média de 18 medidas coletadas de três corpo de prova, realizadas nas idades de 28 e 90 dias de cura.
Observa-se que, tanto na mistura de relação a/agl 0,55 quanto na relação a/agl 0,45 as resistividades foram maiores para os concretos com metacaulim. A mistura K45 se destacou das demais, obtendo um crescimento de 201% em relação a R45, enquanto K55 aumentou 7% em relação a K55, na idade de 90 dias.

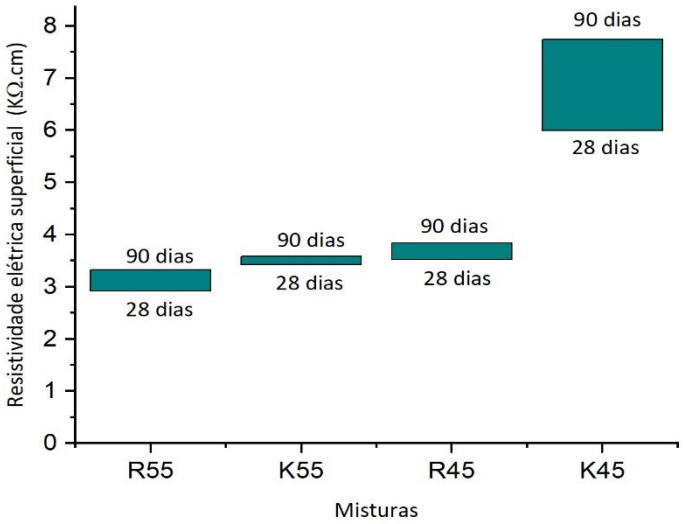


Figura 10 – Resistividade elétrica superficial em concreto na idade de 28 e 90 dias.

Embora, tenha encontrado maior porosidade nas misturas com metacaulim, em relação as amostras de referência, o resultado de maior resistividade pode ser efeito do maior refinamento da estrutura porosa da mistura. Isso significa que a amostra contém menos poros interconectados e mais tortuoso, o que proporciona maior resistência à passagem de corrente (Ollivier e Torrenti, 2008). De acordo com Spragg e Graybeal, (2022) o movimento da carga elétrica em materiais à base de cimento ocorre principalmente dentro da solução iônica dos poros.
Além disso, a redução progressiva da porosidade, justificada pela hidratação continua das misturas à base de cimento, é associada com o aumento da resistividade elétrica superficial das misturas em relação ao tempo (Andrade e D'Andréa, 2009; Medeiros junior, 2014), como aconteceu em todas as misturas trabalhadas com crescimento de 13%, 4%, 9% e 29% entre 28 dias e 90 dias, para as misturas R55, K45, R55 e K45, respectivamente.

3.4. TRANSPORTE DE MASSA

A Figura 11 apresenta os perfis de cloretos médios de três amostras que estiveram 90 dias em ensaio (NT Build 443: 1995). Os perfis foram traçados a partir das concentrações obtidas nas amostras das camadas pulverizadas do corpo de prova.
No que diz respeito aos perfis, nota-se diferença considerável de concentrações entre as misturas referência e as misturas com metacaulim, sendo mais visível nas amostras de relação a/agl 0,55. Além do mais, as dosagens com metacaulim concentram menor quantidade de cloretos, tanto livres, quanto totais e apresentam um declínio de concentrações mais rápido. Sendo que a velocidade da atenuação da concentração é refletida no coeficiente de difusão, como pode ser visto na Tabela 4.

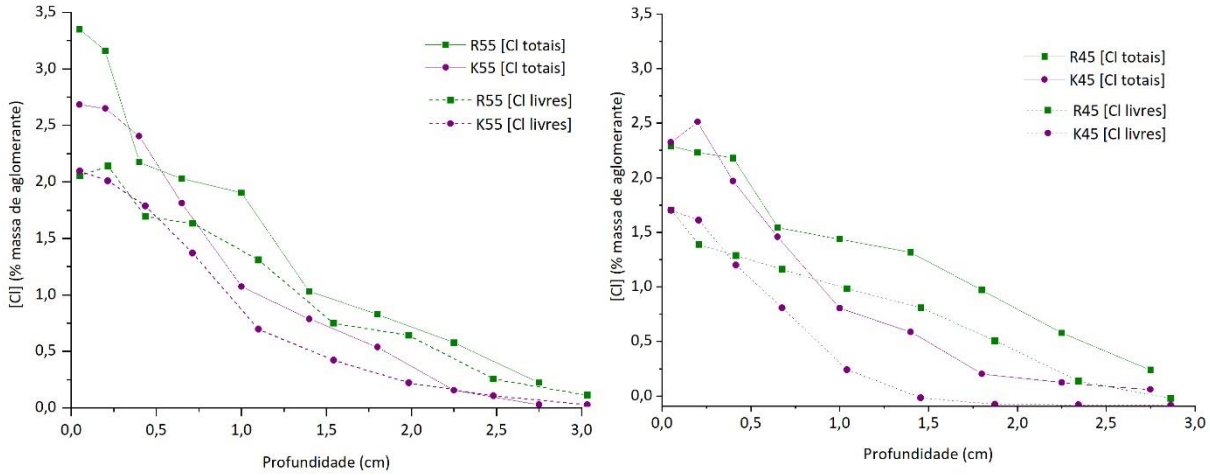


Figura 11 - Perfis de cloretos obtidos após 90 dias de ensaio (28 dias de cura)

Tabela 4 - Coeficiente de difusão de íons cloretos para as dosagens estudadas.

Misturas	Cloreto livre		Cloreto Total	
	Dns (cm²/s)	R²	Dns (cm²/s)	R²
R55	1,68E-07	0,98	1,47E-07	0,95
K55	7,45E-08	0,98	1,01E-07	0,98
R45	1,92E-07	0,95	1,78E-07	0,97
K45	3,98E-08	0,99	8,51E-08	0,99

Os perfis traçados mostram que o concreto R55 e K55 resultam em maior concentração na superfície. Essa observação pode ser corroborada com a pesquisa de Meira *et al*., (2020), onde obtiveram maiores concentrações superficiais de cloretos em concretos de maior porosidade. Além disso, tem-se uma diferença notável entre os perfis de cloreto totais e cloreto livres. Esse comportamento pode ser atribuído a maior capacidade de fixação de cloreto à matriz cimentícia com metacaulim, K55 e K45, devido a sua composição química, maior % de Al_2O_3 (Tabela 1).

Segundo Rasheeduzzafar *et al*., (1990) o teor de aluminatos na composição química do cimento pode reduzir a concentração de cloreto de sódio ($[Cl^-]$) em 53 % se variado a taxa de aluminatos de 2% para 14%. Dessa forma, a substituição de CP V por metacaulim provocou aumento no teor de Alumina presente na mistura e consequentemente, refletiu na capacidade de captura de cloretos na matriz.

O coeficiente de difusão representa a velocidade de transporte de cloretos, no concreto, movido por uma diferença de concentração, de um meio mais concentrado, externo, para um meio menor concentrado, interno (Figura 3).

Como foi visto na Tabela 4, as misturas K55 e K45 resultaram em menor coeficiente de difusão, embora tenha maior capacidade de absorção. Diante disso, observa-se que a composição química da mistura teve uma participação importante, sem desconsiderar o papel de refinamento dos poros captado nas medidas de resistividade elétrica superficial.

3 CONCLUSÕES

Diante do conteúdo exposto, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- A substituição de 10% cimento, em massa, por metacaulim provocou a redução do teor de

$Ca(OH)_2$, aos 90 dias de cura, demostrando efeito pozolânico do metacaulim.

- Embora tenha havido uma redução da resistência mecânica das misturas com metacaulim a % de diminuição ainda atende as exigências normativas nacional para todas as classes de agressividade.
- Quanto ao quesito transporte de íons cloreto, o uso do metacaulim provocou um retardo no ingresso, resultando em menor coeficiente de difusão nessas matrizes, K55 e K45.
- O refinamento dos poros, proporcionado pelo metacaulim, conduziu a valores de resistividade elétrica superficial mais elevados para as dosagens com essa adição mineral, especialmente para o concreto K45. Esse comportamento tem sintonia com a redução significativa do coeficiente de difusão nessa composição.

4 REFERÊNCIAS

Al-alaily, H. S., & Hassan, A. A. (2016). Time-dependence of chloride diffusion for concrete containing metakaolin. *Journal of Building Engineering*, *7*, 159-169. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.06.003.

Al-Hashem, M. N., Amin, M. N., Ajwad, A., Afzal, M., Khan, K., Faraz, M. I., ... & Khan, H. (2022). Mechanical and durability evaluation of metakaolin as cement replacement material in concrete. *Materials*, *15*(22), 7868. https://doi.org/10.3390/ma15227868

Andrade, C., D'Andrea, R., Castillo, A., & Castellote, M. (2009). The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete. *Centro de Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales, Toulouse*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de janeiro, p. 5–7.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, p. 23.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de janeiro, p. 16.

ASTM. C 114 - 07 (2018). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. ASTM International, n. February, p. 1–32.

Chen, C. T., Chang, J. J., & Yeih, W. C. (2014). The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, *71*,35-43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009

Dai, Z., Tran, T. T., & Skibsted, J. (2014). Aluminum Incorporation in the C–S–H phase of white Portland cement–metakaolin blends studied by 27 Al and 29 Si MAS NMR spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, *97*(8), 2662-2671. https://doi.org/10.1111/jace.13006

Do Carmo, J. B. M., & Portella, K. F. (2008). Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. *Cerâmica*, *54*, 309-318.https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000300007

Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, *44*, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075

Ferreira, R. M., Castro-Gomes, J. P., Costa, P., & Malheiro, R. (2016). Effect of metakaolin on the chloride ingress properties of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *20*, 1375-1384. DOI 10.1007/s12205-015-0131-8

Figueiredo, C. P., Santos, F. B., Cascudo, O., Carasek, H., Cachim, P., & Velosa, A. (2014). O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, *7*, 685-708. https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008

Li, W., Hua, L., Shi, Y., Wang, P., Liu, Z., Cui, D., & Sun, X. (2022). Influence of metakaolin on the hydration and microstructure evolution of cement paste during the early stage. *Applied Clay Science*, *229*, 106674. https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106674

de Medeiros Junior, R. A. (2014). Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil-corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos.

Meira, G. R., Ferreira, P. R., Freitas, M. S., & Andrade, C. (2020). Behaviour of Surface Chloride Concentration in Concretes Subjected to Field Exposure in Marine Atmosphere Zone. In *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)* (pp. 921-928).

Moffatt, E. G., & Thomas, M. D. A. (2018). Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment. *Cement and Concrete Research*, *113*, 65-73. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.004

NT BUILD 443 (1995). Concrete , Hardened: Accelerated Chloride Penetration. Nordtest method,

Ollivier, J. P., & Torrenti, J. M. (2008). La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert. *La durabilité des bétons*, *1*. https://www.researchgate.net/publication/290158099

Al-Saadoun, S. S., Al-Gahtani, A. S., & Dakhil, F. H. (1990). Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, *20*(5), 723-738. https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90006-J

RILEM Recommendation (2000). TC 154-EMC: Electrochemical Techniques For Measuring Metalic Corrosion. Materials and Structures, v. 33, p. 603–311.

Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., & Press, C. R. C. (Eds.). (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (Vol. 540). Boca Raton, FL, USA: Crc Press.

Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., & Mobasher, B. (2010). Transport properties in metakaolin blended concrete. *Construction and Building Materials*, *24*(11), 2217-2223. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.035

Spragg, R. P., Graybeal, B. A., Saladi, N., Montanari, L., & De la Varga, I. (2022). *Electrical Resistivity Testing to Rapidly Assess The Durability of UHPC-Class Materials [techbrief]* (No. FHWA-HRT-21-095). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology.

Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.

Valipour, M., Shekarchi, M., & Arezoumandi, M. (2017). Chlorine diffusion resistivity of sustainable green concrete in harsh marine environments. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4092-4100. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.015

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTADO DA ARTE DA UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MANUFATURADOS COM MATRIZES POLIMÉRICAS (TERMOPLÁSTICAS OU TERMORRÍGIDAS) REFORÇADOS COM NANOPARTÍCULAS PARA APLICAÇÕES EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Deesy G. Pinto[1,a*; 2,b]; Luís F. A. Bernardo [3,c]

[1, a*] Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Faculdade das Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus da Penteada, 9020-105, Funchal, Portugal, deesy.pinto@staff.uma.pt

[2,b] Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, deesy.gp.correia@ubi.pt

[3,c] GeoBioTec, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal, lfb@ubi.pt

*Autor correspondente: deesy.pinto@staff.uma.pt

RESUMO

O presente plano de trabalhos pretende realçar o potencial da utilização de materiais compósitos manufaturados com matrizes poliméricas reforçadas com nanopartículas (MCPRNPs) para aplicações em materiais de construção civil, face a outros materiais vastamente e tradicionalmente utilizados para o mesmo fim. Para tal, os autores compilaram as informações obtidas através da consulta realizada na literatura académica e científica (CLAC), nas últimas décadas, focando essencialmente, as nanopartículas (NPs) como o elemento de reforço de matrizes poliméricas (termoplásticas (MPTPRNPs) ou termorrígidas (MPTRRNPs)). Este tema ainda se encontra em desenvolvimento e surgiu para dar resposta às exigências cada vez mais complexas do setor da construção civil, na busca de novos materiais de construção que sejam capazes de atender às mais diversas aplicações, designadamente: sensores para colocação em infraestruturas (monitorização real do estado do esqueleto de edifícios e pontes, permitindo a deteção precoce de danos que possam justificar a necessidade de reabilitação), materiais autocicatrizantes (nanocompósitos capazes de se autorrepararem, prolongando a vida útil de infraestruturas e reduzindo a necessidade de manutenções como de reabilitações futuras), novos isolamentos térmicos e acústicos (nanocompósitos que visem a eficiência energética e conforto ambiental), nanotecnologia em revestimentos de superfícies (revestimentos com propriedades autolimpantes e repelentes à água, o que contribui para a preservação da integridade das estruturas) e nanocompósitos para a manufatura de materiais de construção cada vez mais sustentáveis (conduzindo a uma redução do impacto ambiental da indústria da construção). Globalmente, pretende-se que os MCPRNPs resultem de um bom "casamento" entre várias famílias de materiais (pelo menos duas, ou mesmo três (material híbrido)) e que responda de forma positiva às mais variadas exigências quer ao nível do seu desempenho mecânico, como térmico, em condições ambientais usuais e adversas (e.g., exposição a ambientes salinos ou atmosferas corrosivas) e que simultaneamente, apresentem durabilidade e permeabilidade adequada (dependendo da aplicação), etc. Contudo, verifica-se que nem sempre é possível alcançar o melhor "casamento" nos MCPRNPs, o que pode induzir a propriedades finais sem alterações significativas, comparativamente com as propriedades iniciais de cada tipo de material, antes da mistura das diferentes fases. A averiguação do sucesso (ou não) da junção das diferentes fases, nas propriedades finais dos MCPRNPs, é realizada com recurso a várias técnicas, por exemplo: XRD, TEM, SEM, OM, TGA,

DSC (ou combinadas TG-DSC/DTA) e FTIR. Somente com uma caracterização adequada é que é possível apurar qual a morfologia das NPs que mais se adequa em cada caso/aplicação, pois como já foi mencionado em trabalhos anteriormente publicados quer pelos autores, quer pela comunidade científica, a região interfacial (RI) existente entre as NPS e as matrizes poliméricas têm elevada influência nas propriedades finais dos MCPRNPs, assim como, os respetivos ciclos de cura adotados, por exemplo. Contudo, existem outras variáveis, não menos importantes, que já foram apuradas e publicadas e que neste trabalho, se compilam com recurso a tabelas síntese, que por motivos de limitação do número de páginas podem ser acedidas via Google Cloud (GC). Apresentam-se também, uma listagem de bases de dados (BD) internacionais ou fontes, a maioria de acesso aberto, que permitem o acesso, a intervalos médios de valores para as propriedades termomecânicas, elétricas, etc… aqui apresentadas e que também podem permitir ajustar com maior precisão, os valores aqui apresentados, em função de cada caso. Finalmente, discutem-se algumas diferenças, apresentam-se conclusões e indica-se um caminho a seguir: uso do "Machine Learning", para auxiliar a previsão das propriedades termomecânicas dos MCPRNPs, por exemplo.

Palavras-chave Compósitos nanoreforçados; Matrizes Poliméricas Termoplásticas; Matrizes Poliméricas Termorígidas; Propriedades Termomecânicas; Base de Dados;

Lista de Siglas

ABS -Acrilonitrila Butadieno Estireno; AFM - Microscopia de Força Atómica; ASTM - American Society for Testing and Materials; ATRP - Polimerização radicalar por transferência atómica; BD - bases de dados; CLAC - consulta realizada na literatura académica e científica; CNTs -Nanotubos de carbono; CPE - Polietileno Clorado; DIN - German Institute for Standardization; DMA - Análise Dinâmico-Mecânica; DSC - Calorimetria de varredura diferencial; EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X; EPP - Polipropileno Expandido; EVOH - Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico; FAA - Federal Aviation Administration; FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier; GC - Google Cloud; IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry; HDPE - Polietileno de Alta Densidade; HIPS - Poliestireno de Alto Impacto; ISO - International Organization for Standardization; LDPE - Polietileno de Baixa Densidade; LLDPE - Polietileno Linear de Baixa Densidade; MCPRNPs - materiais compósitos poliméricos reforçados com nanopartículas; ML - Machine Learning; MPTPRNPs - matrizes poliméricas termoplásticas reforçadas com nanopartículas; MPTRRNPs - matrizes poliméricas termorígidas reforçados com nanopartículas; MO - Microscopia Ótica; NCAMP - Centro Nacional para Desempenho de Materiais Avançados; NIST - National Institute of Standards and Technology; NMR - Ressonância Magnética Nuclear; NPs - Nanopartículas; PA - Nylon; PA11- Poliamida 11; PA12- Poliamida 12; PA66 - Poliamida 6,6; PAR – Poliarilato; PB – Polibutileno; PBT - Polibutileno Tereftalato; PC-Policarbonato; PE - Polietileno; PC/ABS - Policarbonato de Acrylo-Butadieno-Estireno; PEEK - Poliéter-éter-cetona; PET - Polietileno Tereftalato; PES – Polietersulfona; PLA - ácido polilático; PMMA - Polimetilmetacrilato; POM - Polioximetileno (também conhecido como Acetal ou Delrin); PP – Polipropileno; PS - Poliestireno; PVC - Policloreto de Vinila; PTFE – Politetrafluoretileno; PSU – Polissulfona; TPE - Poliéster/ Elastómeros Termoplástico; UHMWPE - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular; PEI – Poliéterimida; PEX - Polietileno de Alta Densidade Reticulado; PHAs – Polihidroxialcanoatos; PVDF - Polivinilideno Fluoreto; RAFT - Polimerização por transferência reversível de cadeia por adição-fragmentação; RI - região interfacial; R – MF – resinas de melamina-formaldeído; R-UF – Resinas de Ureia-Formaldeído; SEM - Microscopia Eletrónica de Varrimento; TG-DTA/DSC - análise térmica simultanea/combinada; Tg - Temperatura de Transição Vítrea; TGA – Análise Termogravimétrica; TG-DSC/DTA - Análise Térmica Combinada; TEM - Microscopia Eletrónica de Transmissão; TXM - Microscopia de Transmissão de Raios-X; UV - ultravioleta; XRD - Difração de Raios-X; XPS - Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios-X.

1.ESTADO DA ARTE

Segundo, a CLAC os termoplásticos são polímeros que podem ser moldados e remoldados várias vezes quando aquecidos, tornando-se maleáveis (podem ser moldados em vários formatos) ou fluidos com a variação da temperatura, endurecendo com a descida da temperatura (arrefecimento). É por esta razão que podem ser reprocessados, isto é, podem ser reciclados e reutilizados várias vezes (ao nível ambiental esta característica é vantajosa). Constituem exemplos de termoplásticos: PE, HDPE, LDPE, PP, EPP, PS, PA, PC, PVC, PC/ABS, ABS, PMMA, PTFE, POM, PET, PA66, PES, PSU, PEEK, LLDPE, HIPS, PA11 e PA12, TPE, UHMWPE, PEI, CPE, PEX, PVDF, PAR, PBT, EVOH, PB, POM, etc. Segundo, a CLAC a, as MPTPRNPs mais utilizadas na fabricação e comercialização de MCPRNPs para a construção civil são (por ordem de maior para menor procura/comercialização): PC, PA, PS, PP, PE e PVC. Em https://storage.cloud.google.com/tabelas_artigo_1413/20240905_Artigo_clbmcs_nanocompositos_resubmetido_s%C3%B3tabelas.pdf (URL autenticado da GC) é possível encontrar as tabelas nºs 1 e 3 que compilam várias propriedades termomecânicas que têm sido estudadas, nas últimas décadas, nos polímeros termoplásticos selecionados, quer no estado puro, quer aquando da incorporação de NPs. Relativamente às NPs, constatou-se através da CLAC que as NPs mais utilizadas na construção civil, no reforço de matrizes poliméricas termoplásticas são (por ordem de maior para menor procura/comercialização): Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$), Sílica (SiO_2), Argilas (Montmorilonita, Caulinita, etc.), Óxido de Titânio (TiO_2), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Óxido de Grafeno(GO) e CNTs (Pinto et al., 2015b) (Pinto et al., 2015a). Esta seleção vai ao encontro da ótima relação entre custo-benefício, facilidade de processamento e melhoria significativa nas propriedades termomecânicas e funcionais dos MCPRNPs para uso na construção civil. Contudo para além das NPs aqui selecionadas, existem também outras, quer metálicas ou cerâmicas, são exemplo: prata (Ag), ouro (Au), Zinco (ZnO), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Dióxido de Cério (CeO_2), Hidroxiapatita (HAp), Nanodiamantes (NDs), Fosfato de Cálcio (CaP), Talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), etc., que conseguem conferir propriedades diferentes das que são mais procuradas na construção civil, nomeadamente: antimicrobianas, antibacterianas, antioxidantes, bioatividade (compatibilidade com tecidos biológicos), etc., que lhes possibilita outro tipo de aplicação: biomateriais(implantes ósseos), protetores solares (cosmética geral), etc. A incorporação das últimas NPs mencionadas é mais usual em biopolímeros, abordados mais adiante de forma sucinta, mas neste momento não são o foco dos autores. Em GC, as tabelas nº3 e 4, mostram as NPs selecionadas versus vantagens, desvantagens e aplicações mais comuns, dos MCPRNPs na construção civil [2][3][4][5][6][7]. É importante realçar que, a incorporação de NPs em matrizes poliméricas de forma eficaz, nos dias de hoje, constituí ainda, um enorme desafio aos investigadores da área, pois faz-se necessário equacionar várias variáveis, sendo as mais exigentes a morfologia das NPs - figura nº1 e a compatibilização das diferentes fases - figura nº2, existentes na mistura de matriz + nanoreforço. O correto é que as junções de ambos deem origem a MCPRNPs, de características superiores às das fases isoladas/individualizadas. No entanto, a qualidade da dispersão das NPs, pode ser uma desvantagem, caso não seja realizada de uma forma eficiente. Para garantir esta eficiência, faz-se necessário recorrer a técnicas minuciosas de funcionalização superficial, de mistura cada vez mais exigentes que melhoram a respetiva compatibilidade e desempenho dos mesmos com as matrizes. Por outro lado, atualmente ainda estão a ser otimizados métodos de mistura e dispersão das NPs nas matrizes (e.g., mistura em solução, mistura em fusão, sonicação (ultrassons)), mostrando bons resultados e progressos, na qualidade da dispersão das NPs nas matrizes. Adicionalmente, têm surgido também processos de fabricação aditiva pela impressão 3D e outras técnicas de fabricação aditiva que têm sido adaptadas na manufatura de MCPRNPs permitindo a execução de peças cada vez mais complexas com propriedades personalizadas (cura via radiação UV), processos de ATRP ou RAFT.

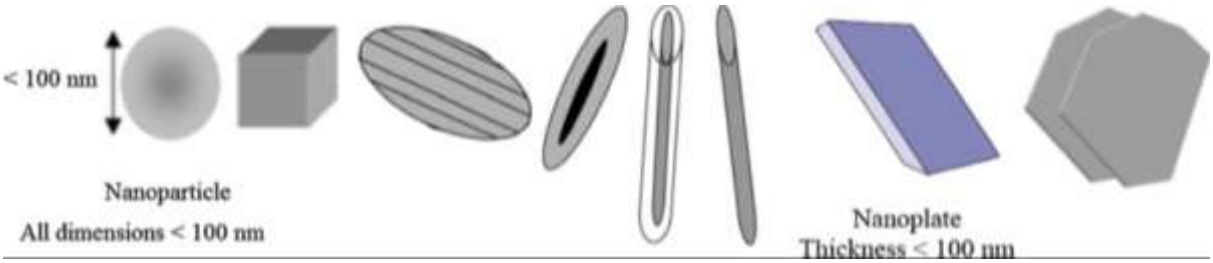


Figura 1 – Exemplos de morfologias diferentes de NPs que usualmente são incorporadas em MPTPRNPs ou MPTRRNPs (adaptado de [8] [9][10][11]) e publicado por [12].

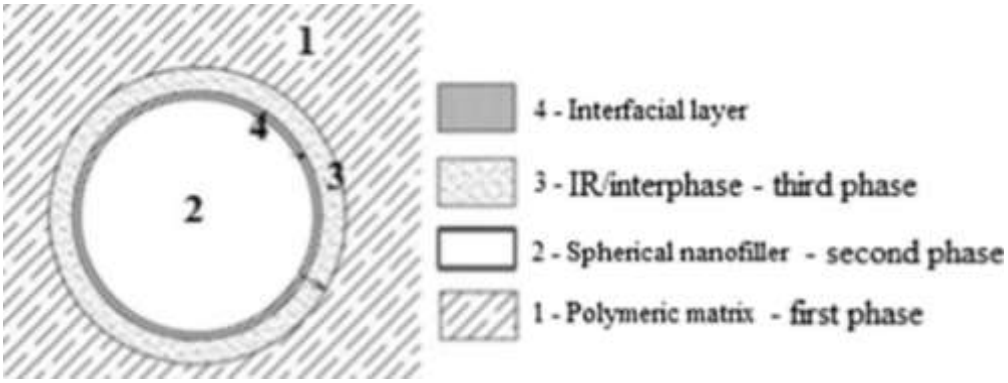


Figura 2 – As diferentes fases contidas numa MPTPRNPs ou MPTRRNPs (adaptado de [13] e publicado por [14].

Note-se que se refere, o GO e não o grafeno, pois pela CLAC constatou-se que este é mais utilizado na manufatura de MCPRNPs para a construção civil, devido à várias razões, realçam-se as seguintes [15] [16] [17] [15] [18][19]: facilidade de dispersão, interação com as matrizes poliméricas, custo, comercialização mais fácil, funcionalização química mais fácil, etc… Logo, o GO é preferido em aplicações de construção civil comparativamente com o grafeno, apesar do grafeno puro oferecer propriedades excecionais de condutividade elétrica, térmica e mecânica, superiores ao GO, mas este é mais caro, difícil de misturar devido à elevada tendência de aglomerar, pois carece de grupos funcionais que facilitem a respetiva dispersão em matrizes poliméricas. Por outro lado, também, se encontra a comparação entre o GO, grafeno e CNTs como nanoreforços utilizados igualmente, na manufatura de MCPRNPs, para fins de materiais de construção, e mais uma vez, o GO fica à frente quer do Grafeno, como dos CNTs. Por estas razões o GO ficou posicionado em penúltimo lugar, na escolha dos autores e os CNTs, em último lugar. O Grafeno puro foi excluído pois apesar de apresentar boas propriedades termomecânicas, apresenta ainda, um uso limitado devido ao elevado custo e dificuldades na manufatura de MCPRNPs. Apesar dos CNTs aparecerem aqui, em último lugar, é importante realçar que oferecem diversas vantagens, nomeadamente: elevada resistência mecânica, condutividade elétrica e térmica, e melhorias na durabilidade dos MCPRNPs. No entanto, a respetiva comercialização e ampla utilização deste tipo de nanoreforço enfrenta ainda vários desafios que os tornam uma escolha "menos acertada" comparativamente com outros nanoreforços devido às seguintes razões: a) Custo Elevado (a respetiva produção ainda é relativamente cara, encarecendo também, o MCPRNPs resultante, o que limita a utilização em projetos de construção civil onde o custo é por vezes um fator eliminatório); b) Dificuldades de Dispersão (conseguir uma dispersão uniforme no uso de nanofillers que podem apresentar vários formatos (figura nº1) e incorporá-los em matrizes polimérica é um grande desafio que necessita de técnicas específicas, assim como também acontece com os CNTs devido à agregação dos mesmos, que pode comprometer as propriedades mecânicas e a

eficácia do MCPRNPs final); c) Compatibilidade com a Matriz (figura nº2, no caso específico dos CNTs torna-se necessário funcionalizá-los para que exista uma transferência eficaz de tensões entre os fillers e a matriz polimérica, melhorando assim a compatibilidade entre as várias fases, mas acarreta complexidade e custo ao processo global); d) Preocupações de Saúde e Segurança (já existem estudos que mostram os possíveis efeitos para a saúde humana no que diz respeito à inalação de CNTs, aquando da respetiva manipulação/obtenção, começando a surgir já legislação ao nível da segurança de modo a restringir o uso extensivo deste nanoreforço). Considerando estas razões, existem nanoreforços alternativos aos CNTs, que também oferecem melhorias significativas nas propriedades finais dos MCPRNPs resultantes e que podem ser economicamente mais viáveis e mais fáceis de manufaturar. No entanto, não podemos esquecer que em aplicações específicas, os CNTs podem ganhar terreno, como por exemplo: em revestimentos de elevada performance, adesivos, materiais de reparação, cimentos reforçados, sensores, materiais estruturais, etc… Adicionalmente, a CLAC refere que apesar do grafeno e dos CNTs compartilharem algumas propriedades e sejam materiais derivados do carbono, apresentam diferenças fundamentais quer, em termos de estrutura: o grafeno é uma folha plana bidimensional (2D) de átomos de carbono dispostos em uma rede hexagonal, com apenas um átomo de espessura. É essencialmente uma camada única de grafite. Já os CNTs são cilindros unidimensionais (1D) formados por uma ou várias camadas de grafeno enroladas em uma forma tubular. Podem ser de parede única (SWCNTs) ou de múltiplas camadas (MWCNTs); propriedades do grafeno: mecânicas, elétricas, térmicas e óticas, já os CNTs apresentam adicionalmente propriedades estruturais e relativamente às aplicações, ambos são usados em várias áreas de investigação e desenvolvimento, mas as formas como são aplicados diferem devido aos fatores mencionados anteriormente. Para além das MPTPRNPs, existem também as MPTRRNPs que se diferenciam das MPTPRNPs pelo fato de serem produzidas a partir de polímeros termorígidos que uma vez curados (ou endurecidos), já não podem ser remoldados, mesmo quando são submetidos à elevadas temperaturas, pois a estrutura tridimensional rígida e infusível não o permite. Para além de serem polímeros mais rígidos são também, mais duros que os termoplásticos, apresentando no geral, maior resistência química e mecânica. São exemplos: resinas (epoxídicas, epóxi novolaca, de poliéster, de poliéster vinil éster, fenólicas (Fenol-Formaldeído), de Ureia-Formaldeído (R-UF), de melamina-formaldeído (R - MF), poliuretano, de silicone, de cianato éster, de poliamida, de poliamida Imida, de benzoxazina, de furanos, de Dicyclopentadieno, de polibenzoxazinas, etc… Segundo, a CLAC, as MPTRRNPs mais utilizadas na fabricação e comercialização de MCPRNPs para a construção civil são (por ordem de maior para menor procura/comercialização): Resina Epóxi, Resina de Poliéster, Poliuretano, Resina Fenólica, R-UF, R-MF e a Resina de Silicone. A tabela nº3 compila várias propriedades que têm sido estudadas, nas últimas décadas, nos polímeros termorígidos selecionados, quer no estado puro, quer aquando da incorporação de NPs. A ordenação das NPs mantém-se semelhante à das MPTPRNPs. Realça-se o fato das propriedades presentes, quer na tabela nº1 ou 3, abrangerem um número significativo de características que têm sido reportadas como sendo importantes, para auxiliar a avaliação da performance de MCPRNPs com foco, na aplicação em materiais de construção civil. Contudo, podem ainda existir outras propriedades que não tenham sido mencionadas/analisadas aqui, mas que sejam igualmente importantes a verificar. A seleção do "melhor grupo" de propriedades a verificar, para MCPRNPs, dependerá da aplicação específica e do contexto do estudo/desenvolvimento para o mesmo. Para além disso e devido à crescente preocupação com a sustentabilidade, também têm surgido avanços na procura da manufatura de MCPRNPs, mas de matriz biodegradável, por exemplo: ácido polilático (PLA) ou polihidroxialcanoatos (PHAs) reforçados com nanocargas verdes/sustentáveis (e.g., nanocelulose, quitosana, etc…), produtos derivados de fontes renováveis que visam reduzir o impacto ambiental. No entanto, os

MCPRNPs executados com matrizes biodegradáveis apresentam ainda, algumas desvantagens/lacunas comparativamente com as MPTPRNPs e as MPTRRNPs, tais como: desempenho mecânico inferior (matrizes como as PLA ou as PHAs, geralmente mostram comportamento mecânico inferior, por exemplo em relação ao PE, PP, resinas epoxídicas e poliuretanos); durabilidade menor (o que pode limitar a respetiva aplicação em ambientes que exigem elevada resistência a longo prazo e em elevados carregamentos mecânicos); estabilidade térmica e hidrolítica inferior (geralmente apresentam valores de Tg e temperatura de decomposição mais baixas, limitando a sua aplicação em ambientes que envolvam temperaturas elevadas); higroscopicidade significativa (são mais suscetíveis à absorção de água), o que pode acarretar uma degradação mais rápida das propriedades mecânicas e também pode ocorrer hidrólise da matriz, bastante comum em ambientes húmidos. As matrizes biopoliméricas também enfrentam os mesmos problemas que as matrizes poliméricas sintéticas, e similarmente faz-se também necessário equacionar várias variáveis, como por exemplo: morfologia das NPs (figura nº1) e a compatibilização das diferentes fases (figura nº2), presentes numa dada mistura de biomatriz + nanoreforço, requerendo a adição de maior quantidade de compatibilizadores ou modificadores de superfície para aumentarem a interação e resistência químicas entre fases, que geralmente são de pior qualidade do que as existentes, nas MPTPRNPs e nas MPTRRNPs. Esta desvantagem pode limitar a eficiência do reforço, assim como, a respetiva resistência a produtos químicos, solventes e outros agentes agressivos, limitando mais uma vez a respetiva aplicabilidade em ambientes industriais exigentes. Adicionalmente, os custos de manufatura são elevados, a processabilidade/manufatura é mais difícil. Embora os biopolímeros estejam cada vez mais acessíveis, ainda são mais dispendiosos que os polímeros convencionais, exigindo condições específicas de temperatura para atingir uma trabalhabilidade adequada ou para evitar a degradação térmico química dos mesmos, o que adiciona mais custos na produção. Logo, comparativamente com as MPTPRNPs e nas MPTRRNPs, as matrizes bio poliméricas reforçadas constituem ainda um enorme desafio para a comunidade técnica. Por estas razões, as MPTPRNPs e as MPTRRNPs ainda são amplamente procuradas, em várias aplicações, nomeadamente em produtos/materiais concebidos para a indústria da construção civil[20][21][22]. Na GC, nas tabelas nº1 e 3, não se apresentam valores de DMA, pois constatou-se através da CLAC que para PC, PA, PS, PP, PE e PVC, esses valores dependem de vários fatores tais como: estrutura, formulação, baixa temperatura de transição vítrea, estrutura molecular e do método adotado na manufatura. Verificou-se que no caso do PC, auferem-se valores acima de 140°C. Já para o caso das Resinas (epoxídicas, poliéster, fenólica, UF, MF e de silicone) assim como para o poliuretano, os respetivos valores médios de DMA mostram elevada rigidez e estabilidade ou estabilidade moderada e boa resistência mecânica. Constatou-se também que, o módulo de elasticidade e módulo de tração apresentam valores muito próximos, pois ambos medem a rigidez do material. Assim como a resistência à flexão e resistência à tração que indicam a capacidade do material de resistir a forças aplicadas, com valores geralmente similares devido às características de deformação das matrizes poliméricas em análise. Por estas razões, nas tabelas nº1 e 3 da GC, estas propriedades aparecem numa só coluna.

2. BASES/PLATAFORMAS/PROJETOS/ASSOCIAÇÕES QUE COMPILAM DADOS DE PROPRIEDADES DE MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS

Da CLAC, concluiu-se que parece não existir em **Portugal** uma BD centralizada que foque as propriedades térmomecânicas de matrizes poliméricas, muito menos de MPTPRNPs ou MPTRRNPs. Contudo, existem sim várias instituições superiores, laboratórios associados e centros de investigação cujos colaboradores/investigadores têm dado a conhecer os desenvolvimentos obtidos através de prestação de serviços, publicações e na gestão de projetos de investigação cujas equipas são multinacionais e multidisciplinares. Não existindo uma BD livre nacional, a única forma de se obter

informações detalhadas e específicas sobre as propriedades dos MCPRNPs é realizar buscas individuais ao nível europeu e internacional, nomeadamente, a **European Structural Integrity Society (ESIS)** que desenvolve, amplia e dissemina o conhecimento adquirido ao nível de integridade estrutural (desempenho mecânico, fadiga, fratura, etc.), mais detalhes em https://www.esis.site/; a ODIN - rede online de dados e informações do centro comum de investigação da Comissão Europeia (JRC) e o site da Comissão Europeia que oferece vários dados online em várias áreas, que permite a seleção de vários critérios/opções numa determinada busca. Em https://odin.jrc.ec.europa.eu/alcor/ por exemplo, o JRC da Comissão Europeia aloja uma BD denominada **MatDB** que revela dados de testes de materiais na área da engenharia, que nos últimos 20 anos tem respondido aos interesses de gestão de dados sobre materiais no setor europeu de investigação em tecnologia energética (refere polímeros também, mas foca a energia nuclear e convencional). Esta BD possibilita a obtenção de relatórios para uma ampla variedade de testes mecânicos, físicos e de corrosão, a diversos materiais. Estava previsto para 2022 que a **MatDB** garantisse dados de valor comercial e intelectual, através da comercialização de versão comercial. Contudo, não foi possível apurar o estado do lançamento desta versão, mas os autores procederam com a solicitação de informações; **Plataforma de Formação ELIXIR** que visa desenvolver uma comunidade de formação que abrange todos os estados-membros do ELIXIR (Portugal está representado pela https://biodata.pt/training). Pretende-se com esta plataforma reforçar os programas internacionais e nacionais de formação, aumentar a capacidade e competência de formação em bioinformática em toda a Europa e capacitar os investigadores para utilizarem os serviços e ferramentas do ELIXIR, da qual podem extrair informações sobre propriedades térmomecânicas de polímeros e também de outros materiais. Mais informações em https://elixir-europe.org/platforms/training; **Conference of European Directors of Roads (CEDR)** que é uma organização de administrações rodoviárias nacionais europeias que fornece informações sobre as propriedades (mecânicas, térmicas e de durabilidade) de materiais utilizados em infraestruturas rodoviárias, incluindo polímeros. Mais informações em https://www.cedr.eu/; **European Union Observatory for Nanomaterials (EUON)** que é um Observatório Europeu de Nanomateriais que fornecia dados/informações sobre propriedades (térmicas, mecânicas, etc.) de nanomateriais utilizados no reforço de matrizes poliméricas. Contudo, atualmente esta BD já não se encontra gerida desde 19 de maio de 2023. Existe sim, a possibilidade futura da **European Chemicals Agency** (ECHA) fazer uma ligação dos dados que foram anteriormente reunidos com a ECHA, mas está em desenvolvimento não existindo a possibilidade de interligar as BD para aceder as propriedades de um determinado nanocompósito, mais informações em https://euon.echa.europa.eu/. Ao **nível internacional** existem também alguns exemplos de diversas fontes onde os profissionais da indústria, engenheiros e investigadores, interessados na área da engenharia dos materiais podem consultar informações detalhadas sobre as propriedades térmomecânicas, incluindo já algumas MPTPRNPs ou MPTRRNPs e que depende das necessidades específicas e do tipo de polímero ou material compósito em análise. Contudo, a dispersão de dados ainda existe e não nos foi possível apurar BD concretas focadas em materiais manufaturados com MPTPRNPs ou MPTRRNPs para aplicação na construção civil e em indústrias similares. Seguidamente listam-se, resumidamente, os exemplos apurados: **MatWeb,** uma BD online que fornece propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e químicas de vários materiais, nomeadamente: polímeros, metais, cerâmicas e compósitos, pode ser consultada em https://www.matweb.com/ . As informações contidas surgem da compilação de informações sobre materiais provenientes de várias fontes, nomeadamente: publicações científicas e técnicas (dados extraídos de artigos científicos publicados, teses, dissertações e dados de conferências internacionais), Especificações de Fabricantes (dados de fichas técnicas e de desempenho específicos de um produto), Normas e Padrões Industriais (normas internacionais e.g., ASTM, ISO, DIN, entre outras), dados extraídos de livros de referência da área da Engenharia dos Materiais, dados de Ensaios e Testes realizados em Laboratórios creditados, etc…Esta BD fornece uma ampla variedade de propriedades de

materiais, incluindo folhas de dados de polímeros termoplásticos e termorígidos (ABS, PA, PC, poliéster, polietileno e PP), metais (alumínio, cobalto, cobre, chumbo, magnésio, níquel, aço, superligas, titânio e ligas de zinco), cerâmicas e semicondutores, fibras, etc… dos quais podemos consultar: propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração e à compressão, dureza, tenacidade à fratura), propriedades térmicas (condutividade térmica, capacidade calorífica específica, coeficiente de expansão térmica, Tg, ponto de fusão), propriedades físicas (densidade, índice de refração, permeabilidade), propriedades elétricas (resistividade elétrica, constante dielétrica, rigidez dielétrica), propriedades óticas (transmitância, absortância, refletância), propriedades químicas (resistência à corrosão, composição química, compatibilidade química). O acesso pode ser ao nível gratuito ou premium. O acesso gratuito já possibilita a consulta de um número significativo de dados, já a versão premium fornece dados e funcionalidades mais avançadas; **Ansys Granta EduPack (anterior CES EduPack)** é um software educacional e de pesquisa desenvolvido pela Granta Design, que inclui uma vasta BD de dados de materiais, um conjunto exclusivo de recursos de ensino que auxilia a academia e otimiza os cursos focados em materiais aplicáveis à engenharia, com foco no design sustentável. Nesta BD é possível aceder às mesmas propriedades que citamos para a MatWeb. A única diferença pode estar nos dados ambientais. O link de acesso é https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack A versão anterior, era da Cambridge Engineering Selector (CES) Edupack também da Granta Design. Já a Ansys Granta é também uma BD gerida pela ASM International Materials Information que pode ser acedida em https://www.asminternational.org/ e que fornece informações detalhadas sobre as mesmas propriedades de materiais já mencionadas anteriormente mas que remete para o ASM Materials Data Book que éconsiderado o maior recurso mundial para o conhecimento dos avanços mais recentes na área dos materiais; **SAE International - Polymer Matrix Composites Database (PMCD),** associação que engloba vários engenheiros e especialistas relacionados nas indústrias aeroespacial, automóvel e de veículos comerciais, que defende a colaboração entre empresas e países focando a diversidade, equidade e inclusão. Para além de ser uma associação também é uma fundação que apoia vários programas (A World In Motion e Collegiate Design Series). É mundialmente reconhecida pelo seu envolvimento nas questões da mobilidade, dando a conhecer os últimos avanços nesta área. Mas também gere uma plataforma utilizada por mais de 750 conselhos, comités e grupos de trabalho para desenvolver padrões técnicos. Estas normas técnicas promovem a segurança, a qualidade e a interoperabilidade e permitem a inovação nos setores aeroespacial, automóvel, de veículos comerciais e de gestão de sistemas. Os dados que oferece são relativos às propriedades termomecânicas de MPTPRNPs ou MPTRRNPs e podem ser consultados em https://standardsworks.sae.org/standards-committees/; **National Center for Advanced Materials Performance (NCAMP)** ou Centro Nacional para Desempenho de Materiais Avançados (NCAMP) em parceria com a Federal Aviation Administration (FAA), que resultou de um programa financiado pela FAA pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisa de Aviação da Universidade Estadual de Wichita, com origem na experiência avançada sobre transportes de aviação gerais (AGATE) da NASA em 1995. O resultado foi uma BD que oferece dados sobre materiais compósitos poliméricos utilizados na indústria aeroespacial, cujas propriedades podem ser visualizadas publicamente e acedidas em: https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Research/ncamp.php; **Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS - University of Cambridge)** da responsabilidade da Universidade de Cambridge e que apresenta uma BD que pretende divulgar as várias iniciativas de investigação e promoção da ciência dos materiais, fornece materiais didáticos sobre as propriedades (mecânicas e térmicas) de diversos materiais, incluindo de polímeros. Pode ser acedida em https://www.doitpoms.ac.uk/index.php; **Thermophysical Properties of Matter Database (TPMD – Purdue University)** da responsabilidade da Universidade de Purdue que disponibiliza vários recursos, nomeadamente: o Thermodex que é um índice de recursos de propriedades físicas e termodinâmicas

de materiais selecionados (Biblioteca de Química Mallet, Universidade do Texas em Austin), dados termodinâmicos provenientes das tabelas térmicas da Web NIST/TRC, tabelas termodinâmicas TRC – Hidrocarbonetos e tabelas termodinâmicas TRC – dos não Hidrocarbonetos, as quais indicam aproximadamente 900000 dados (propriedades críticas, capacidades térmicas, pressões de vapor, etc…) para mais de 7700 compostos; o WebBook de Química do National Institute of Standards and Technology (NIST) que mostra vários dados, quer termofísicos quer termoquímicos, de milhares de compostos, bastando procurar pelo nome, fórmula química, número de registro CAS, peso molecular, estrutura química ou propriedades energéticas e espectrais de iões selecionados; a BD de propriedades termofísicas da matéria (TPMD) contém informações para mais de 5000 materiais com aproximadamente 50000 curvas de dados; o Knovel que fornece dados numéricos e tabulares de mais de 900 manuais e recursos importantes da engenharia dos materiais. Em suma fornece uma vasta gama de dados termofísicos e propriedades térmicas (condutividade térmica, capacidade calorífica, e expansividade térmica, etc…). Pode ser acedida em https://guides.lib.purdue.edu/c.php?g=352618&p=2377703, contudo é possível ainda aceder ao NIST Chemistry WebBook diretamente em https://webbook.nist.gov/chemistry/ que contém uma BD de dados para várias propriedades (térmicas, capacidade calorífica, entalpia de fusão, mecânicas, etc). O NIST ainda tem o Materials Data Repository que oferece acesso a dados experimentais sobre as propriedades termofísicas e mecânicas de materiais, incluindo ligas metálicas, cerâmicas e polímeros. É uma BD aberta à comunidade de investigadores e que pretende desenvolver melhores práticas de gestão de dados de materiais. Atualmente está em estruturação para uma possível expansão em função de várias parcerias entre equipas e projetos. Mais informações podem ser consultadas em https://materialsdata.nist.gov ou https://www.nist.gov/programs-projects/materials-data-repository ou https://www.nist.gov/srm; **NanoMine,** uma plataforma online para prever o genoma de materiais para nanocompósitos poliméricos, construída em função de alguns princípios (localizáveis, acessíveis, interoperáveis e reutilizáveis), permitindo o registo de recursos materiais, preenchendo a lacuna entre os recursos existentes e os utilizadores finais, disponibilizando esses recursos existentes para a comunidade de desenvolvimento de materiais. A estrutura de dados, juntamente com ferramentas de módulo como caracterização de microestrutura e simulação FEA, formam o recurso de dados de nanocompósitos. O desenvolvimento contínuo inclui ferramentas para digitalização, investigação, visualização, caracterização, simulação, etc… mais detalhes podem ser consultados em https://github.com/Duke-MatSci/nanomine ou https://nanomine.northwestern.edu/ ou https://materialsmine.org/nm#; **EEN eNanoMapper** foca a junção de várias interfaces de aplicativos programados para enfrentar desafios de interoperabilidade de dados e de modelos. Utiliza tecnologias semânticas para caracterizar e vincular bases de dados e garante um modelo de dados flexível. Surgiu do projeto eNanoMapper que propõe uma infraestrutura computacional para a gestão de dados toxicológicos de nanomateriais artificiais (ENMs) baseada em padrões abertos, ontologias e um design interoperável para permitir uma abordagem mais eficaz e integrada à investigação europeia em nanotecnologia. Mas como está direcionado para a saúde, não é do interesse dos autores, embora a denominação seja atrativa, mais informações em https://www.enanomapper.net/. Por último e não menos importante encontra-se a **Polymer Database (PoLyInfo),** uma BD gerida pelo National Institute for Materials Science (NIMS) no Japão, de acesso aberto ao público desde abril de 2001. A sua estrutura foi explicada em 2011 [23]. Esta BD fornece os dados necessários para o projeto de materiais poliméricos. A principal fonte de dados é a literatura académica sobre polímeros. Podem ser encontradas informações sobre: tipos de polímeros e respetivas propriedades (aproximadamente 100), estruturas químicas, nomes sob as normas da International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), métodos de processamento das amostras, condições de medição, monómeros usados, métodos de polimerização, etc… Com esta BD tornou-se possível abordar homopolímeros, copolímeros e blendas poliméricas. No entanto, em 2011 [23] foi reportado que não era possível tratar

polímeros ramificados como dendrímeros e polímeros hiper-ramificados, mas que pretendiam elevar a qualidade do dicionário ao nível da variedade de polímeros, modificar o sistema ao nível da adição de mais propriedades, acelerar o motor de busca e melhorar a interface, para a tornar amigável. Na busca realizada constatou-se que a última atualização é de 4 de abril de 2024 e pode ser acedida em https://polymer.nims.go.jp/ e que está associada à **MatNavi** que é um sistema integrado de BD de materiais que compreende dez BD, quatro sistemas de aplicação e o NIMS Structural Datasheet Online. É considerada a maior BD de materiais do mundo, o uso do MatNavi é gratuito, sendo necessário seguir todos os passos que são detalhados em https://mits.nims.go.jp/beginners.html para alcançar um registo com sucesso. Depois da conta estar criada basta aceder em https://diceidm.nims.go.jp/auth/session e explorar a BD. Finalmente, para além das BD citadas, é possível encontrar ao nível europeu projetos aprovados finalizados ou em curso que focam a investigação em MCPRNPs, mas cujos resultados só são conhecidos após serem publicados em revistas reconhecidas da área.

3. DISCUSSÃO DA BUSCA/PESQUISA REALIZADA

A utilização de MPTPRNPs ou MPTRRNPs na manufatura de compósitos ou híbridos para aplicações em materiais de construção civil é ainda uma área de pesquisa em constante crescimento e desenvolvimento. Na GC, as tabelas 2 e 4 mostram algumas aplicações em função das NPs utilizadas no reforço de algumas matrizes poliméricas. Globalmente, devido ao tamanho muito reduzido do tipo de reforços que estes materiais incorporam (escalas nanométricas), estes podem exibir propriedades químicas, físicas, elétricas, mecânicas, etc… únicas comparativamente com os seus similares com reforços em micro ou macro escala, o que as tornam adequados a um número vasto de aplicações. Contudo, o mesmo nanomaterial pode apresentar vários nanoformatos em função das diferenças de tamanho, da forma das NPs constituintes, modificações/tratamentos na superfície das mesmas para fins de aumento da compatibilidade entre fases. Quanto maior a compatibilidade entre fases, melhores serão as propriedades finais do nanocompósito ou nanohíbrido resultante. Podem ser atingidas propriedades mecânicas superiores em comparação com os materiais convencionais, como maior resistência, durabilidade, leveza, resistência térmica, resistência ao fogo, resistência à corrosão, entre outras. Existem já diversos estudos científicos que abordam a fabricação, caracterização e aplicação de MCPRNPs com aplicabilidade construção civil. Nesses estudos, são explorados diferentes tipos de NPs (óxidos metálicos (óxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, CNTs, sílica, argilas, entre outros. No entanto, embora promissores, estes materiais enfrentam ainda desafios em relação à sua viabilidade económica, produção e impacto ambiental. A caracterização deste tipo de materiais exige técnicas avançadas, nomeadamente: TEM, SEM, FTIR, Espectroscopia de Raman, XRD, TG-DSC/DTA, DMA, EDS, AFM, NMR, XPS, TXM, Espectroscopia de Impedância Acústica, entre outras, que permitem uma compreensão detalhada das características dos MCPRNPs, desde a estrutura e morfologia até as propriedades mecânicas e térmicas, contribuindo para o desenvolvimento e otimização de novos materiais com propriedades otimizadas. Só com um conhecimento amplo das diversas propriedades neste documento já citadas é que é possível indicar um determinado MCPRNPs para uma aplicação específica. Com base na CLAC encontraram-se várias aplicações (tabelas 2 e 4 da GC), quer específicas como gerais para as matrizes poliméricas + NPs abordadas neste documento. De uma formal geral, os MCPRNPs são muito utilizados na forma de adesivos, revestimentos, componentes eletrónicos (pois têm propriedades condutoras o que os torna aptos para o campo da eletrónica flexível), sensores, dispositivos de armazenamento de energia. Como apresentam propriedades mecânicas otimizadas ainda podem ser aplicados na indústria aeronáutica e automóvel (com elevada resistência ao impacto e elevada rigidez). Por vezes também podem servir de barreira (por exemplo na utilização em embalagens) ou revestimentos que oferecem uma maior proteção

contra gases, humidade e radiação UV: Finalmente, ainda podem dar origem a materiais compósitos com elevada performance (revestimentos, laminados, isolamentos térmicos e acústicos, selantes, espumas, etc.), que é o foco do trabalho futuro a efetuar pela candidata passando pelo enaltecimento do papel importante das resinas epoxídicas na construção civil que são muito usadas para reforço estrutural, nomeadamente no reforço de vigas e pilares de betão armado com adição de fibra de carbono, pois aumenta a capacidade de carga e a durabilidade destes elementos estruturais. Os revestimentos epoxídicos são comuns em garagens, armazéns e áreas industriais devido à sua durabilidade e resistência a produtos químicos. Por outro lado, as espumas rígidas de poliuretano são amplamente utilizadas para isolamento térmico de paredes e telhados, contribuindo para a eficiência energética dos edifícios. Já as resinas de melamina são formuladas para criarem superfícies duras e resistentes a riscos para aplicação em bancadas de móveis ou em laminados decorativos. Contudo, é sabido que, nem todos os grupos de investigação têm verbas suficientes quer para adquirir as matérias-primas anteriormente citadas, quer para ter acesso aos equipamentos e técnicas mencionadas, o que influencia ou limita a execução de um número significativo de testes em laboratório. Como tal, torna-se necessário simular numericamente, as propriedades dos MCPRNPs de forma a prever o respetivo comportamento antes de avançar para verificações reais em laboratório físico. Nesse sentido, o acesso livre às BD é essencial para os investigadores ou profissionais da área pois tendo já um ponto de partida, as novas formulações são mais fáceis, mais económicas e não podemos esquecer que a nanotecnologia está em rápida expansão e um grande número de produtos de uso diário, comercializados no mercado europeu contém nanomateriais. A nanotecnologia foi identificada pela Comissão Europeia como uma tecnologia facilitadora essencial. Prevê-se que a experiência e o know-how neste domínio desempenharão um papel crucial no futuro crescimento económico da EU e no mundo. Por outro lado, o rápido aumento da utilização de nanomateriais combinados com as suas propriedades específicas levanta questões sobre os seus potenciais efeitos na saúde e no ambiente. Claramente, há uma necessidade de avaliar e gerir adequadamente quaisquer riscos potenciais que estes novos materiais possam ter e, em particular, o impacto da modificação da superfície das NPs e posterior incorporação em matrizes poliméricas.

4. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O conhecimento profundo do mundo dos polímeros é um desafio constante que necessita da assimilação de conhecimentos detalhados na área da Engenharia de Polímeros e não só. A maioria dos profissionais que lidam com este tipo de materiais pertencem, na generalidade, à área dos materiais que é uma área vasta e com muitas variações que ao nível de formas, propriedades, manufaturas que por vezes são híbridas, que no seu todo, tornam a conceção de um determinado material para uma determinada aplicação, num problema sem solução. Para tal, a comunidade quer científica, académica e empresarial é chamada para a respetiva resolução. Contudo, a ciência dos materiais baseia-se no paradigma das propriedades versus estrutura de processamento que para melhor compreensão dos mecanismos inerentes é preciso utilizar conhecimento, acumulado ao longo de décadas, que pode proporcionar manufaturas ricas, ditas “tapeçaria de conhecimento” que são usadas para selecionar e projetar materiais para diversas aplicações. Para que esta tarefa se torne mais célere, os autores são da opinião que não só as BD mencionadas podem auxiliar esta tarefa, como também o recurso ao ML, visto ser uma ferramenta preditiva que permite que um dado projeto de materiais posso avançar mais rápido, permitindo uma heterogeneidade das combinações no espaço de dados/projeto, que é o caso dos MCPRNPs que são complexos, se olharmos para a resolução da compatibilidade entre a RI e entre fases. Para tal, faz-se necessário mais investigação e que os trabalhos resultantes avancem cada vez mais depressa e que ajudem na toma de decisões cada vez mais rigorosas, em função da melhor

combinação de BD diversas e confiáveis que garantam que a informação fornecida é de elevada qualidade e de elevada relevância para uma ampla gama de aplicações, neste caso para uso da construção civil.

Referências Bibliográficas

[1] D. Pinto, L. Bernardo, A. Amaro, and S. Lopes, "Mechanical properties of epoxy nanocomposites using titanium dioxide as reinforcement – A review," *Constr Build Mater*, vol. 95, pp. 506–524, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.124.

[2] K. Gopalakrishnan, B. Birgisson, P. Taylor, and N. O. Attoh-Okine, *Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift*. Springer, 2011.

[3] V. P. Sharma, U. Sharma, M. Chattopadhyay, and V. N. Shukla, "Advance applications of nanomaterials: a review," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 2, pp. 6376–6380, 2018.

[4] Z. V Pisarenko, L. A. Ivanov, and Q. Wang, "Nanotechnology in construction: State of the art and future trends," *Nanotekhnologii v Stroitel'stve*, vol. 12, no. 4, pp. 223–231, 2020.

[5] J. Lee, S. Mahendra, and P. J. J. Alvarez, "Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations," *ACS Nano*, vol. 4, no. 7, pp. 3580–3590, 2010.

[6] B. Bhushan, *Springer handbook of nanotechnology*. Springer, 2017.

[7] W. Jones, A. Gibb, C. Goodier, P. Bust, M. Song, and J. Jin, "Nanomaterials in construction–what is being used, and where?," *Proceedings of the institution of civil engineers-construction materials*, vol. 172, no. 2, pp. 49–62, 2019.

[8] D. M. Marquis, E. Guillaume, and C. Chivas-Joly, "Properties of nanollers in polymer," *Nanocomposites and polymers with analytical methods*, vol. 261, 2011.

[9] S. H. Pezzin, S. C. Amico, L. A. F. Coelho, and M. J. de Andrade, "Nanoreinforcements for nanocomposite materials," *Nanostructured materials for engineering applications*, pp. 119–131, 2011.

[10] J. Wang and R. Pyrz, "Prediction of the overall moduli of layered silicate-reinforced nanocomposites—part I: basic theory and formulas," *Compos Sci Technol*, vol. 64, no. 7–8, pp. 925–934, 2004.

[11] J. Wang and R. Pyrz, "Prediction of the overall moduli of layered silicate-reinforced nanocomposites—part II: analyses," *Compos Sci Technol*, vol. 64, no. 7–8, pp. 935–944, 2004.

[12] L. F. A. Bernardo, A. P. B. M. Amaro, D. G. Pinto, and S. M. R. Lopes, "Modeling and simulation techniques for polymer nanoparticle composites - A review," *Comput Mater Sci*, vol. 118, 2016, doi: 10.1016/j.commatsci.2016.02.025.

[13] L. Bardella, "Mechanical behavior of glass-filled epoxy resins: experiments, homogenization methods for syntactic foams, and applications," 2000.

[14] L. F. A. Bernardo, A. P. B. M. Amaro, D. G. Pinto, and S. M. R. Lopes, "Modeling and simulation techniques for polymer nanoparticle composites – A review," *Comput Mater Sci*, vol. 118, pp. 32–46, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.commatsci.2016.02.025.

[15] M. A. Rafiee, *Graphene-based composite materials*. Rensselaer Polytechnic Institute, 2011.

[16] H. Kim, A. A. Abdala, and C. W. Macosko, "Graphene/polymer nanocomposites," *Macromolecules*, vol. 43, no. 16, pp. 6515–6530, 2010.

[17] M. Moniruzzaman and K. I. Winey, "Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes," *Macromolecules*, vol. 39, no. 16, pp. 5194–5205, 2006.

[18] A. Gupta and S. Silver, "Molecular genetics: silver as a biocide: will resistance become a problem?," *Nat Biotechnol*, vol. 16, no. 10, p. 888, 1998.

[19] T. Hanemann and D. V. Szabó, "Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications," *Materials*, vol. 3, no. 6, pp. 3468–3517, 2010.

[20] S. S. Bari, A. Chatterjee, and S. Mishra, "Biodegradable polymer nanocomposites: An overview," *Polymer Reviews*, vol. 56, no. 2, pp. 287–328, 2016.

[21] C. Bastioli, *Handbook of biodegradable polymers*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2020.

[22] A. Kržan, "Biodegradable polymers and plastics," *Innovative value chain development for sustainable plastics in Central Europe (Plastice)*, vol. 12, pp. 12–29, 2012.

[23] S. Otsuka, I. Kuwajima, J. Hosoya, Y. Xu, and M. Yamazaki, "PoLyInfo: Polymer database for polymeric materials design," in *Proceedings - 2011 International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies, EIDWT 2011*, 2011, pp. 22–29. doi: 10.1109/EIDWT.2011.13.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE COBERTURAS VERDES: REVISÃO DA LITERATURA

Verônica Brandão[a]; Ana Beatriz Leite[a]; Vitor Sousa[b]; Inês Meireles[a]; Marcus Campos[c]; Ana C. Dias[a]

[a]RISCO, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, veronicabrandao@ua.pt, beatrizleite@ua.pt, imeireles@ua.pt, acdias@ua.pt

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, vitor.sousa@tecnico.ulisboa.pt

[c]Universidade Federal de Goiás, Av. Universitária, 1488, Setor Universitário, CEP 74605-220, Goiânia, Goiás, Brasil, marcus_campos@ufg.br

RESUMO

Com o objetivo amplo de aumentar a sustentabilidade dos espaços urbanos, assiste-se a uma crescente tendência de implementação de soluções baseadas na natureza para diminuir o impacto ambiental, social e económico dos espaços urbanos e aumentar a sua resiliência face às alterações climáticas que se têm manifestado um pouco por todo o globo. Entre as soluções baseadas na natureza disponíveis, as coberturas verdes assumem uma posição de destaque, não só pela exponencial implementação da solução que se tem assistido nas mais diversas regiões do globo, mas também pelo significativo número de estudos que foram realizados. Um dos aspetos chave das coberturas verdes, e que tem sido extensivamente estudado, é o seu comportamento hidrológico. Neste contexto, a presente comunicação apresenta uma revisão da literatura relativamente ao comportamento hidrológico de coberturas verdes, procurando identificar os parâmetros que têm uma influência estatisticamente significativa. A pesquisa efetuada permitiu identificar mais de 2000 dados experimentais com informação sobre a taxa de redução do escoamento e a taxa de redução do pico.

Palavras-chave: cobertura verde, desempenho hidrológico, revisão da literatura

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a gestão das águas pluviais é um grande desafio para muitas cidades (Brandão *et al.*, 2017). Relativamente às áreas naturais, os espaços urbanos implicam invariavelmente o aumento das superfícies impermeáveis, tais como coberturas de edifícios, estradas, parques de estacionamento e caminhos pedonais. Esta transformação reduz significativamente a retenção e detenção das águas pluviais o que tem como consequência o aumento do volume e do caudal máximo gerado pelos eventos de precipitação. Tendo em consideração o aumento populacional e a migração das comunidades rurais para as cidades nas últimas décadas e que se prevê manter no futuro, este desafio terá tendência a agravar-se. Adicionalmente, as alterações climáticas estão a originar fenómenos climáticos extremos mais intensos e frequentes um pouco por todo o globo. Este cenário tenderá a sobrecarregar os sistemas de drenagem urbana existentes, que em várias cidades já se revelam inadequados para escoar em segurança os caudais gerados. Assim, em diversos centros urbanos têm vindo a adotar-se abordagens para gerir as águas pluviais que não se cingem apenas ao aumento da capacidade dos sistemas de drenagem. Num contexto mais alargado de aumento de resiliência dos espaços e infraestruturas urbanas, assiste-se a uma tendência para a renaturalização das cidades, sendo as coberturas verdes uma das soluções mais incentivadas e implementadas.

Na maioria das cidades desenvolvidas, 40 a 50% da área impermeável está associada a coberturas (Stovin *et al.*, 2015), consequentemente as coberturas verdes podem contribuir significativamente para melhorar a gestão das águas pluviais em meios urbanos. Uma cobertura verde é um sistema constituído por várias camadas que têm demonstrado uma grande eficácia a reter eficazmente as águas pluviais (Mrowiec *et al.*, 2021). Sob a vegetação, o sistema é, tipicamente, composto pelas seguintes camadas: substrato, camada filtrante, camada drenante, membrana impermeável, camada de isolamento térmico, barreira anti raiz e membrana da cobertura. As coberturas verdes são classificadas em função da intensidade da cobertura vegetal e do uso em cobertura verde intensiva, cobertura verde semi-intensiva e cobertura verde extensiva (FLL, 2018).

A presente comunicação apresenta uma revisão da literatura dos estudos quantitativos referentes ao comportamento hidrológico de coberturas verdes.

2 METODOLOGIA

Na presente revisão da literatura adotou-se uma abordagem cumulativa em duas fases:

- Pesquisa de anteriores revisões da literatura na temática.
- Pesquisa de estudos não incluídos nas revisões anteriores.

Numa primeira fase, pesquisaram-se as revisões da literatura referentes ao desempenho hidrológico de coberturas verdes existentes. O objetivo foi assegurar que a revisão não se limita a repetir contribuições anteriores, mas antes complementa/atualiza essas contribuições. Desta pesquisa destacou-se o estudo Zheng *et al.* (2021) que, para além de ser relativamente recente e apresentar uma revisão extensa dos estudos até à data, sintetiza e estrutura os dados disponíveis nos vários estudos na forma de tabela, o que possibilitou a adoção de uma abordagem cumulativa. Zheng *et al.* (2021) recolheu um total de 75 estudos publicados entre 2005 e 2020, que integram 2375 amostras. Entre esses 75 estudos, 73 estimaram a taxa de redução do escoamento com 1948 amostras e 19 estudos estimaram a taxa de redução do pico com 427 amostras.

A taxa de redução do escoamento (RR) e a taxa de redução do pico (PRR) são estimadas pela Equação 1 e Equação 2, respetivamente, como apresentado por Hakimdavar *et al.* (2014) e Zheng *et al.* (2021).

$$RR = \frac{(P-R)}{P} X100 \qquad \textit{Equação 1}$$

$$PRR = \frac{(I-G_P)}{I} X100 \qquad \textit{Equação 2}$$

em que P representa o volume de precipitação por evento (mm), R refere-se ao escoamento total drenado das coberturas verdes durante o evento (mm), I é a intensidade máxima da precipitação durante o evento (mm/min) e G_P quantifica o pico de descargas provenientes da cobertura verde (mm/min).

Na segunda fase, recorreu-se à base de dados Scopus e utilizaram-se as palavras-chave “green roof”, “ecoroof”, "eco roof", "eco-roof" e "ecological roof". Além disso, foram incluídos termos relevantes para questões hidrológicas, como "hydrologic", "runoff","drainage", "stormwater", "storm water", "flood", "rainwater", "rainfall", "hydraulic", "retention" e "detention", para identificar estudos publicados desde 2020.

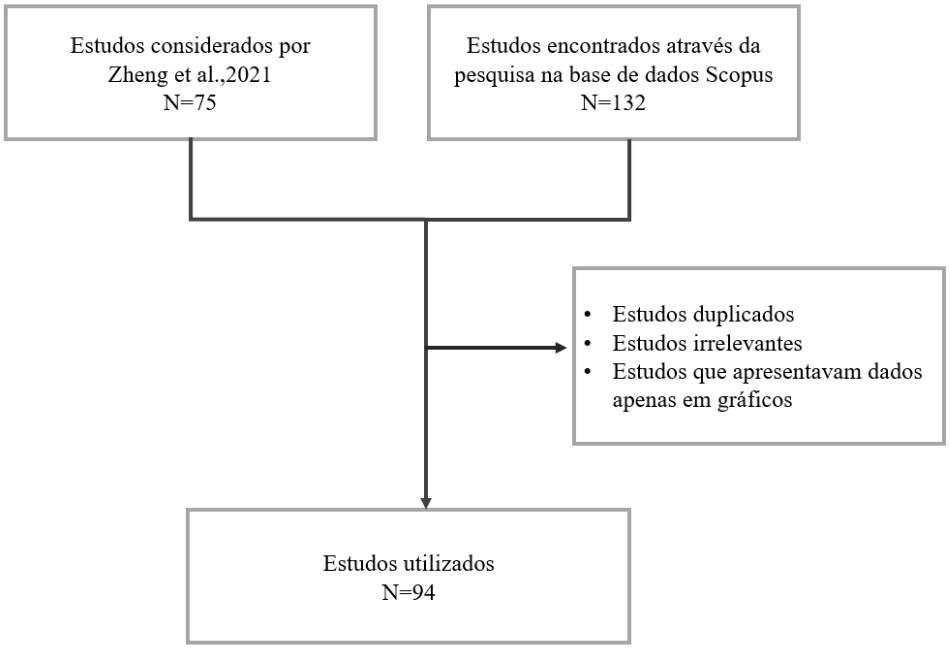


Figura 1 - Fluxograma da seleção da literatura

Na pesquisa efetuada foram identificados 132 artigos. Em seguida realizou-se uma triagem em que foram eliminados os artigos incluídos em Zheng *et al.* (2021) e os estudos que não examinavam a taxa de redução do escoamento ou a taxa de redução do pico. Adicionalmente também foram excluídos os estudos em que eram examinadas essas taxas, mas os dados eram apresentados apenas em formato gráfico. Após a triagem ficaram 19 artigos, dos quais se extraíram resultados de 394 amostras. Entre esses 19 estudos, 16 estimaram a taxa de redução de escoamento com 322 amostras e 7 estudos estimaram a taxa de redução do pico com 86 amostras.

Daqui resultou uma base de dados composta pelos 75 estudos recolhidos por Zheng *et al.* (2021) e os 19 estudos adicionais identificados na pesquisa bibliográfica efetuada, totalizando 2697 amostras da taxa de redução de escoamento e 513 amostras da taxa de redução do pico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresentam-se as distribuições das amostras da taxa de redução do escoamento e da taxa de redução do pico. Em ambos os casos, a maior frequência dos casos situa-se entre os 90% e os 100%. Naturalmente, esta situação também está associada ao facto de os eventos pluviométricos de menor intensidade serem os mais frequentes. No entanto, os resultados indicam que o contributo das coberturas verdes para reduzir o volume de água que aflui aos sistemas de drenagem pode ser significativo. Esta situação pode ser particularmente benéfica nas cidades mais antigas com sistemas de drenagem unitários por minimizar os caudais afluentes às estações de tratamento de águas residuais. Também pode haver benefícios significativos para reduzir as descargas não tratadas para o meio recetor. Já no que concerne à redução do risco de cheias, os benefícios podem ser limitados a situações em que as cheias ocorram por combinação de fatores (*e.g.*, cidades costeiras ou ribeirinhas em que a inundação possa depender da precipitação e do nível da maré) mesmo para volumes de precipitação relativamente baixos.

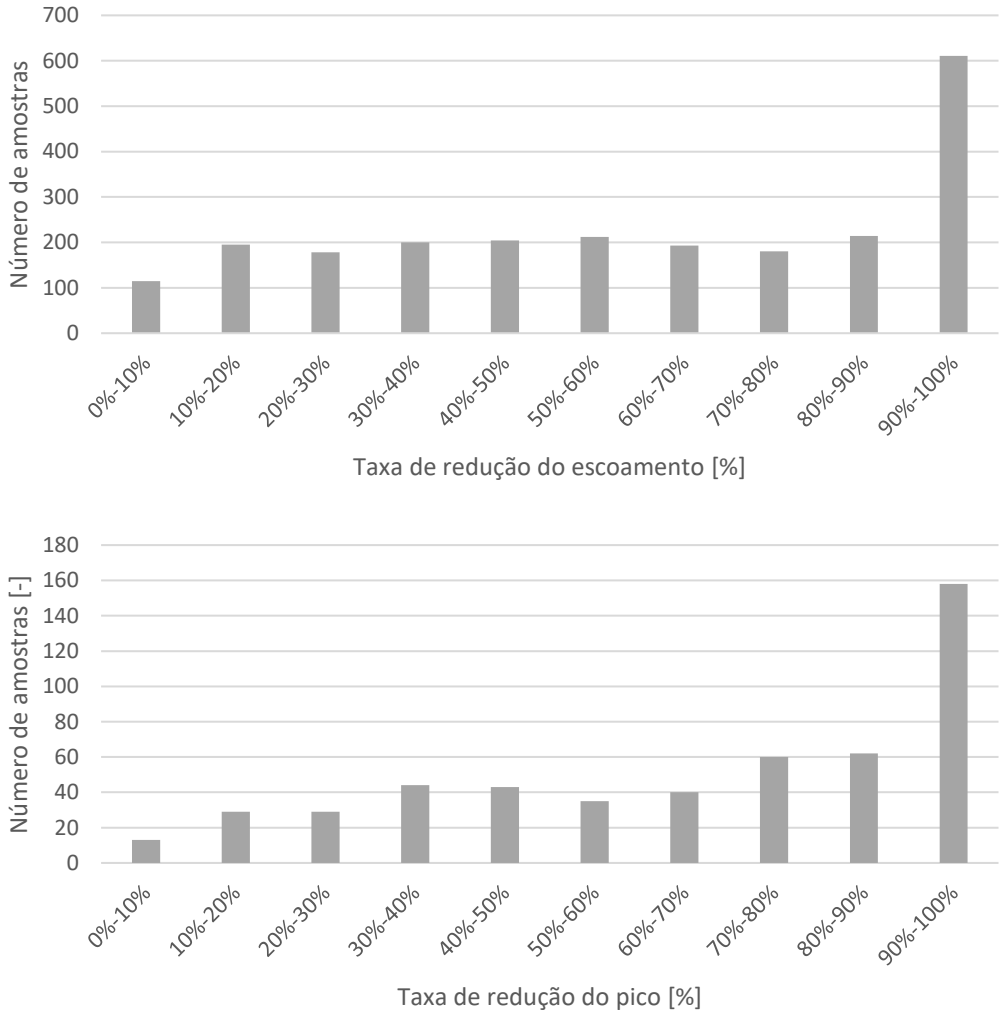


Figura 2 - Distribuição das amostras por taxa de redução do escoamento (em cima) e taxa de redução do pico (em baixo)

A localização das coberturas verdes influencia o seu desempenho relativamente à capacidade de retenção da água da chuva e ao escoamento das águas pluviais (Monteiro *et al.*, 2023). A Figura 3

apresenta a distribuição geográfica dos estudos analisados para a taxa de retenção do escoamento e da taxa de redução do pico, observando-se que a grande maioria dos estudos se realizaram na Europa.

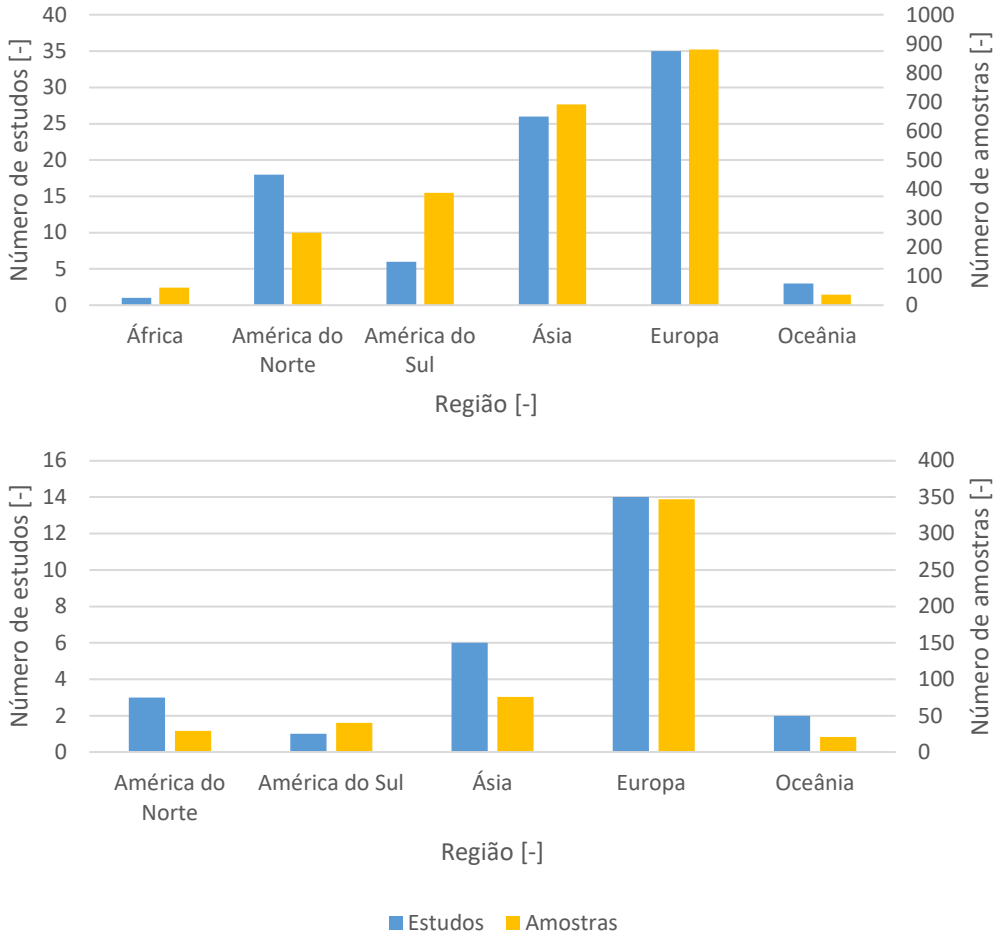


Figura 3- Distribuição dos estudos referentes à taxa de redução do escoamento (em cima) e à taxa de redução do pico (em baixo) por região do globo

No Quadro 1 apresentam-se as estatísticas descritivas referentes à taxa de redução de escoamento e à taxa de redução do pico por região, sendo notório que os valores médios são consistentemente superiores a 50%, com exceção da média da taxa de redução de pico na Ásia que é de apenas 42%.

Quadro 1 – Estatística descritiva do desempenho hidrológico das coberturas verdes por região

Região	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão (%)
Taxa de redução do escoamento				
África	90,46	39,02	100	16,32
América do Norte	69,95	2,80	100	25,58
América do Sul	81,41	3,00	100	24,78
Ásia	55,69	0,00	100	29,93
Europa	51,19	0,00	100	30,45
Oceânia	70,31	22,00	100	22,00

Taxa de redução do pico				
América do Norte	81,42	0,40	100,00	27,96
América do Sul	69,25	20,00	100,00	22,25
Ásia	41,99	0,40	99,70	30,81
Europa	71,18	8,70	100,00	25,96
Oceânia	71,72	16,64	100,00	24,91

Dentro de uma mesma região existem climas muito distintos, sendo que o clima local, em particular os padrões de precipitação e temperatura, tem uma influência substancial no desempenho da cobertura verde (Mrowiec *et al.*, 2021). A Figura 4 apresenta a quantidade de estudos e amostras para cada tipo de clima, da taxa de retenção do escoamento (em cima) e da taxa de redução de pico (em baixo). A classificação de Köppen-Geiger foi utilizada para categorizar o clima (Beck *et al.*, 2018).

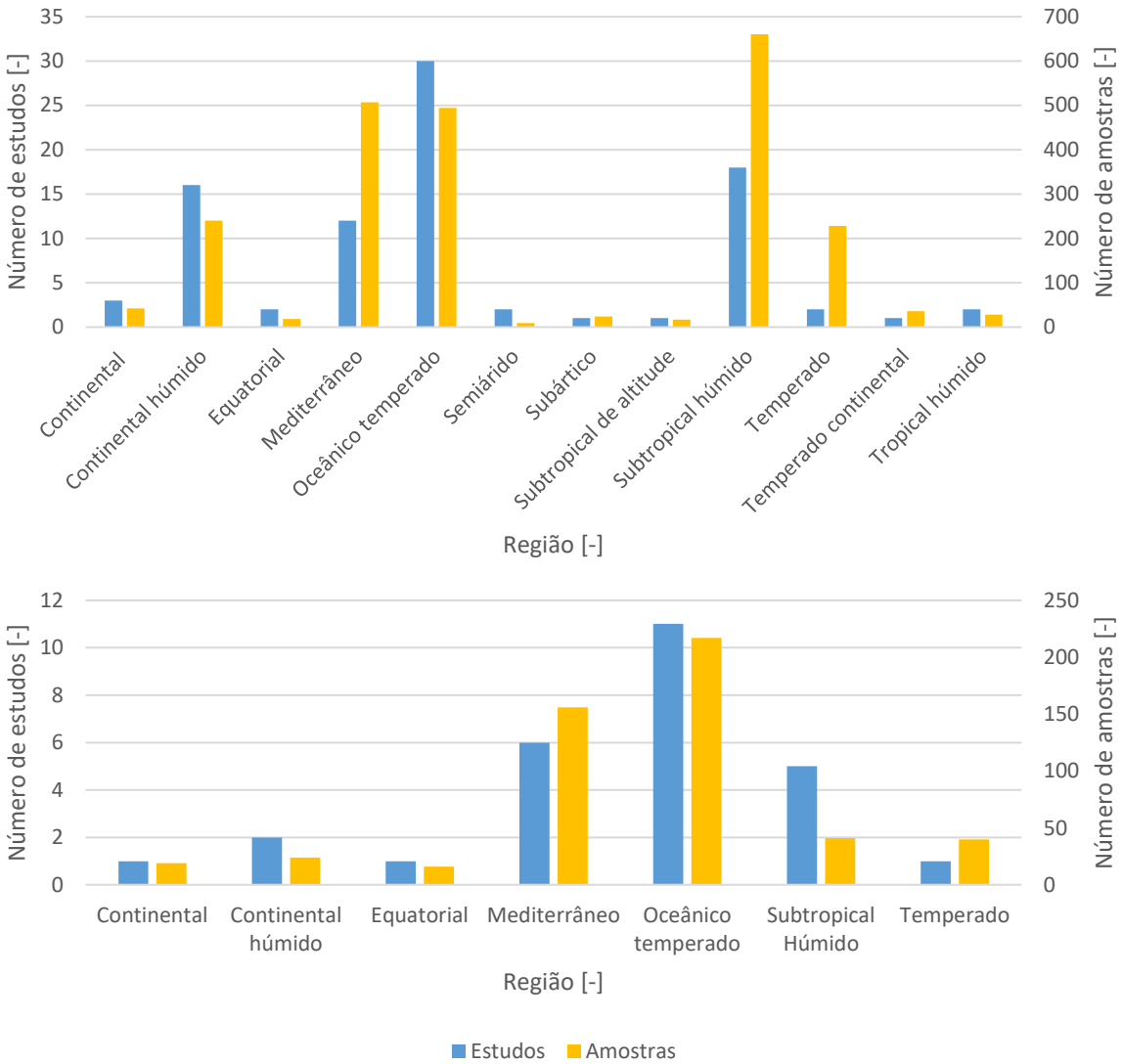


Figura 4 - Distribuição dos estudos referentes à taxa de redução do escoamento (em cima) e à taxa de redução do pico (em baixo) por clima

No Quadro 2 apresentam-se as estatísticas descritivas referentes à taxa de redução de escoamento e à taxa de redução do pico por tipo de clima. Os estudos em climas temperados e equatoriais destacam-se em termos da retenção, apresentando os valores médios mais elevados.

Quadro 2 - Estatística descritiva do desempenho hidrológico das coberturas verdes por tipo de clima

Clima	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão (%)
Taxa de redução do escoamento				
Continental	28,50	5,00	69,00	14,50
Continental húmido	61,49	2,80	100,00	25,74
Equatorial	84,31	33,00	100,00	22,77
Mediterrâneo	54,53	0,10	100,00	31,03
Oceânico temperado	53,01	0,00	100,00	29,35
Semiárido	41,41	14,70	73,80	18,45
Subártico	50,83	6,00	97,00	32,56
Subtropical de altitude	51,69	30,15	68,40	10,85
Subtropical húmido	67,37	0,00	100,00	31,14
Temperado	81,33	3,00	100,00	26,68
Temperado continental	49,03	0,00	98,00	32,06
Tropical húmido	66,85	31,18	95,29	19,64
Taxa de redução do pico				
Continental	13,68	0,40	47,90	12,36
Continental húmido	88,21	29,86	99,95	17,40
Equatorial	39,75	18,00	86,00	19,93
Mediterrâneo	64,66	8,70	100,00	26,39
Oceânico temperado	75,41	0,40	100,00	25,30
Subtropical húmido	55,99	7,70	99,70	31,28
Temperado	69,25	20,00	100,00	22,25

Focando nos estudos em clima mediterrânico, na Figura 5 comparam-se as relações entre a precipitação e o escoamento e a taxa de redução do escoamento dos estudos mais extensos e recentes em Portugal e Itália. É possível constatar que o padrão de resposta das coberturas verdes, em ambos os locais, é semelhante. No entanto, analisandos os dados em termos da taxa de redução do escoamento, as diferenças tornam-se mais evidentes.

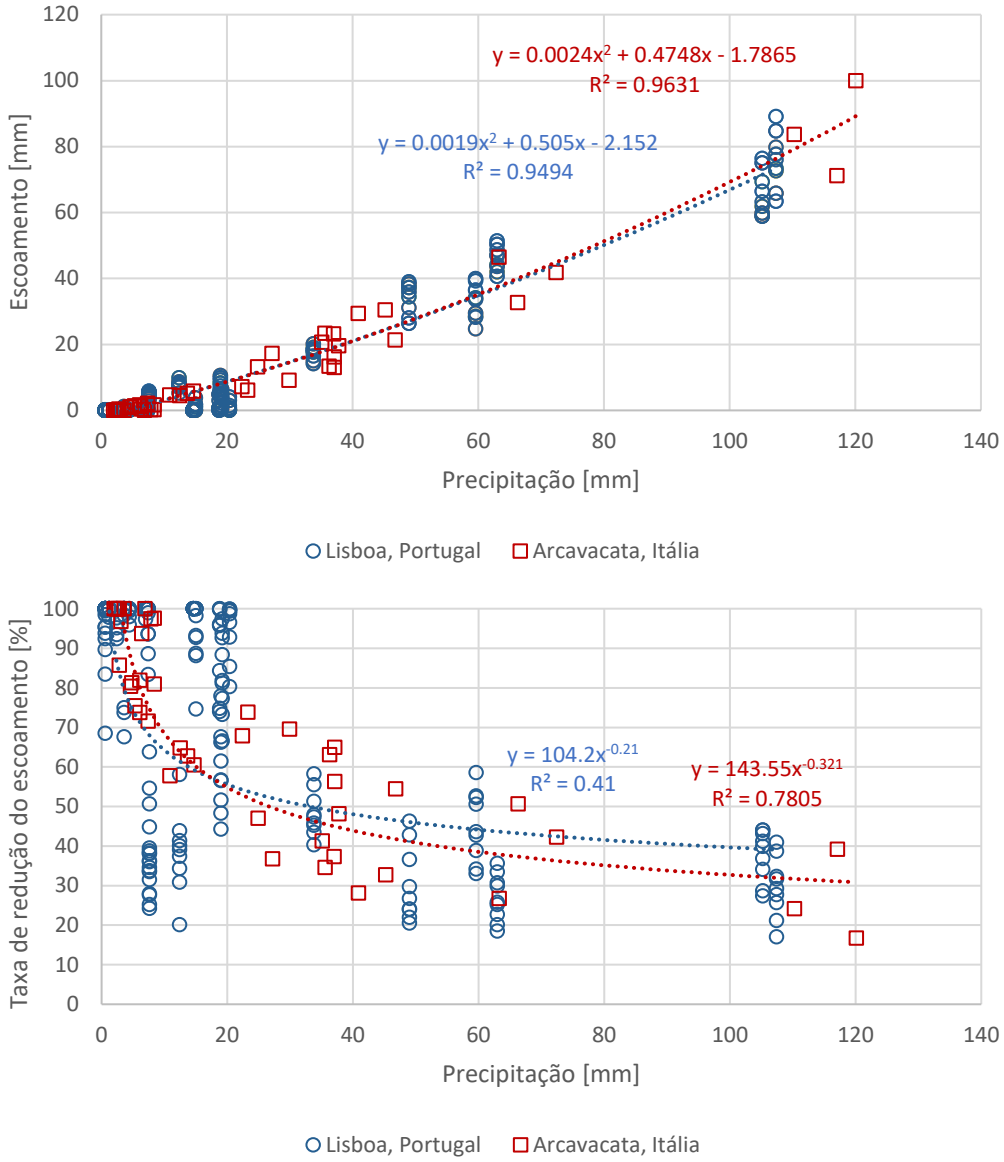


Figura 5 - Relação entre a precipitação e o escoamento (em cima) e entre a precipitação e a taxa de redução do escoamento (em baixo)

4 CONCLUSÕES

A recolha bibliográfica efetuada revela a existência de um vasto leque de estudos subordinados à temática do desempenho hidrológico das coberturas verdes. Contudo, os estudos em Portugal são limitados, não só em termos de número, como em termos de âmbito. Na prática, não foi identificado qualquer estudo especificamente em Portugal com informação relativa ao desempenho hidrológico de coberturas verdes em forma de tabela à escala do evento de precipitação.

As análises apresentadas devem ser indicativas do potencial, mas o desempenho específico de cada cobertura em específico é variável dependendo, entre outros aspetos, das características da cobertura, das condições antecedentes aos eventos de precipitação e de cada evento de precipitação em particular. Mesmo dentro da mesma região climática, comparando medições em coberturas verdes

em Portugal (Lisboa) e Itália (Arcavacata) é possível verificar diferenças, especialmente utilizando indicadores como a taxa de redução do escoamento.

As coberturas verdes permitem reduzir a quantidade de águas pluviais que entram no sistema de drenagem através da retenção e detenção nas várias camadas (Monteiro *et al.*, 2023). Porém, as coberturas verdes têm um leque mais alargado de benefícios, tanto ao nível dos edifícios, como seja o aumento do conforto térmico e da insonorização, a valorização financeira e estética, como ao nível da cidade, como seja a atenuação do efeito de ilha de calor, a redução do ruído, a melhoria da qualidade do ar ou a contribuição para o aumento da biodiversidade (Brandão *et al.*, 2017).

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi desenvolvida no âmbito do projeto GREENER (Iniciativa Bilateral nº FBR_OC2_80), financiado pelas EEA Grants.

REFERÊNCIAS

Brandão 2017, C., Cameira, M. do R., Valente, F., Cruz de Carvalho, R., & Paço, T. A. (2017). Wet season hydrological performance of green roofs using native species under Mediterranean climate. Ecological Engineering, 102, 596–611. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.025

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, 5. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. Ecological Engineering, 73, 494–508. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080

FLL. (2008). "*Green Roof Guidelines* - Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing." Forschungsge-sellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn, Germany.

Dvorak, B. (2011). Comparative analysis of green roof guidelines and standards in Europe and north America. Journal of Green Building, 6, 170-191. https://doi.org/10.3992/jgb.6.2.170

Monteiro, C. M., Santos, C., & Castro, P. M. L. (2023). Extensive Green Roofs: Different Time Approaches to Runoff Coefficient Determination. Water, 15, 10. https://doi.org/10.3390/w15101852

Mrowiec, M., Ociepa, E., & Deska, I. (2021). Role of Extensive Green Roofs in Water Management in Urban Drainage Systems. International Journal of Conservation Science, 12, 701–712.

Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., & Berretta, C. (2015). The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. Ecological Engineering, 85, 159–172. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076

Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W., Wang, C., & Wang, R. (2021). Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. Resources, Conservation and Recycling, 170. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE COBERTURAS VERDES: CASO DE ESTUDO EM TRONDHEIM, NORUEGA

Vitor Sousa[a]; Inês Meireles[b]; Verônica Brandão[b]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, vitor.sousa@tecnico.ulisboa.pt

[b]RISCO, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, imeireles@ua.pt, veronicabrandao@ua.pt

RESUMO

As coberturas verdes são uma das soluções baseadas na natureza mais implementadas e estudadas a nível mundial, devido às inúmeras vantagens que se apresentam tanto ao nível dos edifícios como da cidade. Um aspeto principal é o seu comportamento hidrológico. Neste contexto, a presente comunicação pretende contribuir para o conhecimento nesta temática.

No âmbito do projeto KLIMA 2050, foi montada uma instalação piloto na estação de tratamento de águas residuais de Høvringen composta por três áreas de teste, cada uma com uma área de 8x11 m e também uma estação meteorológica. Entre as várias soluções de revestimento da cobertura, foram testadas diferentes soluções de cobertura verde.

No âmbito do projeto GREENER, procedeu-se à análise dos dados de uma das configurações de cobertura verde testada entre junho de 2018 e setembro de 2021. O período de monitorização totaliza 996 dias, durante os quais foram registados 127 eventos de precipitação. Destes, 43 não produziram escoamento, 31 dos quais durante períodos com temperatura ambiente superior a 0ºC. Relativamente aos eventos que geraram escoamento, 36 resultaram em coeficientes de escoamento superiores a 1, o que é explicado pelo efeito do degelo e experiências de precipitação forçada com irrigação que tiveram lugar na cobertura.

Palavras-chave:

cobertura verde, desempenho hidrológico, Noruega

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, aliado a uma crescente acumulação dos indivíduos em aglomerados urbanos, tem exacerbado os impactos dos espaços urbanos a diversos níveis (*e.g.*, ambientais, sociais), em especial das grandes metrópoles. A importância desta questão é tal que as Nações Unidas definiram como um dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável a promoção de "cidades e comunidades sustentáveis".

Neste contexto, as soluções baseadas na natureza estão a ser cada vez mais adotadas para melhorar a sustentabilidade dos espaços urbanos. Entre estas, as coberturas verdes são das mais utilizadas devido aos seus múltiplos benefícios, tanto ao nível do edifício (*e.g.*, desempenho acústico e térmico; valorização imobiliária) como ao nível da cidade (*e.g.*, retenção e detenção de águas pluviais; redução de ruído; melhoria da qualidade do ar; minimização do efeito de ilha de calor) conforme apresentado por Sanchez e Reames (2019) e Zheng *et al.* (2021), entre outros.

Independentemente do leque muito vasto de benefícios associados às coberturas verdes, na prática, o seu potencial contributo para a gestão do ciclo urbano da água, em particular no que concerne a mitigação dos caudais pluviais afluentes às redes de drenagem públicas, tem sido o grande impulsionador para a sua utilização. No entanto, é possível encontrar exemplos em que o objetivo primordial é distinto, como por exemplo Antuérpia e Tóquio (redução do efeito de ilha de calor) ou Linz (aumento de espaços verdes). Em Basel foram estabelecidos requisitos específicos para a vegetação a instalar com intuito de, para além do contributo para a gestão do ciclo urbano da água, as coberturas verdes contribuírem mais ativamente para o aumento da biodiversidade.

Na Europa, os países que há mais tempo e mais ativamente promovem o uso de coberturas verdes de forma generalizada (*e.g.*, Alemanha, Bélgica, Países Baixos, Suíça) têm-no feito através da combinação de diversos incentivos associados à gestão das águas pluviais em espaço urbano. Estes incentivos são disponibilizados pelos municípios, primordialmente, e/ou pelas entidades gestoras dos sistemas urbanos de drenagem e traduzem-se, maioritariamente, em financiamento direto à instalação das coberturas verdes e/ou descontos nas taxas de descarga de águas pluviais. O direito aos incentivos está invariavelmente associado a volumes de retenção mínimos e, por vezes, o montante do incentivo aumenta com a capacidade de retenção. Existem ainda exemplos (*e.g.*, Antuérpia, Zurique, Copenhaga, Estugarda, Berlim, Munique, Linz) em que a instalação de coberturas verdes já é obrigatória em edifícios novos. Recentemente, França tornou obrigatória a instalação de coberturas verdes ou painéis fotovoltaicos na construção, expansão ou renovação profunda de edifícios comerciais e parques de estacionamento com área de cobertura superior a 500 m^2 e edifícios de escritórios com área de cobertura superior a 1000 m^2.

A retenção (e detenção) de águas pluviais em coberturas verdes tem sido investigada em diversos estudos por todo o globo (*e.g.*, ver a revisão da literatura de Zheng *et al.* 2021). Tal justifica-se pelo facto de, apesar das características específicas das coberturas verdes terem alguma influência, em especial a espessura, a dispersão de resultados do desempenho hidrológico das coberturas verdes decorrer em grande medida das características climáticas específicas de cada região. O comportamento hidrológico das coberturas verdes depende naturalmente do volume total de precipitação e se ocorre na forma de chuva ou neve, mas a sua distribuição temporal é também um aspeto fundamental. Coberturas verdes em regiões caracterizadas por eventos de precipitação concentrados no tempo e durante a época fria (*e.g.*, Portugal) terão menores retenções do que coberturas verdes em regiões caracterizadas por eventos mais dispersos no tempo (*e.g.*, Inglaterra) e/ou mais concentrados na época fria (*e.g.*, Alemanha).

Apesar da quantidade de estudos já existentes sobre o comportamento hidrológico das coberturas verdes, constata-se que:

- Há vários climas para os quais os estudos existentes são limitados (e.g., ver Zheng *et al.* 2021 para identificar as regiões mais e menos estudadas).
- Não existe ainda nenhum modelo generalizável que não exija parametrização e dados para calibração que, na maioria dos casos, são inexistentes (e.g., em Mantilla *et al.* 2023 é possível avaliar a quantidade de parâmetros que é necessário definir).
- A grande maioria dos estudos apresenta os resultados de forma gráfica ou agregada (*e.g.*, ver Harper *et al.* 2015 como um de muitos exemplos).

Neste contexto, não só há necessidade de realizar estudos em regiões menos exploradas, como uma grande percentagem dos estudos existentes tem pouca ou nenhuma utilidade do ponto de vista prático dada a forma como os resultados são disponibilizados.

A presente comunicação analisa parte dos dados de monitorização de uma cobertura verde instalada em Trondheim, na Noruega, disponibilizados no âmbito do projeto KLIMA 2050. O objetivo foi desenvolver funções simples que permitam obter uma aproximação da retenção da cobertura verde a partir de informação usualmente disponível de forma gratuita a partir dos serviços de meteorologia (*e.g.*, precipitação, temperatura).

2 CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

No âmbito do projeto KLIMA 2050, foi montada uma instalação piloto na estação de tratamento de águas residuais de Høvringen (Figura 1) composta por três zonas de teste, cada uma com uma área de 8x11 m. Para além da medição do escoamento em cada zona de teste, também foi instalada uma estação meteorológica para monitorizar a precipitação e a temperatura especificamente no local. Entre as várias soluções de revestimento da cobertura, foram testadas diferentes soluções de cobertura verde.

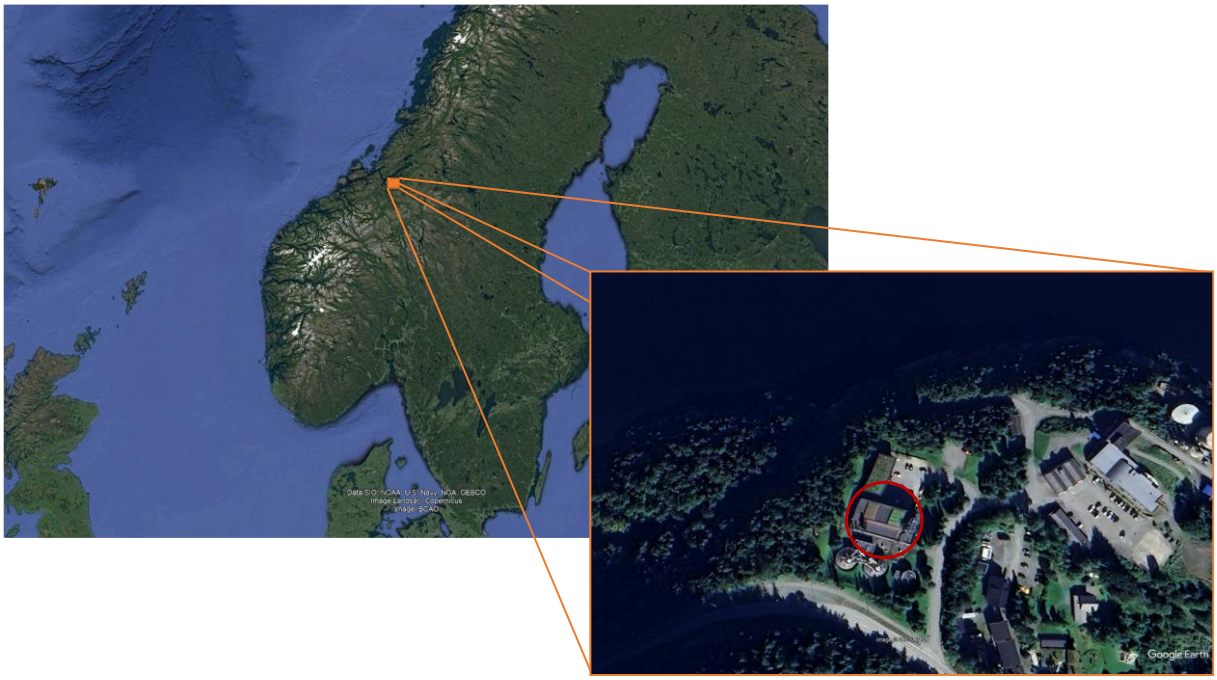


Figura 1 – Localização da cobertura verde analisada.

Mais informações sobre a instalação piloto podem ser consultadas em Hamouz (2020). Foram também publicados diversos estudos sobre o comportamento hidrológicos da instalação piloto, incluindo Hamouz *et al.* (2018, 2020) e Hamouz e Muthanna (2020).

No âmbito da presente comunicação, procedeu-se à análise dos dados de uma das configurações de cobertura verde testada entre junho de 2018 e setembro de 2021. A metodologia adotada está esquematizada na Figura 2.

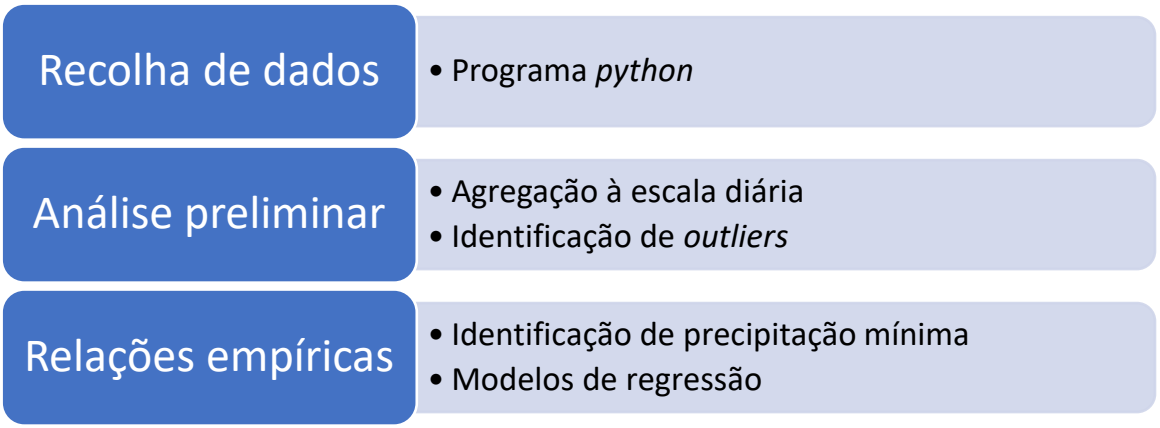


Figura 2 – Metodologia adotada.

Para a recolha dos dados de monitorização da instalação piloto foi desenvolvido um programa em *python* para extrair automaticamente os dados do site do projeto. A análise preliminar dos dados agregou os dados à escala diária, visto ser a resolução temporal em que os dados meteorológicos oficiais estão usualmente disponíveis. Foram também definidos os eventos de precipitação independentes, admitindo que tal acontece sempre que ocorre um período mínimo de 24 horas sem precipitação. As situações anómalas (coeficiente de escoamento superior a 1) foram excluídas da base de dados. Estas situações anómalas podem resultar de erros de medição, mas na sua maioria estão associadas ao degelo da neve acumulada na cobertura e a experiências de simulação de precipitação através do sistema de rega instalado. Por fim, desenvolveram-se relações empíricas simples entre os dados climáticos e o escoamento, após identificar o volume mínimo de precipitação para a ocorrência de escoamento. Foram desenvolvidos modelos para estimar diretamente o escoamento e para estimar o coeficiente de escoamento (escoamento/precipitação).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O período de monitorização totaliza 996 dias, durante os quais foram registados 127 eventos de precipitação. Destes, 43 não produziram escoamento, 31 dos quais durante períodos com temperatura ambiente superior a 0ºC. Relativamente aos 84 eventos que geraram escoamento, 37 resultaram em coeficientes de escoamento superiores a 1. Dos 47 eventos que geraram escoamento com coeficiente de escoamento inferior a 1, 10 ocorreram em períodos com dias com temperaturas negativas. Nestes casos observaram-se coeficientes de escoamento substancialmente inferiores aos registados em períodos sem dias com temperaturas negativas, indiciando que parte da precipitação pode ter ocorrido sob a forma de neve e não ter gerado escoamento durante o evento. Consequentemente, a amostra analisada compreendeu 68 eventos sem influência da neve, 31 que não geraram escoamento e 37 que geraram escoamento.

Excluindo os eventos em que a precipitação ocorreu na forma de neve, todos os eventos que não originaram escoamento correspondem a precipitações inferiores a 1 mm, exceto 1 caso.

Adicionalmente, nos eventos que geraram escoamento tal ocorreu, na maioria dos casos, para precipitações acumuladas inferiores a 1.5 mm. No primeiro caso não se observa nenhum padrão específico, o que era expectável na medida em que não existe precipitação suficiente para gerar escoamento (Figura 3 à esquerda). No segundo caso, observa-se que a quantidade mínima de precipitação necessária para o escoamento se iniciar aumenta com a temperatura média do ar nos dias desde o evento de precipitação anterior (Figura 3 à direita).

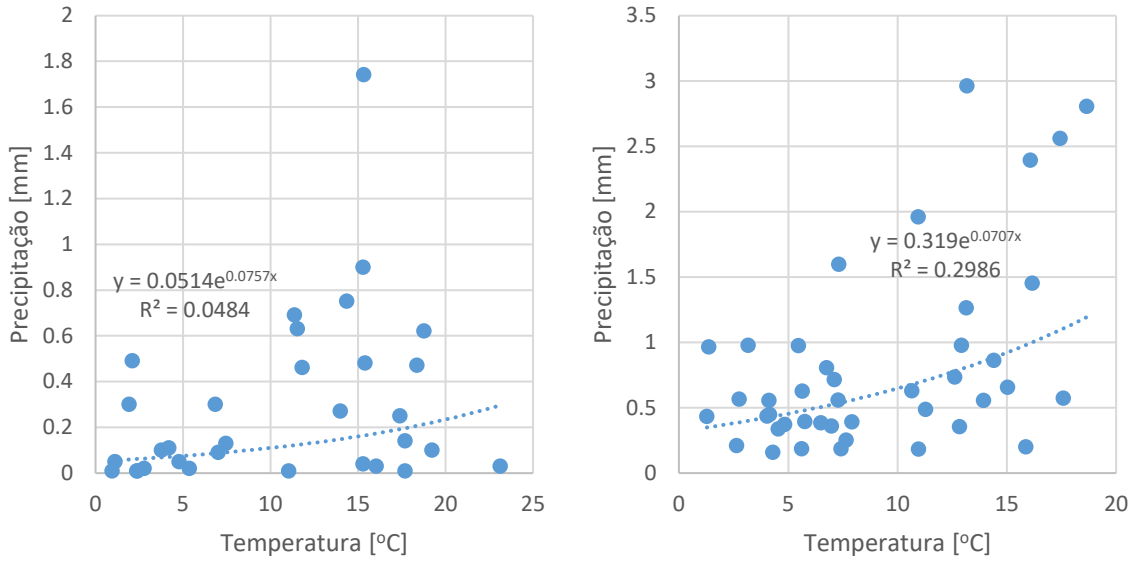


Figura 3 – Relação entre temperatura e precipitação antecedente ao início do escoamento para eventos que não geraram escoamento (esquerda) e que geraram escoamento (direita).

Verificaram-se 15 eventos com precipitação inferior a 1.2 mm a gerarem escoamento (Figura 4 à esquerda) contra 31 que não geraram escoamento (Figura 3 à esquerda). Em termos estatísticos, isto implica que a probabilidade de os eventos de precipitação inferiores a 1.2 mm gerarem escoamento é de apenas 33%. Considerando também o início do escoamento dos eventos superiores a 1.2 mm (Figura 3 à direita), houve escoamento para precipitação acumulada superior a 1.2 mm em 34 eventos para um total de 68 eventos, o que corresponde a uma probabilidade de haver escoamento de 50%.

Constata-se que em apenas 8 eventos a precipitação acumulada antes do início do escoamento foi superior a 1.2 mm e apenas 1 evento que não gerou escoamento tinha uma precipitação superior a 1.2 mm. Assim sendo, foram desenvolvidos modelos distintos para eventos de precipitação abaixo e acima de 1.2 mm. Na Figura 4, apresentam-se os modelos desenvolvidos para estimar diretamente o escoamento e, na Figura 5, os modelos desenvolvidos para estimar o coeficiente de escoamento.

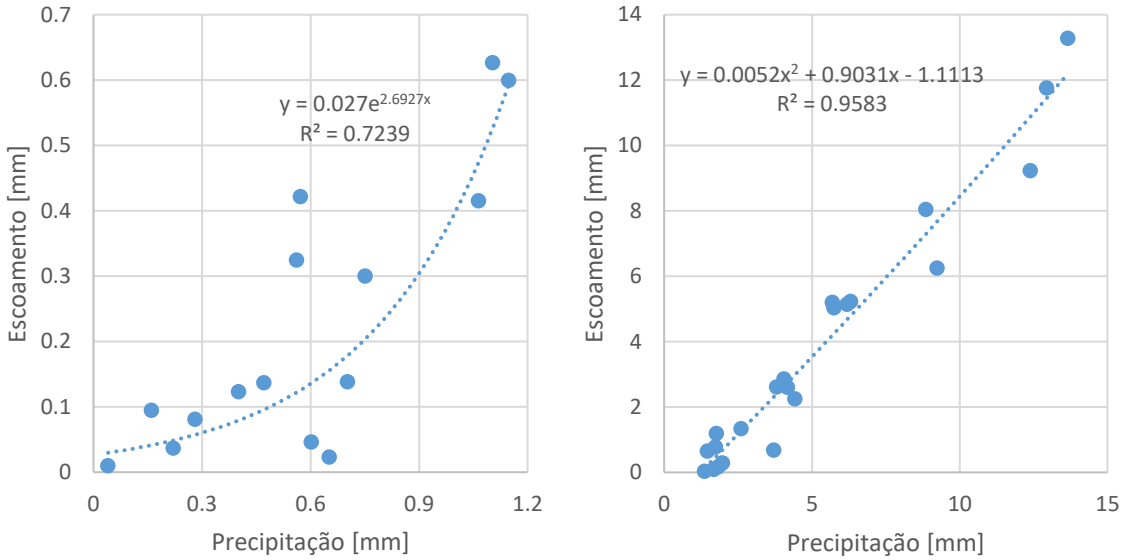


Figura 4 – Modelos de previsão do escoamento para precipitações inferiores (esquerda) e superiores (direita) a 1.2 mm

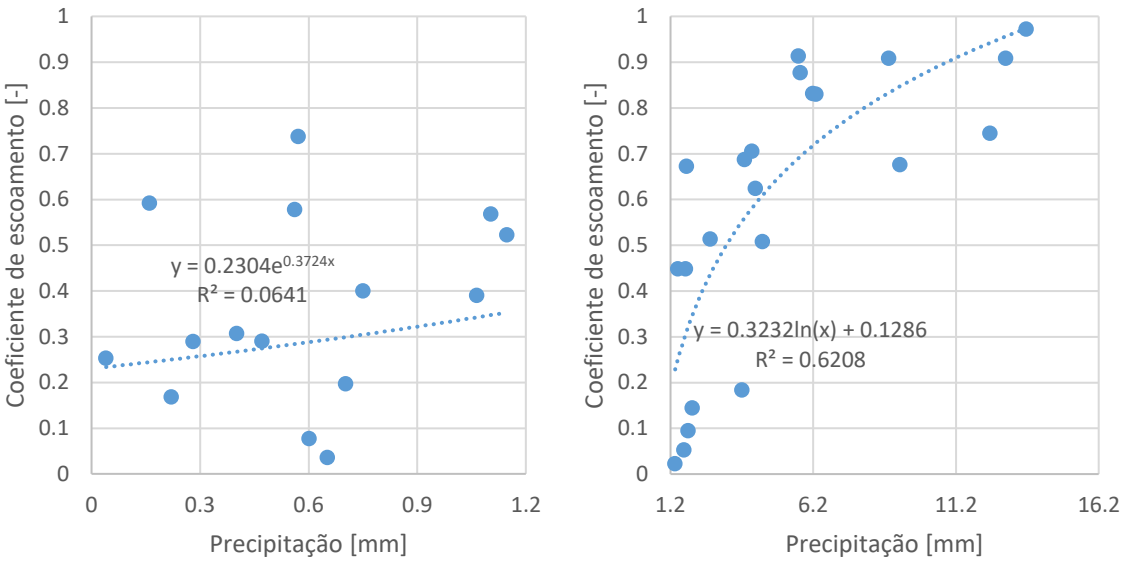


Figura 5 – Modelos de previsão do coeficiente de escoamento para precipitações inferiores (esquerda) e superiores (direita) a 1.2 mm

Para eventos de precipitação superiores a 1.2 mm é notória a existência de uma relação estatisticamente significativa quer entre a precipitação e o escoamento, quer entre a precipitação e o coeficiente de escoamento. Já para eventos de precipitação inferiores a 1.2 mm observa-se grande dispersão nos resultados do coeficiente do escoamento, o que obriga a alguma cautela na utilização do modelo de previsão correspondente. Os limites de aplicação do modelo da Figura 4 à direita correspondem a precipitações entre 1.22 mm e 26.70 mm. Para precipitações abaixo de 1.22 mm a aplicação do modelo resulta em valores do escoamento negativos, sem significado físico. Em contrapartida, o modelo estima valores de escoamento superiores à precipitação para eventos acima

de 26.7 mm, pelo que acima deste valor de precipitação o valor do escoamento deve ser considerado igual ao da precipitação. Já o modelo da Figura 5 à direita deve ser utilizado para precipitações entre 1.2 mm e 14.9 mm, já que acima de 14.9 mm devolve valores do coeficiente de escoamento superiores a 1. Acima desse valor de precipitação, o coeficiente de escoamento deve ser considerado igual à unidade. Por fim, dada a descontinuidade entre modelos, para precipitações próximas de 1.2 mm deve ser considerada a gama de valores obtida pela aplicação simultânea dos modelos para precipitações abaixo e acima de 1.2 mm. De facto, a utilização simultânea dos modelos permite prever que, para precipitações próximas de 1.2 mm, o escoamento resultará em valores entre 0 e 0.7 mm e o coeficiente de escoamento rondará 0.2 – 0.4.

A aparente diferença de capacidade preditiva dos modelos decorre apenas da escala da grandeza modelada. Na Figura 6 apresentam-se os valores de escoamento observados e previstos com ambos os modelos, sendo que o coeficiente de correlação de *Pearson* em ambos os casos é de 0.98. Consequentemente, a escolha de um modelo em detrimento do outro é acima de tudo uma questão de limites de aplicabilidade, sendo o modelo do coeficiente de escoamento mais conservativo do ponto de vista da estimativa da capacidade das coberturas verdes reterem água, visto que o escoamento atinge o valor da precipitação para eventos de precipitação menores.

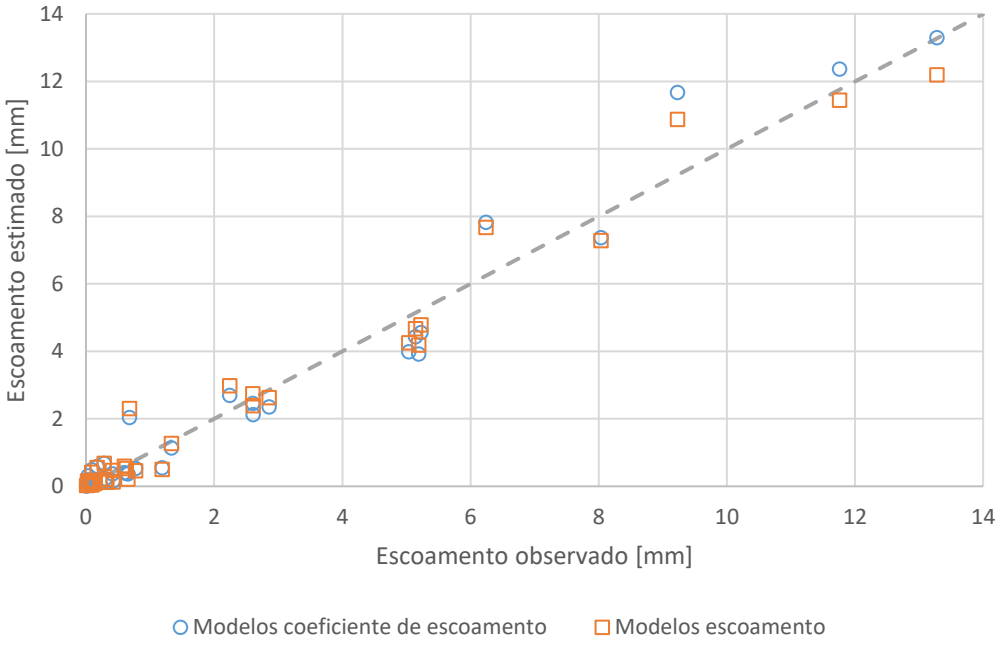


Figura 6 – Escoamento observado e previsto com os modelos desenvolvidos

4 CONCLUSÕES

As coberturas verdes têm sido extensivamente estudadas ao longo das últimas décadas devido aos múltiplos benefícios que podem trazer aos meios urbanos. Entre os benefícios das coberturas verdes, destaca-se o contributo para uma gestão mais sustentável do ciclo urbano da água, o que explica os variados estudos relativos ao seu comportamento hidrológico.

No entanto, apesar da influência das características das coberturas verdes para o seu comportamento hidrológico, o clima específico de cada região, em especial o padrão de precipitação, assume um papel determinante. Como tal, os resultados de estudos numa determinada região podem ser difíceis de extrapolar para outras. Adicionalmente, constata-se que:

- Vários modelos existentes exigem informação para a sua parametcrização e dados para calibração que, usualmente, não estão disponíveis.
- Vários estudos apresentam os resultados de forma agregada ou gráfica, não permitindo a sua utilização do ponto de vista prático.

Neste contexto, a presente comunicação disponibiliza modelos simples cuja aplicação prática é possível com a informação disponível nos serviços meteorológicos oficiais. Os modelos desenvolvidos evidenciam que:

- Eventos de precipitação inferior a 1.2 mm têm uma probabilidade de 33% de originar escoamento.
- A precipitação mínima para produzir escoamento aumenta com a temperatura do período desde o evento de precipitação antecedente.
- A modelação direta do escoamento e do coeficiente de escoamento apresentam ajustes equivalentes para prever o escoamento de coberturas verdes, revelando-se o segundo mais conservativo já que o coeficiente de escoamento tende para 1 para um valor de precipitação inferior.

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi desenvolvida no âmbito do projeto GREENER (Iniciativa Bilateral nº FBR_OC2_80), financiado pelas EEA Grants.

REFERÊNCIAS

Hamouz, V. (2020). Retention and detention-based roofs for stormwater management in urban environments in cold climates. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Norway.

Hamouz, V., Lohne, J., Wood, J., Muthanna, T. (2018). Hydrological performance of LECA-based roofs in cold climates. Water, 10(3):263. https://doi.org/10.3390/w10030263

Hamouz, V., Pons, V., Sivertsen, E., Raspati, G. S., Bertrand-Krajewski, J-L., Muthanna, T. M. (2020) Detention-based green roofs for stormwater management under extreme precipitation due to climate change. Blue-Green Systems, 2(1):250-266. https://doi.org/10.2166/bgs.2020.101

Hamouz, V., Muthanna, T. M. (2019). Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. Journal of Environmental Management, 249:109350. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109350

Harper G. E., Limmer M. A., Showalter W. E., Joel G. Burken (2015). Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. Ecological Engineering, 78:127-133. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.004

Johannessen, B. G., Hamouz, V., Gragne, A. S., Muthanna, T. M. (2019). The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar buildup. Journal of Hydrology, 569:816-828. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.004

Mantilla, I., Flanagan, K., Muthanna, T. M., Blecken, G.-T., Viklander, M. (2023). Variability of green infrastructure performance due to climatic regimes across Sweden. Journal of Environmental Management, 326:116354. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116354

Sanchez, L., Reames, T. G., (2019) Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy. Urban Forestry & Urban Greening, 44:126331. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.014

Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W., Wang, C., Wang, R. (2021). Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. Resources, Conservation & Recycling, 170:105577. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO GRANULAR DE MINÉRIO DE FERRO PARA APLICAÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Douglas Mol Resende[a]; Liciane Alvernaz Pena[a]; Rafael Pinheiro Curto Bueno[a], Aline Santana Figueiredo[a], Ricardo André Fiorotti Peixoto[a]

[a]Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, CEP: 35402-185, Brasil – douglas.mr@aluno.ufop.edu.br; liciane.pena1@aluno.ufop.edu.br; rafael.curto@aluno.ufop.edu.br; aline.figueiredo1@aluno.ufop.edu.br ricardofiorotti@ufop.edu.br

RESUMO

A extração de recursos minerais desempenha um papel de grande relevância tanto na esfera econômica quanto social. O Brasil se destaca internacionalmente nesse setor, sendo o terceiro maior explorador global de minério de ferro. No ano de 2022, aproximadamente 48% dos municípios brasileiros estiveram vinculados às atividades de extração mineral, resultando em benefícios diretos pela arrecadação de impostos. A atividade mineraria esteve ainda relacionada a geração de cerca de 2,25 milhões de empregos diretos e indiretos no Brasil. Apesar da sua importância econômica e social, a extração mineral gera um expressivo volume de rejeitos, geralmente descartados em barragens ou cavas, que, eventualmente, ocasionam acidentes ambientais. Nesse sentido, a reutilização de rejeitos da mineração é imperativa para aprimorar as condições de segurança no setor e reduzir os impactos ambientais associados. Paralelamente, a construção civil consome consideráveis quantidades de recursos naturais, impulsionando a realização de estudos sobre a viabilidade técnica do reaproveitamento de rejeitos de mineração como matéria-prima na produção de compósitos cimentícios. Assim, o presente estudo propõe uma avaliação das propriedades químicas, físicas e mecânicas de um rejeito granular do beneficiamento de minério de ferro (RGMF), comparativamente a um agregado graúdo convencional (brita de gnaisse). Para esse própósito, os materiais foram caracterizados quanto à composição química, massa específica, massa unitária, distribuição granulométrica de partículas, índice de forma e resistência ao esmagamento. O RGMF composição química de predominantemente óxidos de ferro (62.4%) e sílica (29.9%) e, nesse sentido, valores superiores de massa específica e unitária, comparativamente ao agregado graúdo convencional. O rejeito granular de minério apresentou ainda predominância de partículas de dimensões entre 12.5 e 19.0 mm e índice de forma de 2.45 (abaixo do limite normativo de 3.0, conforme NBR 7211). Adicionalmente, o material demonstrou resistência ao esmagamento similar ao agregado graúdo convencional, atingindo o valor de 78%. Esses resultados indicam a viabilidade da utilização do rejeito granular de minério de ferro como agregado graúdo em matrizes cimentícias, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de processos circulares e tecnologias de construção sustentáveis.

Palavras-chave: Rejeitos da mineração; rejeito granular de minério de ferro; compósitos cimentícios sustentáveis.

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração desempenha um papel fundamental na sociedade moderna, sendo responsável pelo fornecimento de minerais essenciais para o funcionamento cotidiano e para o avanço de indústrias que impulsionam o progresso tecnológico (ALVES; FERREIRA; ARAÚJO, 2021). Nesse sentido, regiões geologicamente privilegiadas apresentam uma parcela considerável do seu produto interno bruto associada à atividade minerária (ARAUJO et al., 2022). No Brasil, somente no ano de 2022, a atividade minerária gerou cerca de 2,25 milhões de empregos diretos e indiretos (IBRAM, 2023).

A despeito da importância econômica e social, essa atividade gera impactos como dependência econômica para geração de renda e emprego, competição para o uso da terra e crescimento desordenado das cidades (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017). Impactos de magnitude ainda maior foram observados recentemente no Brasil, em decorrência da falha de barragens à montante (Mariana e Brumadinho, Minas Gerais), que provocaram o desalojamento de mais de 600 famílias e mais de 280 vítimas fatais (GRUPO FORÇA TAREFA, 2016; SEGUR, 2019)

Em resposta a esses eventos, a legislação brasileira proibiu a prática de alteamento de barragens a montante, método que consiste em assentar a barragem de elevação diretamente sobre os rejeitos depositados, considerado o de menor custo e menos seguro (CONSOLI et al., 2022). Até setembro de 2027, todas as estruturas existentes deverão ser descaracterizadas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019). Complementarmente, o setor minerário tem-se dedicado a atender às necessidades de melhorias e inovações no beneficiamento de minérios e na geração, disposição e reaproveitamento de rejeitos, objetivando-se ganho de eficiência e redução dos impactos ambientais associados a essa atividade.

Os dois principais resíduos sólidos gerados pelo processo de extração e beneficiamento mineral são o estéril e os rejeitos (ANM, 2021; SCHATZMAYR WELP SÁ et al., 2022). O estéril (*waste rock ou overburden*) é o material *in natura*, descartado pela operação de lavra por não apresentar concentração mineral economicamente viável para beneficiamento e é usualmente disposto em pilhas próximas à região de extração (MAGALHÃES et al., 2020; SHENGO, 2021). Já o rejeito (*mining tailing*) é o material descartado durante ou após o processo de beneficiamento. Estima-se que sejam gerados cerca de 65 a 80 bilhões de toneladas de estéreis e rejeitos anualmente (EDRAKI et al., 2014; MARÍN; KRASLAWSKI; CISTERNAS, 2022), das quais 10 a 15 bilhões correspondem aos rejeitos e o restante corresponde ao estéril (ADIGUZEL; TUYLU; EKER, 2022). Somente o beneficiamento do minério de ferro gera em média 1,4 bilhões de rejeitos a cada ano (SALDANHA et al., 2023).

Diante da necessidade de se evitar a disposição desses rejeitos em barragens, visando ampliar a segurança operacional e reduzir os impactos ambientais, tem se estudado estratégias para reaproveitamento destes resíduos sólidos. Nesse cenário, a indústria da construção civil emerge como protagonista para reincorpora-los de maneira eficaz na cadeia produtiva, considerando a crescente demanda por economia de recursos naturais, redução do consumo de energia, melhoria da produtividade e responsabilidade social nos processos produtivos (CARVALHO et al., 2019). É importante mencionar ainda, que esse posicionamento do setor construtivo está em consonância com os objetivos sustentáveis delineados pela Agenda 2030 da ONU, aprovada em 2015. Destacam-se i) a promoção da industrialização inclusiva e sustentável e fomento à inovação (objetivo 9) ii) desenvolvimento de cidades e assentamentos humanos inclusivos, resilientes e sustentáveis (objetivo 11); iii) adoção de padrões de consumo e produção sustentáveis (objetivo 12) (ONU, 2015).

O cenário exposto aponta para uma convergência entre as necessidades do setor minerário e os desafios estruturais existentes no Brasil, sob as perspectivas econômica, ambiental e social. Assim, o presente estudo propõe uma avaliação técnica das propriedades físicas e mecânicas de um rejeito granular do beneficiamento de minério de ferro (RGMF), comparativamente a um agregado graúdo convencional (brita de gnaisse), com vistas à aplicação do rejeito mencionado em matrizes cimentícias.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais da presente pesquisa compreendem um rejeito granular de minério de ferro (RGMF), resultante da britagem primária e separação magnética do minério bruto, proveniente de uma usina mineradora da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais e um agregado convencional graúdo (brita de gnaisse) fornecido por uma usina de mineração e beneficiamento de agregados convencionais situada em Belo Horizonte, Minas Gerais. Os materiais são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - a) Rejeito granular de minério de ferro; b) Agregado graúdo convencional

2.2 MÉTODOS

Os materiais foram caracterizados quanto à composição química por meio da técnica de fluorescência de raios - X (equipamento PANalytical Epsilon3x). O rejeito granular de minério de ferro foi ainda caracterizado quanto à composição mineralógica por meio da difração de raios – X (Bruker D2 Phaser) com tubo de CuKα, tensão de 45kV, 40mA, velocidade de giro de 8rpm, 2θ variando de 6-80° com passo de 0,02° e tempo de 1 segundo por passo. Para as análises qúimica e mineralógica os materiais foram cominuídos até que fossem passantes na peneira de 0,045 mm.

As propriedades físicas do agregado convencional e do RGMF foram determinadas por meio das análises de massa específica (ABNT, 2009), massa unitária (ABNT, 2021), distribuição granulométrica de partículas (ABNT, 2003), índice de forma (ABNT, 2019) e resistência ao esmagamento (ABNT, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da caracterização química e física do rejeito granular de minério de ferro e do agregado graúdo convencional. O rejeito granular de minério de ferro apresenta composição química com predominância de óxido de ferro III (Fe_2O_3) (62.4%), o que corresponde a um teor de Fe de aproximadamente 40% e dióxido de sílica (SiO_2). A prevalência de óxido de ferro III no rejeito está associada à sua fase de geração, tendo em vista que o RGMF é originado no início do processo de beneficiamento do minério de ferro em que há a britagem e separação magnética do minério bruto. A cominuição do RGMF (d< 0,045 mm) para realização das análises química e mineralógica pode ter liberado partículas de ferro que estavam envoltas por partículas não ferrosas de maior dimensão. A análise mineralógica, apresentada na Figura 2, indicou a presença de hematita, goetita e quartzo.

Quadro 1 - Caracterização química e física do agregado convencional e do RGMF

	Agregado convencional	**RGMF**
Caracterização química		
SiO_2	69.3%	29.9%
Fe_2O_3	1.6%	62.4%
Al_2O_3	15.9%	1.7%
CaO	1.6%	-
K_2O	2.8%	-
Perda ao fogo (%)	-	5.5%
Outros (%)	8,8%	0.5%
Caracterização física		
Massa específica (g/cm³)	2.65	3.18
Massa unitária (g/cm³)	1.45	1.74
Índice de forma	2.13	2.45
Resistência ao esmagamento (%)	76.5%	78%

O teor de óxido de ferro no rejeito do presente estudo é similar ao reportado por Carmo et. al. (2023) para outro rejeito granular de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero, o qual apresentou aproximadamente 57% de Fe_2O_3 e 38% de SiO_2. Este rejeito foi utilizado como agregado graúdo para o desenvolvimento de concretos compactados rolados que apresentaram massa específica de aproximadamente 3.0 g/cm³.

Quanto à caracterização física, observa-se que o RGMF apresenta massa específica e massa unitária 20.0% superiores aos resultados obtidos para o agregado graúdo convencional. Esse resultado está relacionado à composição química do rejeito, tendo em vista que o ferro apresenta massa específica de aproximadamente 7.9 g/cm³ e o RGMF apresenta 62,4% de óxidos de ferro. Desta forma, matrizes cimentícias produzidas com o RGMF em substituição ao agregado graúdo convencional podem apresentar aumento de sua massa específica, conforme evidenciado por Carmo et. al. (2023).

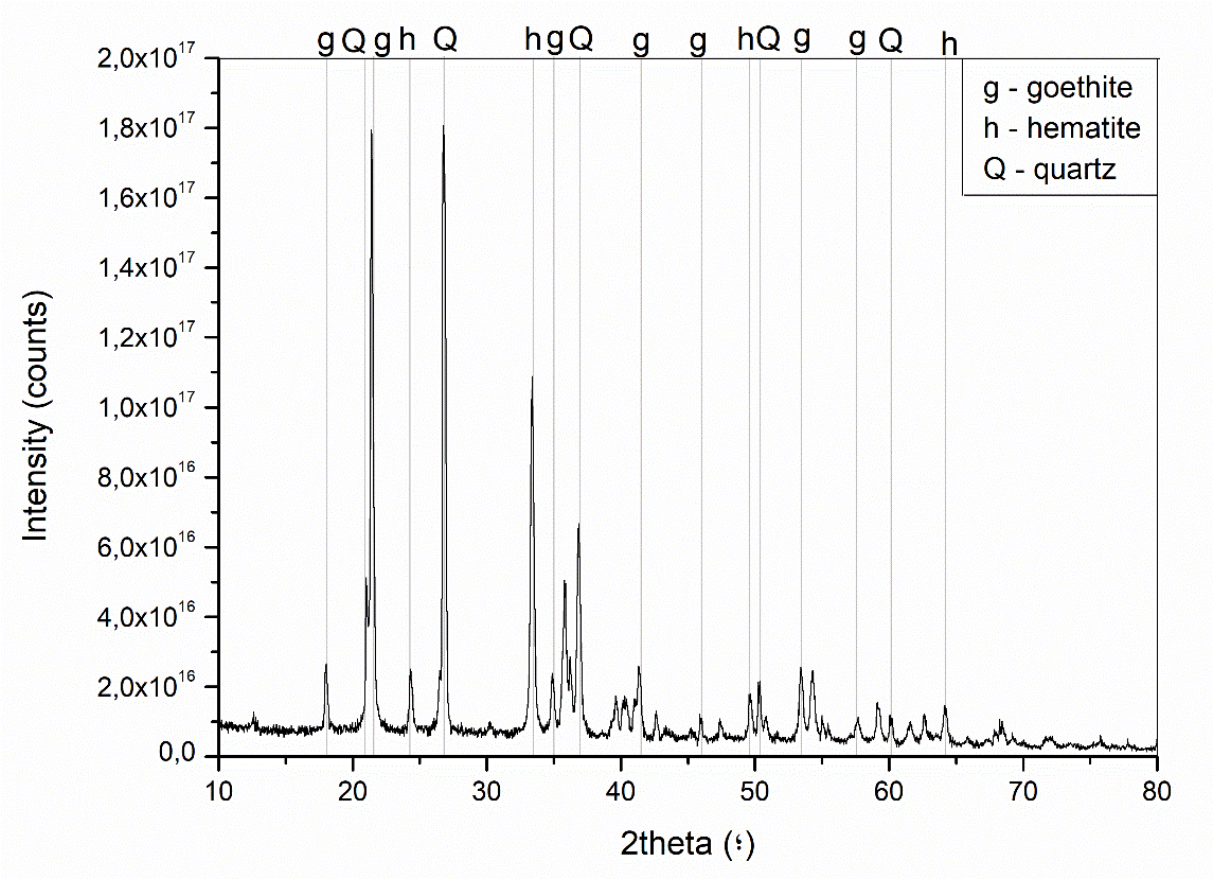


Figura 2 - Caracterização mineralógica do RGMF

O RGMF apresentou resistência ao esmagamento de 78.0%, resultado superior ao obtido para o agregado graúdo convencional (76.5%) e ao relatado por Yellitshetty et. al. (2008) para rejeitos granulares de minério de ferro (70%), semelhante ao reportado por Shamsi e Zakerinejad (2023) para estéreis de minério de ferro (80%). Portanto, sugere-se que o RGMF apresenta competência mecânica similar ou superior à agregados convencionais e outros rejeitos, conforme reportado na literatura, resultado este que é coerente com a sua caracterização química que apontou predominância de óxidos de ferro e silício.

O rejeito granular de minério de ferro apresentou índice de forma (2.45) aproximadamente 15% superior ao resultado obtido para o agregado convencional (2.13), o que índica que esse rejeito apresenta morfologia mais lamelar. Ressalta-se, que conforme normativa ABNT NBR 7211 (ABNT, 2022), agregados graúdos para a produção de concretos devem apresentar índice de forma inferior à 3.0, critério que é atendido pelo RGMF e pelo agregado graúdo convencional.

Na Figura 3 é apresentada a caracterização granulométrica do agregado de referência e do RGMF. O RGMF apresentou distribuição de partículas que se enquadra na faixa granulométrica de agregados graúdos número 67 (19 mm – 4.75 mm), segundo ASTM C-33 (ASTM, 2016), com dimensão máxima característica de 19 mm e 73% de partículas maiores que 9.5 mm. Em contrapartida, o agregado convencional não atende completamente aos limites estabelecidos pela normativa mencionada. Desta forma, verifica-se que o RGMF apresenta maior variação de grãos de tamanhos distintos, o que favorece a obtenção de matrizes cimentícias com maior empacotamento, melhor desempenho mecânico, redução do consumo de cimento e do índice de vazios (HETTIARACHCHI; MAMPEARACHCHI, 2019; MARTINS et al., 2023; VIANNA BAHIENSE et al., 2021).

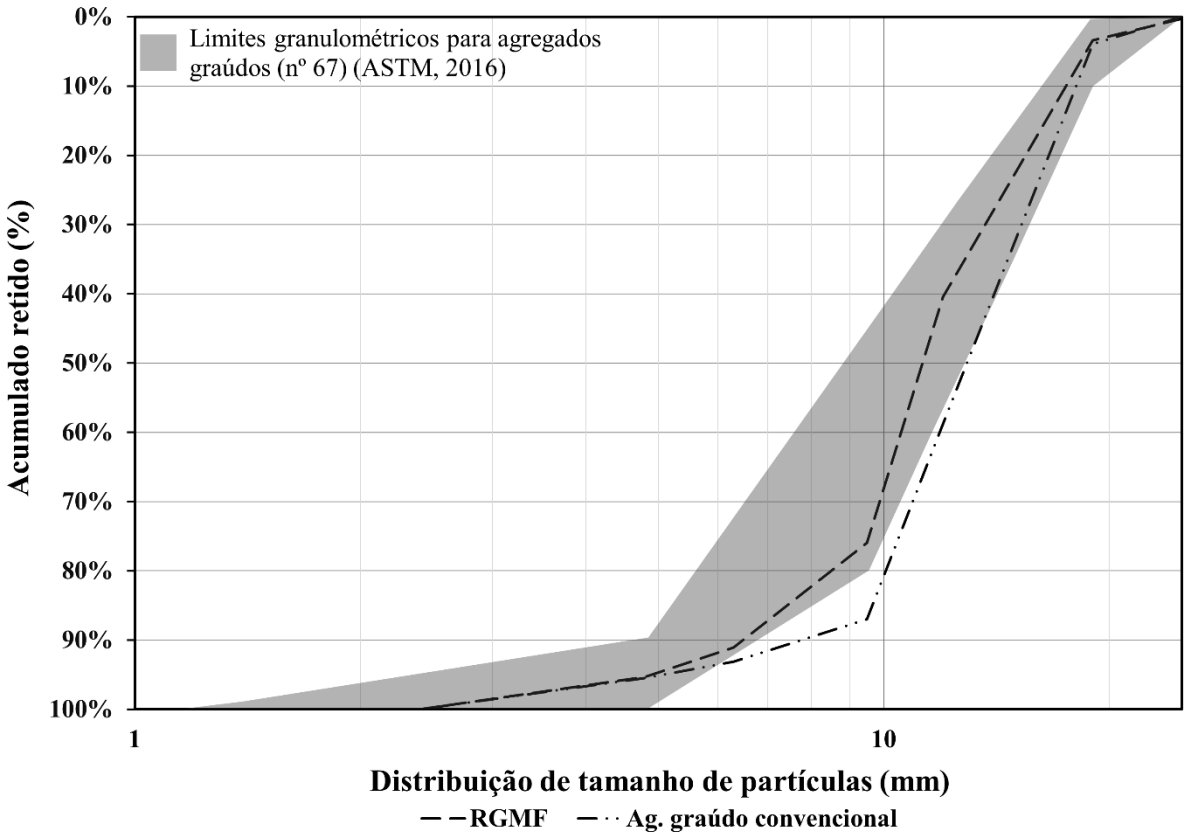


Figura 3 - Distribuição granulométrica do agregado convencional e do RGMF

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs uma análise comparativa entre as propriedades químicas e físicas de um rejeito granular de minério de ferro e de um agregado graúdo convencional, objetivando à aplicação do rejeito citado como agregado graúdo em matrizes cimentícias. Considerando os resultados apresentados, as seguintes conclusões são obtidas:

- O rejeito granular de minério de ferro apresentou composição química de majoritariamente óxidos de ferro (62.4%), resultado que pode estar associado à sua fase de geração. O teor de óxido de ferro do RGMF influenciou diretamente à sua massa específica e unitária cujos resultados foram superiores aos obtidos para o agregado graúdo convencional.
- A resistência ao esmagamento do RGMF foi similar à observada para o agregado graúdo convencional e outros rejeitos de minério de ferro reportados na literatura, o que sugere a sua competência mecânica para aplicação como agregado graúdo em matrizes cimentícias.
- O rejeito granular de minério de ferro apresentou distribuição granulométrica de partículas mais bem distribuída do que o agregado convencional, o que pode proporcionar a obtenção de matrizes cimentícias com melhor empacotamento. Em contrapartida, o RGMF apresentou índice de forma superior ao obtido para o agregado graúdo convencional, mas ainda atendendo ao limite normativo máximo de 3.0.

Assim, os resultados sugerem a viabilidade técnica para reincorporação do RGMF na cadeia produtiva como agregado graúdo para matrizes cimentícias. Desta forma, a presente pesquisa visa contribuir para a implementações de práticas sustentáveis nos setores minerário e construtivo em consonância com os objetivos estabelecidos pela Agenda 2030, de acordo com a Organização das Nações Unidas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – processo 88887.683080/2022-00. Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq, Samarco Mineração, CAPES e UFOP pelo apoio para a realização e apresentação dessa pesquisa. Somos gratos ainda pela infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos - RECICLOS – CNPq.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR NM: 248 - Aggregates - Determination of particle size distribution**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ABNT. **NM 53 Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Tecnicas, 2009.

ABNT. **NBR 9938 - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ABNT. **NBR 7809 - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. **NBR 16972 - Aggregates - Determination of bulk density and void ratio**. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards, 2021.

ABNT. **NBR 7211 - Aggregates for concrete**. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards, 2022.

ADIGUZEL, D.; TUYLU, S.; EKER, H. Utilization of tailings in concrete products: A review. **Construction and Building Materials**, v. 360, p. 129574, dez. 2022.

ALVES, W.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability. **Resources Policy**, v. 74, p. 101648, dez. 2021.

ANM. **Resolução ANM N] 85, de 2 de dezembro de 2021**. Brasília: Agência Nacional da Mineração, 2021.

ARAUJO, F. et al. Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. **Geosciences**, v. 12, n. 9, p. 319, 27 ago. 2022.

ASTM. **ASTM C33/C33M-16 Standard Specification for Concrete Aggregates**. West Conshohocken: [s.n.].

CARMO, J. B. M. et al. RCC - Roller-Compacted Concrete with hematite aggregate. **REM - International Engineering Journal**, v. 76, n. 3, p. 247–254, set. 2023.

CONSOLI, N. C. et al. Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: New Brazilian Trend for Tailings Disposal by Stacking. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 836, 14 jan. 2022.

EDRAKI, M. et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 411–420, dez. 2014.

FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, 2019.

GRUPO FORÇA TAREFA. **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem do Fundão em Mariana - MG**. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2016.

HETTIARACHCHI, H. A. C. K.; MAMPEARACHCHI, W. K. Validity of aggregate packing models in mixture design of interlocking concrete block pavers (ICBP). **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 2, p. 462–474, 17 fev. 2019.

IBRAM. **Mineração em números: 2022**. [s.l.] instituto Brasileiro de Mineração, 2023.

MAGALHÃES, L. F. DE et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260, nov. 2020.

MARÍN, O. A.; KRASLAWSKI, A.; CISTERNAS, L. A. Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis. **Minerals Engineering**, v. 184, p. 107629, jun. 2022.

MARTINS, A. C. P. et al. Use of steel slag and LAS-based modifying admixture in obtaining highly eco-efficient precast concrete products. **Journal of Building Engineering**, v. 66, p. 105884, maio 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Brasília: Brasil, 2019.

ONU. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015.

PASSOS, F. L.; COELHO, P.; DIAS, A. (Des)territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. **Cadernos Metrópole**, v. 19, n. 38, p. 269–297, abr. 2017.

SALDANHA, R. B. et al. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130008, fev. 2023.

SCHATZMAYR WELP SÁ, T. et al. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. **Construction and Building Materials**, v. 342, p. 128072, ago. 2022.

SEGUR. **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho: Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG**. Belo Horizonte: Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais, 2019.

SHAMSI, M.; ZAKERINEJAD, M. Production of sustainable hot mix asphalt from the iron ore overburden residues. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 123, p. 103926, out. 2023.

SHENGO, L. M. Review of Practices in the Managements of Mineral Wastes: The Case of Waste Rocks and Mine Tailings. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 7, p. 273, 25 jul. 2021.

VIANNA BAHIENSE, A. et al. Dosage of interlocking paving with ornamental rock waste: An experimental design approach, particle packing and polluting potential. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00596, dez. 2021.

YELLISHETTY, M. et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 11, p. 1283–1289, set. 2008.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESCÓRIA DE ACIARIA COMO ESTABILIZADOR QUÍMICO PARA INFRAESTRUTRURA DE PAVIMENTAÇÃO

Ricardo André Fiorotti Peixoto [a]; Dayse Horta Diniz [a]; Aline Santana Figueiredo [a]; Nayara Mendes dos Santos [a]; Karina Marcele Marques [a]; José Maria Franco de Carvalho [b]

[a] Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, ricardofiorotti@ufop.edu.br, aline.figueiredo1@aluno.ufop.edu.br, nayara.ms@aluno.ufop.edu.br, karina.marques@ufop.edu.br

[b] Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, josemaria.carvalho@ufv.br

RESUMO

Parte fundamental do processo de pavimentação rodoviária é a estabilização química de solos, que geralmente utiliza cal ou cimento Portland para atingir as propriedades exigidas. Contudo, tanto a cal quanto o cimento são obtidos por meio de processos que envolvem extração de matéria prima não renovável e emissão de gases de efeito estufa, apresentando também alto custo. Diversos estudos apontam que a escória de aciaria, resíduo de grande geração da indústria siderúrgica, apresenta propriedades adequadas para aplicações diversas na construção pesada e construção civil. Associado a isso, o Brasil possui a quarta maior malha rodoviária do mundo com baixo índice de pavimentação, havendo demanda por infraestrutura de transporte de baixo custo e com adequado desempenho técnico e ambiental. Considerando-se as propriedades hidráulicas das escórias de aciaria (BOFS), propõe-se sua aplicação como estabilizador para solos em infraestruturas rodoviárias. As matrizes produzidas foram avaliadas quanto às propriedades físicas, químicas e de desempenho ambiental. Os resultados indicam que os solos estabilizados com BOFS possuem a mesma classificação ambiental que solos estabilizados com cimento. Além disso, constatou-se melhorias nas propriedades, indicando viabilidade para uma solução capaz de incorporar um alto teor de BOFS e baixo consumo de cimento.

Palavras-chave: Escória de aciaria, Reciclagem de resíduos, Estabilização de solos, Infraestrutura rodoviária, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A técnica de estabilização química de solos geralmente utiliza cal ou cimento Portland como ligantes para aprimorar propriedades relacionadas à resistência mecânica, plasticidade e permeabilidade em solos destinados às infraestruturas rodoviárias. Esses materiais são empregados, por exemplo, em camadas de base e sub-base de pavimentos (Holderby e Cerato 2011; Sol-Sánchez et al. 2016). Contudo, tanto a cal quanto o cimento são obtidos por meio de processos que dependem da extração de recursos naturais não renováveis e emitem uma elevada quantidade de CO_2, apresentando também alto custo (Gutiérrez, et al., 2012; Pourakbar et al. 2015; Goodarzi and Salimi 2015). Portanto, muitas pesquisas têm sido realizadas buscando aplicar materiais alternativos como estabilizadores de solo, com resultados promissores (Rhode 2002; Punthutaecha et al. 2006; Cokca et al. 2009; Diniz 2009; Jayasree et al. 2014; Goodarzi e Salimi 2015; Pourakbar et al. 2014; Goodarzi e Salimi 2015; Pourakbar et al. al. 2015; Ahmed 2015; Yi et al. 2015; Sol-Sánchez et al. 2016).

Estudos têm demonstrado que as escórias de aciaria apresentam propriedades químicas e mineralógicas que a habilitariam como fonte de cálcio, magnésio e sílica para aplicações diversas na construção pesada e construção civil (Masurero et al. 2000; Poh et al. 2006; Diniz 2009; Zhang et al. 2011; Miraoui et al. 2012; Goodarzi and Salimi 2015; Gonçalves et al. 2016). A escória de aciaria é um resíduo de grande geração da indústria siderúrgica e representa um grande desafio ao setor, dado que seu armazenamento exige operações onerosas de logística e demanda áreas extensas para disposição (Polettini et al. 2016; Martins, et al., 2023; Andrade, et al., 2021). Associado a isso, o Brasil possui a quarta maior malha rodoviária do mundo e apenas 12,4% dessas estradas são pavimentadas, havendo uma grande demanda por infraestrutura de transporte de baixo custo e com bom desempenho técnico e ambiental (Ministry of Transport 2012). Considerando-se as propriedades hidráulicas das escórias de aciaria (basic oxygen furnace slag - BOFS), propõe-se sua utilização como estabilizador químico para solos utilizados em infraestrutura rodoviária.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS

O solo utilizado foi um cascalho amarelo coletado em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Esse material foi seco ao ar e destorroado, sendo utilizada a fração com tamanho de partículas inferior a 4,75 mm. O solo foi classificado como A-4 de acordo com a padronização do Bureau of Public Roads (BHR) e como arenoso e siltoso de acordo com o sistema unificado de classificação de solo (USCS) e a Associação Americana de Oficiais de Rodovias e Transportes Estaduais (AASHTO). Os Quadros 1 e 2 apresentam as propriedades do solo.

Quadro 1 – Propriedades físicas do solo

Massa específica (g/cm³)	2,794
Massa unitária (g/cm³)	1,434
Limite de liquidez [LL(%)]	33,6
Limite de plasticidade [LP(%)]	Não plástico
Índice de plasticidade (IP)	Não plástico

Quadro 2 – Distribuição granulométrica do solo

Abertura da peneira (mm)	Passante (%)
4,8 (#4)	100,0
2,0 (#10)	99,3
0,42 (#40)	70,0
0,075 (#200)	46,0

Os finos de BOFS empregados neste trabalho (Quadro 3) (Figura 1) são provenientes de uma siderúrgica no estado do Espírito Santo, Brasil, e uma empresa do estado de Minas Gerais, Brasil, procedeu a separação magnética desse material. O metal recuperado foi retornado ao processo siderúrgico e a fração não metálica foi utilizada neste estudo, passando por um processo adicional de exposição a intempéries para neutralizar os efeitos expansivos indesejáveis do óxido de cálcio (CaO) e do óxido de magnésio (MgO). Foi utilizado um cimento comercial específico para uso em camadas de base, sub-base e subleito, cujas propriedades são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 3 – Propriedades físicas da BOFS

Parâmetro	Valor	Limites da NBR 16697:18
Massa específica (g/cm³)	3,166	2,85-3,20
Massa unitária (g/cm³)	1,368	1,10-1,60
Retido na peneira #200 (%)	5,27	≤ 12
Tempo de pega (h)	22	1 ≤ S ≤ 12
Área superficial específica (m²/g)	1,71	≥ 0,24

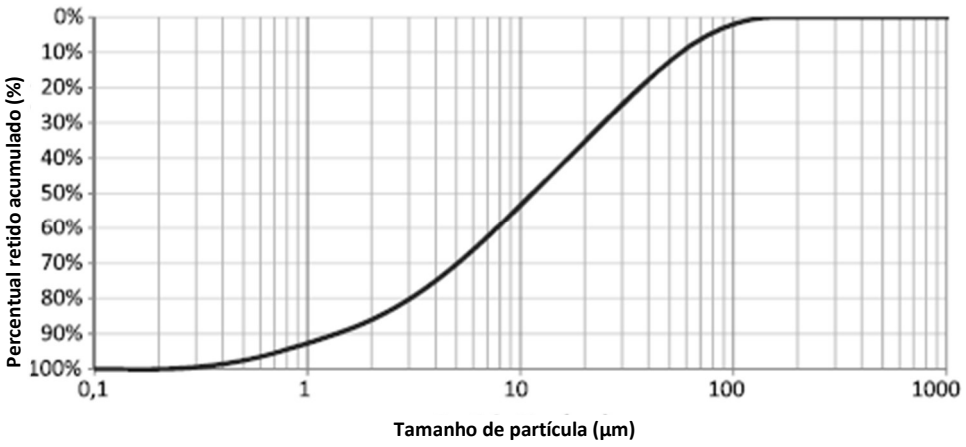


Figura 1 – Distribuição granulométrica da BOFS

Quadro 4 – Propriedades do cimento utilizado

Composto	Valor médio (%)	Parâmetro físico	Valor
SiO_2	30-35	Massa específica (g/cm³)	2,96
Al_2O_3	10-13	Massa unitária (g/cm³)	1,28
Fe_2O_3	0,5-3,0	Retido na peneira #200 (%)	7,8
CaO	42,5-45,5	Início de pega (h)	5-7
MgO	5-7	-	-

2.2 MÉTODOS

Este trabalho avaliou a estabilização do solo com diferentes proporções de cimento e BOFS como agentes estabilizantes. As dosagens avaliadas são apresentadas no Quadro 5. Para determinar o teor ótimo de água, as misturas foram submetidas a um ensaio de compactação Proctor utilizando energia intermediária.

Quadro 5 – Dosagens avaliadas

Dosagem	**Solo (%)**	**Cimento (%)**	**BOFS (%)**
S	100	-	-
C5	95	5	-
C10	90	10	-
C15	85	15	-
C20	80	20	-
B5	95	-	5
B10	90	-	10
B15	85	-	15
B20	80	-	20
B15C5	80	5	15
B20C5	75	5	20

Os testes de expansão e índice de suporte Califórnia (CBR) foram realizados de acordo com os requisitos da norma brasileira NBR 9895 (ANBT 1986) e da norma americana ASTM D1883-07 (ASTM 2007). Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, foram produzidos corpos de prova cilíndricos (10 x 12,73 cm) de acordo com os requisitos da norma brasileira NBR 12024 (ANBT 2012a). Cada dosagem foi testada às idades de 7, 28 e 56 dias. Os corpos de prova foram submetidos à cura ao ar, considerada mais próxima das condições práticas. Os ensaios de desempenho mecânico foram realizados conforme requisitos das normas brasileiras NBR 12025 (ANBT 2012b) e NBR 7222 (ANBT 2011). A classificação ambiental das misturas foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 10004 (ANBT 2004c) através de resultados obtidos em testes de lixiviação e solubilização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cerca de 20% das partículas de BOFS possuem diâmetro inferior a 3,0 µm (Figura 1), sendo assim responsáveis pelo efeito de preenchimento de microporos na matriz. Isto possibilitou um aumento no empacotamento de partículas para uma determinada energia de compactação, reduzindo o índice de vazios e aumentando os valores de CBR. Os valores de massa específica e massa unitária observados nesta pesquisa são inferiores aos observados na literatura, o que se deve ao tratamento de separação magnética procedido. A atividade cimentante apresentada pelos finos de BOFS foi constatada anteriormente pela avaliação do tempo de pega.

A Figura 2 apresenta a densidade seca das misturas. Para as misturas com apenas um tipo de estabilizador, o aumento do seu teor contribuiu para uma diminuição na densidade seca observada. Esse comportamento se deve ao fato de que a massa unitária do estabilizador é menor que a massa unitária do solo analisado. Além disso, o aumento do conteúdo de finos nas misturas melhora o empacotamento das partículas. Os valores mais altos de densidade seca máxima foram observados para as misturas com 10% de cimento ou BOFS. Ao aumentar o teor de estabilizador de 5% para 10% nessas misturas, foi verificou-se um aumento na densidade seca máxima, o que indica formação de produtos de hidratação. Para misturas com dois estabilizadores, o aumento do teor de BOFS levou a um aumento da densidade seca máxima.

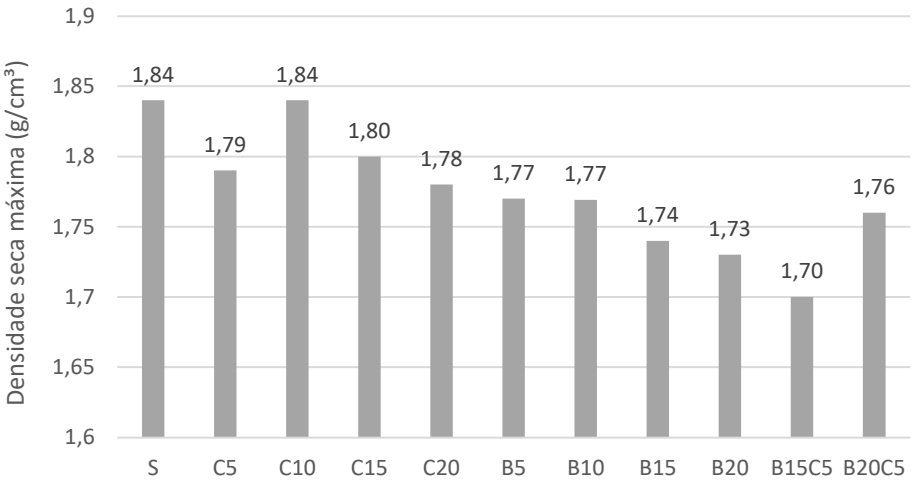


Figura 2 – Densidade seca máxima das dosagens propostas

A Figura 3 apresenta os valores de expansão das misturas para diferentes teores de BOFS e cimento. Em geral, um aumento no teor de estabilizador contribuiu para uma diminuição na expansão da dosagem C5. A norma NBR 7207 (ABNT 1982) exige que os solos tenham valores de expansão ≤2% para camadas de subleito, ≤1% para camadas de sub-base e ≤0,5% para camadas de base. Para teores de BOFS superiores a 10%, foi observada uma redução drástica na expansão, com valores abaixo do limite da camada base para as Misturas B10, B15 e B20. O aumento do teor de finos do BOFS até o limite estabelecido neste estudo (20%) reduziu a expansão das misturas em 70% em comparação ao solo natural. Os resultados obtidos para misturas com dois estabilizadores indicam expansão inferior a 0,5% em todos os casos.

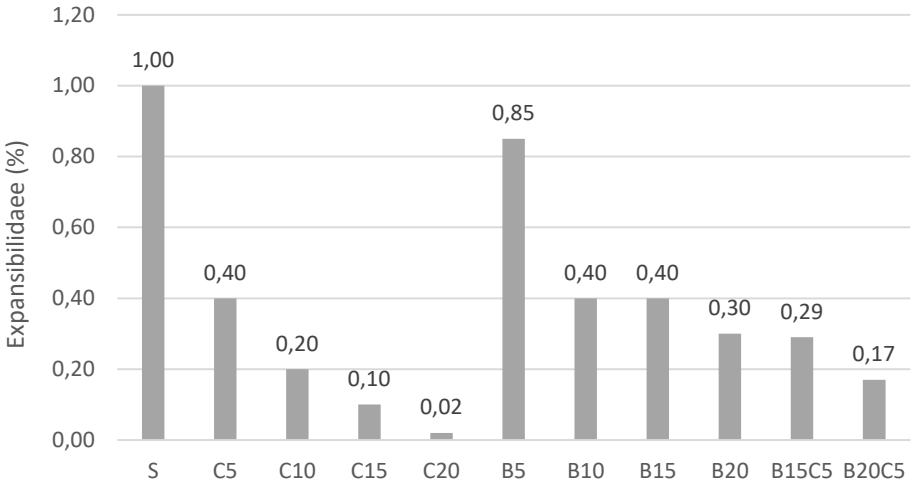


Figura 3 – Valores de expansão para as dosagens propostas

Apesar de Raposo (2005) e Machado (2000) relatarem limitações no uso de BOFS devido à instabilidade volumétrica causada por MgO e CaO, a presente pesquisa observou diminuição da expansão com aumento do teor de BOFS nas misturas. Este resultado destaca a importância da segregação das frações metálicas e não metálicas das escórias, bem como da estabilização dos óxidos livres. A adição de finos de BOFS processados no solo estudado aumentou sua área superficial específica, mas diminuiu sua expansão. Os finos BOFS funcionaram tanto como material de enchimento quanto como material ligante, promovendo melhor empacotamento e estabilização das partículas. Para misturas com dois estabilizantes, o aumento do teor de BOFS também promoveu diminuição da expansão.

O aumento do teor de estabilizador levou a um aumento nos valores de CBR devido às propriedades ligantes e ao efeito fíler (Figura 4). Foram observados baixos valores de CBR para misturas solo-BOFS. Isto pode ser explicado pelo tempo necessário para ganho de resistência, pois as reações da escória são muito lentas e seu efeito se consolida em idades posteriores. As misturas com cimento e BOFS apresentaram um aumento importante – os valores de CBR para essas misturas foram maiores que os valores individuais combinados. A norma NBR 7207 (ABNT 1982) estabelece que os solos devem ter valores de CBR entre 2 e 20% para utilização em camadas de subleito (Misturas B5 e B10), 20-80% para utilização em camadas de sub-base (C5, B15 e B20) e mais de 80% para utilização como camadas de base (C10, C15, C20, B15C5 e B20C5).

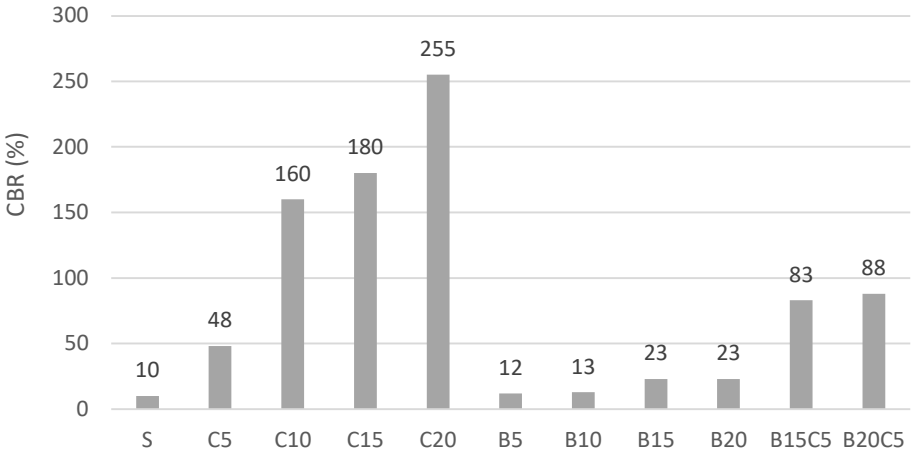


Figura 4 – Valores de CBR para as dosagens propostas

Dentre as dosagens com apenas um tipo de estabilizador, as misturas C10 e B10, aditivadas respectivamente com teores de 10% de cimento Portland e BOFs, apresentaram os melhores resultados gerais para compactação. Assim, foram realizados testes de resistência mecânica para as misturas C10 e B10, B15C5 e B20C5. As Figuras 5 e 6 mostram os resultados de resistência à compressão não confinada e à tração por compressão diametral.

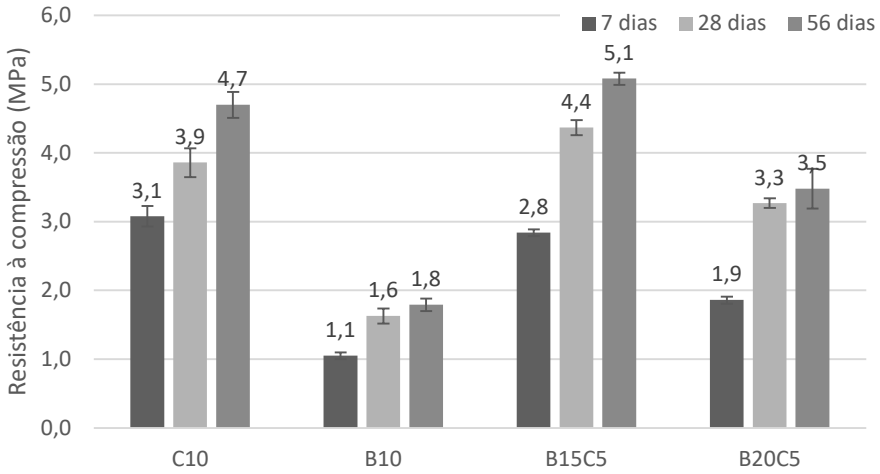


Figura 5 – Resistência à compressão não confinada das dosagens aos 7, 28 e 56 dias

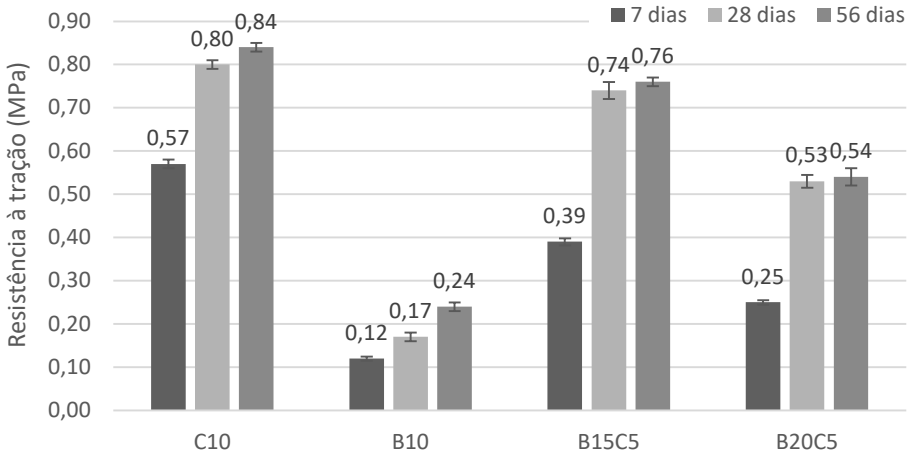


Figura 6 – Resistência à tração por compressão diametral das dosagens aos 7, 28 e 56 dias

Apenas as misturas C10 e B15C5 atingiram o valor mínimo de 2,1 MPa aos 7 dias de cura ao ar, prescrito pela norma brasileira NBR 12025 (ABNT 2012b) para aplicação como camadas de base e sub-base. Os resultados de 28 e 56 dias mostram que apenas a mistura B10 não atingiu o valor mínimo. Por fim, a mistura com cimento e 15% de BOFS alcançou um maior ganho de resistência em comparação com as misturas com cimento e 20% de BOFS. Mesmo assim, o valor mínimo foi superado pela Mistura B20C5 aos 28 dias, o que maximiza o consumo de escória. Os melhores resultados observados para misturas com um estabilizador foram apresentados pela mistura C10. As misturas com dois estabilizadores também apresentaram melhorias significativas na tração por compressão diametral em comparação

às demais. O desempenho destas misturas expressa a maior ação ligante do cimento nos ensaios mecânicos.

Quanto à análise do desempenho ambiental, foram analisados 30 parâmetros nos extratos lixiviados e solubilizados das misturas estudadas e os valores foram comparados aos limites padrão (ABNT 2004a, b, c). De acordo com as prescrições da norma NBR 10004 (ABNT 2004c), todas as misturas testadas foram classificadas como Classe II-A – não perigosas e não inertes. Assim não apresentam características perigosas como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade (ABNT 2004a, b, c). Este resultado mostra que a BOFS não prejudica os compósitos à base de cimento em termos de contaminação ambiental.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental do uso de BOFS como ligante para estabilização de solos. De acordo com a metodologia proposta, as seguintes conclusões podem ser citadas:

• O processamento de BOFS através de separação magnética e intemperização neutralizou os efeitos expansivos nocivos de CaO, MgO e conteúdo metálico;

• O aumento no teor de finos do BOFS em até 20% reduziu a expansão e aumentou os valores de CBR do solo, devido à sua ação cimentante e ao efeito fíler;

• Nas misturas com dois estabilizadores, a BOFS foi responsável pela redução da expansão e aumento dos valores de CBR como resultado de sua ação cimentante, efeito fíler e compatibilidade com outros ligantes. A BOFS em associação ao cimento potencializou seu efeito, apresentando os melhores resultados mecânicos em comparação aos obtidos para estes dois estabilizadores separadamente (para o mesmo teor). Esta associação permitiu um consumo considerável de BOFS com um baixo consumo de cimento;

• Os testes ambientais não mostraram diferença de classificação entre as misturas com cimento, cal e finos de BOFS. Todos eles foram classificados como Classe II A – materiais não perigosos e não inertes. Assim, as misturas solo-BOFS, solo-cimento-BOFS e misturas solo-cal-BOFS são ambientalmente aceitáveis.

Dessa forma, o uso do BOFS é uma solução técnica e ambientalmente viável para a estabilização química de solos em pavimentos. Este material aumenta as propriedades mecânicas do solo e reduz o impacto nos ecossistemas causado pelos depósitos da escória. O teor ótimo de ligante observado foi de 15% em peso de finos de BOFS misturados com 5% em peso de cimento; entretanto, uma mistura com 20% em peso de BOFS e 5% em peso de cimento é recomendada para maximizar o consumo de BOFS dentro dos limites de desempenho.

AGRADECIMENTOS

Chamada Pública CNPq Nº 23/2018, Processo: 443822/2018-2, Programa Doutorado Acadêmico para Inovação – DAI. Os autores também agradecem à FAPEMIG, CNPq, Vertuos e UFOP pelo apoio para a realização e apresentação dessa pesquisa. Somos gratos ainda pela infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos - RECICLOS – CNPq.

REFERÊNCIAS

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (1982). "Terminology and paving classification." ABNT NBR 7207, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (1986). "Soil— expansion and California bearing ratio—Test method." ABNT NBR 9895, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2003). "Hydrated lime for mortars—Requirements." ABNT NBR 7175, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2004a). "Procedure for obtention leaching extract of solid wastes." ABNT NBR 10005, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2004b). "Procedure for obtention of solubilized extraction of solid wastes." ABNT NBR 10006, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2004c). "Solid waste—Classification." ABNT NBR 10004, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2011). "Concrete and mortar—Determination of tension strength by diametrical compression of cylindrical specimens." ABNT NBR 7222, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2012a). "Soilcement—Molding and curing of cylindric specimens—Procedure." ABNT NBR 12024, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2012b). "Soilcement—Simple compression test of cylindrical specimens—Method of test." ABNT NBR 12025, Rio de Janeiro, Brazil.

ABNT (Brazilian Association of Technical Standards). (2018). "Portland Cement - Requirements." ABNT NBR 16697, Rio de Janeiro, Brazil.

Ahmed, A. (2015). "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite." Appl. Clay Sci., 104, 27–35.

ASTM. (2007). "Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils." ASTM D1883, West Conshohocken, PA.

Cokca, E., Yazici, V., and Ozaydin, V. (2009). "Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement." Geotechn. Geol. Eng., 27(4), 489–499.

Diniz, D. H. (2009). "Influence of steelwork slag filler as stabilizer of soils for paving use." Federal Center of Technological Education of Minas Gerais State (CEFET-MG), Belo Horizonte, Brazil.

Gonçalves, D. R., et al. (2016). "Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag." Waste Manage. Res., 34(2), 107–112.

Goodarzi, A. R., and Salimi, M. (2015). "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag." Appl. Clay Sci., 108, 61–69.

Gutiérrez, A. S., Caneghem, J. V., Martínez, J. B. C. & Vandecasteele, C., 2012. Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. Journal of Cleaner Production, Volume 31, p. 126–136.

Holderby, E., and Cerato, A. B. (2011). "Field verification of stabilized soil strength." Geo-Frontiers Congress 2011, Dallas, TX, 2454–2463.

IAB (Brazil Steel Institute). (2015). "Sustainability report 2014." Brasília, Brazil.

Jayasree, P., Balan, K., Peter, L., and Nisha, K. (2014). "Volume change behavior of expansive soil stabilized with coir waste." J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001153, 04014195.

Machado, A. T. (2000). "Comparative study of test methods for expansibility evaluation of steelwork slags." Univ. of São Paulo, São Paulo, Brazil.

Masurero, A. B., Vilela, A. C., and Dal Molin, D. (2000). "Use of electric arc furnace slags as addition in concretes." National seminar in reuse/Recycling of industrial solid wastes, FIESP, São Paulo, Brazil.

Ministry of Transport. (2012). "Project for the revaluation of estimates and goals of the National Logistics and Transports Plan—Final report." SPNT/MT, Brasília, Brazil.

Miraoui, M., Zentar, R., and Abriak, N. (2012). "Road material basis in dredged sediment and basic oxygen furnace steel slag." Constr. Build. Mater., 30, 309–319.

Poh, H., Ghataora, G., and Ghazireh, N. (2006). "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines." J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE) 0899-1561(2006)18:2(229), 229–240.

Polettini, A., Pomi, R., and Stramazzo, A. (2016). "Carbon sequestration through accelerated carbonation of BOF slag: Influence of particle size characteristics." Chem. Eng. J., 298, 26–35.

Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B. K., and Fasihnikoutalab, M. H. (2015). "Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement." Transp. Geotech., 3, 24–35.

Punthutaecha, K., Puppala, A., Vanapalli, S., and Inyang, H. (2006). "Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers." J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(295), 295–306.

Raposo, C. O. L. (2005). "Experimental study of compaction and expansion of a basic oxygen furnace slag for paving use." Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brazil.

Rhode, L. (2002). "Electric arc furnace slag in granular layers of pavements—Laboratory study." Federal Univ. of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C. G., and Aza˜n´on, J. M. (2016). "Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators." Eng. Geol., 200, 10–17.

Zhang, T., et al. (2011). "Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag." Resour. Conserv. Recycl., 56(1), 48–55.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE EXTENSIVA COM INCORPORAÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA

Cristina Maria Monteiro[a]; Cristina Matos[b, c]; Cristina Santos[d], António Valente[c,e]; Ana Briga-Sá[f]

[a] (CBQF-Centro de Biotecnologia e Química Fina, Escola Superior de Biotecnologia - Universidade Católica Portuguesa, Rua Diogo Botelho, 1327, 4169-005, Porto, Portugal), cmonteiro@ucp.pt

[b] (CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental/UTAD -Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, Vila Real, Portugal), crismato@utad.pt

[c] ECT - School of Science and Technology, University of Trás-os-Montes and Alto Douro UTAD, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal

[d] (CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental/ FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal), csantos@fe.up.pt

[e] (INESC Technology and Science, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal), avalente@utad.pt

[f] (CQ-VR-Centro Química Vila Real/ UTAD-Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, Vila Real, Portugal), anas@utad.pt

RESUMO

A elevada impermeabilização das áreas urbanas está a transformar a gestão da água nas cidades, acarretando elevados problemas quer ambientais, quer económicos. Paralelamente, o aumento das temperaturas em ambiente urbano exige a implementação de infraestruturas que contribuam para a resiliência e sustentabilidade das cidades. Na última década, as Soluções baseadas na Natureza têm sido amplamente estudadas e apontadas como uma solução para mitigação destas situações em ambiente urbano, nomeadamente através de coberturas verdes cuja instalação potencia a utilização de uma área do edifício usualmente não aproveitada.

Apesar dos diversos estudos já desenvolvidos, as especificidades deste tipo de soluções e a necessidade de adaptação à zona climática justifica que se prossiga com a investigação neste domínio. Por outro lado, e atendendo ao surgimento no mercado de vários produtos e sistemas para as diferentes camadas de uma cobertura verde, nomeadamente no que respeita aos materiais que compõem a camada de substrato, mostra-se fundamental a realização de estudos que permitam aferir sobre o seu desempenho a nível térmico e hídrico. Uma caracterização mais aprofundada deste tipo de soluções disponíveis no mercado constituirá uma mais valia, não só para o aumento do conhecimento das propriedades do sistema proposto, mas também da sua influência na solução construtiva da cobertura a nível global.

Neste contexto, o trabalho aqui apresentado decorre de um protocolo estabelecido entre a empresa Leca Portugal SA, com o objetivo de analisar, em condições climáticas reais e sob monitorização, o impacto da instalação de um sistema de cobertura verde já disponível no mercado. No presente estudo pretende-se instalar, em duas células de teste, um sistema extensivo de Cobertura Verde (Leca®Nutrofertil Green Roof D) e uma cobertura de solução convencional, para análise e comparação das duas soluções no que respeita ao desempenho térmico, bem como à capacidade de retenção e detenção das águas pluviais, quando submetidas a condições climáticas reais, recorrendo para isso a

Internet of Things (IoT). O trabalho realizado até ao momento resultou na definição da arquitetura do sistema de monitorização que permitirá, através de sensorização e controlo à distância, analisar o desempenho energético e hídrico das duas soluções de cobertura.

Palavras-chave: Cobertura verde extensiva, gestão águas pluviais, desempenho térmico, estudo experimental, IoT, sustentabilidade urbana.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as cidades europeias têm vindo a ficar altamente impermeáveis dada a elevada densidade populacional e a necessidade de acomodar o aumento da população nos grandes centros urbanos. A elevada impermeabilização decorrente da densificação urbana tem vindo a substituir as zonas verdes naturalmente permeáveis, acarretando elevados desafios ambientais e económicos à escala urbana, nomeadamente ao nível da gestão das águas pluviais, impedindo a infiltração natural e recarga dos aquíferos. As alterações climáticas e os eventos climáticos extremos, cada vez mais frequentes, tornam situações de exceção (cheias) em situações recorrentes, o que acarreta diversos constrangimentos. Por outro lado, a remoção da vegetação nas grandes áreas urbanas e a utilização de materiais com elevada capacidade de armazenamento térmico contribui para o aumento das temperaturas à escala urbana, originando o chamado efeito de ilha de calor, para além do impacte verificado ao nível da redução da qualidade do ar. Ao nível do edificado, é sabido que os edifícios desempenham um papel preponderante no consumo de energia e na consequente emissão de gases de efeito de estufa. Atualmente, na Europa, os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia e 36% da emissão de CO_2, prevendo-se o seu aumento no futuro (Comissão Europeia, 2019), exigindo necessidade de intervenção imediata na implementação de soluções mais sustentáveis, eficientes e de menor impacte ambiental.

Neste sentido, e para superar estes desafios, a União Europeia adotou um conjunto de medidas, articuladas com a Comissão Europeia, que em conjunto têm como objetivo promover os benefícios ambientais, serviços dos ecossistemas, e aumentar os benefícios para a população e clima em ambiente urbano, numa perspetiva de reforçar a resiliência e sustentabilidade das áreas urbanas. Entre essas medidas destacam-se a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável das Nações Unidas e os seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), bem como O Pacto Ecológico Europeu. Entre os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável referidos na Agenda 2030, existem dois objetivos fortemente focados nas áreas urbanas e que a seguir se descrevem:

- ODS 11 – Tornar as Cidades e Comunidades Resilientes e Sustentáveis – que tem como objetivos principais (1) Construir cidades e sociedades sustentáveis em todo o mundo e (2) Reduzir o impacto ambiental adverso das cidades, prestando especial atenção à qualidade do ar e à gestão de resíduos.
- ODS 13 – Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos – apresentando como objetivos gerais (1) Fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação aos perigos e desastres naturais relacionados com o clima; (2) Integrar soluções e medidas de mudança climática nas políticas, estratégias e planeamento nacionais; e (3) melhorar a educação sobre mitigação das alterações climáticas.

Paralelamente, o Pacto Ecológico Europeu aponta como objetivos principais e números chave que a União Europeia (1) seja o primeiro continente com impacto neutro no clima até 2050; (2) reduza em pelo menos 55% as emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2030, comparando com os níveis de 1990; e (3) plante 3 mil milhões de árvores adicionais até 2030 (Comissão Europeia, 2019).

Assim, e como forma de contribuir para alcançar estes objetivos, as Soluções baseadas na Natureza (NbS) têm sido fortemente apontadas como uma solução de engenharia e construção para mitigação das alterações climáticas e dos problemas ambientais em áreas urbanas (Comissão Europeia, 2021; FEMA, 2021). As NbS promovem diversos benefícios ambientais, nomeadamente (1) a mitigação das ondas de calor e mitigação do efeito ilha de calor, (2) ajudam na gestão das águas pluviais em eventos extremos, minimizando os efeitos e prejuízos das inundações, (3) melhoram a qualidade do ar, e (4)

providenciam ecossistemas e habitats para pequenas espécies em ambiente urbano (FEMA, 2021; Enzi *et al*, 2017). Existem diferentes NbS que podem ser instaladas em ambiente urbano, nomeadamente parques, árvores urbanas, Coberturas Verdes, jardins verticais e valas de retenção (EEA, 2021). Ao nível do edificado, as Coberturas Verdes são as NbS urbanas mais utilizadas dados os benefícios que apresentam. São instaladas nas coberturas, utilizando uma zona que usualmente não é aproveitada, potenciando assim os benefícios das NbS à escala urbana (Palla *et al*, 2010). Estas apresentam-se como uma técnica construtiva que consiste na instalação de vegetação sobre uma laje estrutural utilizando um sistema multicamada (Figura 1). Existem essencialmente 3 tipologias de Coberturas Verdes, que se distinguem essencialmente pela altura de substrato. São elas: (1) Coberturas Verdes extensivas (com espessura do substrato até 20 cm); (2) Coberturas Verdes semi-intensivas (com espessura de substrato que varia entre 12-25 cm); e (3) Coberturas Verdes intensivas (com espessura de substrato superior a 25 cm) (Santos *et al*, 2022).

A instalação de Coberturas Verdes em ambiente urbano, devido ao seu sistema multicamada, permite não só melhorar a gestão das águas pluviais em eventos pluviométricos extremos, mas também melhorar o desempenho térmico dos edifícios. Relativamente à gestão das águas pluviais em condições climáticas extremas, as Coberturas Verdes retêm parte da água da chuva no seu sistema multicamada, principalmente nas camadas de substrato e drenante, permitindo assim diminuir a quantidade de água pluvial que é reencaminhada para os sistemas de drenagem, e desta forma, melhorar a gestão das águas pluviais em ambiente urbano, minimizando as situações de cheias e inundações (Liu *et al*, 2019). No que respeita ao desempenho térmico, as Coberturas Verdes promovem um melhor isolamento térmico no edifício, conduzindo à diminuição das flutuações de temperatura e humidade relativa do ar no interior dos edifícios. Devido ao seu sistema multicamadas, as Coberturas Verdes contêm perdas de calor, no inverno, e evitam, no verão, o sobreaquecimento dos edifícios onde são instaladas (Bevilacqua *et al.*, 2017), diminuindo assim custos energéticos. De acordo com Moghbel *et al.* (2017) o interior de edifícios que possuem Coberturas Verdes instaladas apresentam uma temperatura do ar menor ou moderada, quando comparada com edifícios construídos com coberturas revestidas a telha. O autor Berardi *et al.* (2014) indicou três fenómenos principais envolvidos na dinâmica térmica das Coberturas Verdes-Edificado: (1) a vegetação, através do processo de fotossíntese e evapotranspiração, reduz a temperatura na envolvência; (2) a vegetação absorve energia térmica e promove o sombreamento, protegendo a camada de substrato de acumular a radiação solar; (3) a camada de substrato funciona como uma camada protetora, com elevada capacidade térmica e baixa transferência de calor, promovendo assim um elevado isolamento térmico do edifício.

Neste sentido, a utilização de soluções construtivas mais sustentáveis em substituição das correntemente utilizadas, como é o caso das Coberturas Verdes, poderá simultaneamente trazer benefícios, não só ao nível do edifício em particular, mas também à escala urbana.

Para que o sistema de Cobertura Verde seja o mais eficiente possível, tanto a nível hídrico como térmico, é necessário prosseguir com a investigação científica experimental neste domínio com vista ao estudo do seu desempenho para diferentes condições climáticas, nomeadamente no clima Mediterrâneo como o de Portugal, bem como estudar diferentes configurações e materiais constituintes.

Pretende-se com este trabalho contribuir para o conhecimento neste domínio através da realização de trabalho experimental, em condições climáticas reais, avaliando o desempenho a nível hídrico e energético de um tipo de Cobertura Verde extensiva com incorporação de argila expandida, recorrendo para isso a um sistema de instrumentação e monitorização baseado em ferramentas de

IoT. O recurso a ferramentas de IoT mostra-se, atualmente, fundamental para instrumentar, monitorizar e controlar o funcionamento dos sistemas, existindo diversos dispositivos de baixo custo e de fácil utilização que podem ser instalados para permitir acompanhar o desempenho dos sistemas.

No presente estudo pretende-se instalar um sistema experimental de Cobertura Verde de tipologia extensiva, denominado Leca®Nutrofertil Green Roof D, numa cobertura teste de 4m^2 no Campus da UTAD-Vila Real, exposto a condições ambientais reais da região. A instalação da célula teste de Cobertura Verde terá como objetivo final a análise do desempenho térmico do sistema, bem como a capacidade de gestão de águas pluviais, avaliando o potencial de retenção/escoamento da água da chuva em eventos extremos de pluviosidade, quando comparada com uma cobertura metálica convencional. Desta forma, pretende-se futuramente demonstrar os benefícios da instalação de Coberturas Verdes em ambiente urbano, e contribuir para promover uma maior aplicação deste sistema construtivo nas grandes áreas urbanas.

Nesta fase, pretende-se apresentar a metodologia experimental aplicada, com especial ênfase na caracterização da cobertura verde a instalar e na instrumentação e monitorização das células de teste recorrendo a ferramentas IoT.

2 CASO DE ESTUDO

O presente trabalho de investigação desenvolve-se no campus da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, recorrendo para isso a duas células de teste aí existentes, com 4 m^2 de área útil, anteriormente construídas com o objetivo de analisar o desempenho energético e hídrico de diferentes soluções construtivas de cobertura quando sujeitas a condições climáticas reais. A adequação destas infraestruturas aos trabalhos a desenvolver pressupõe a instalação da Cobertura Verde extensiva em estudo numa das células de teste. Na outra célula de teste, mantém-se o sistema de cobertura existente relativo a uma cobertura em chapa metálica e que servirá de referência na análise dos resultados. Para avaliar o desempenho das duas soluções construtivas de cobertura em análise, proceder-se-á à instrumentação e monitorização de diversos parâmetros, tal como a seguir se indica.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA VERDE EXTENSIVA

A Cobertura Verde em estudo é de tipologia extensiva, com uma altura de substrato de 15 cm, e 4m^2 de área. O Sistema de Cobertura Verde, denominado kit Leca®Nutrofertil Green Roof D, desenvolvido numa parceria entre a Leca, SA, Portugal e a Nutrofertil, é disponibilizado pela Leca, SA, Portugal. O kit Leca®Nutrofertil Green Roof D é constituído por um sistema multicamada, e será instalado de acordo com as recomendações do fornecedor que, por sua vez, seguem as recomendações alemãs para construção de coberturas verdes (FLL Guidelines, 2008). Na Figura 1 apresenta-se o pormenor construtivo da Cobertura Verde em estudo, sendo identificadas as diversas camadas que a constituem.

Para que o sistema construtivo multicamada de Cobertura Verde apresente um elevado desempenho, tanto a nível hídrico como a nível térmico, cada camada tem uma função específica, nomeadamente:

- Camada de proteção: é constituída por manta geotêxtil Ecofelt PES-SB300 (fibras de poliéster recuperadas); tem como função proteger contra danos mecânicos a camada de impermeabilização ou isolamento térmico, além de reter água que escorre das camadas superiores; a espessura desta camada é entre 1- 2mm;
- Camada de drenagem: é constituída por Leca®D (agregados leves de argila expandida); tem como função absorver o excesso de água da chuva não retida pelo substrato drenando-a para

as caleiras após atingir a capacidade de retenção; a altura desta camada é definida de acordo com os objetivos de cada caso de estudo, sendo que no presente será instalada com uma altura de 15 cm, para que o sistema apresente uma elevada capacidade de retenção;

- Camada de filtro: é constituída por manta geotêxtil Ecofelt PES-SB150 (fibras de poliéster recuperadas); tem como função impedir a passagem de finos da camada de substrato e vegetação para a camada drenante; a espessura desta camada é entre 1- 2mm;
- Camada de suporte da vegetação (ou substrato de crescimento): é constituído por Nutreasy (substrato constituído por composto orgânico, turfa, casca de pinho 4/15 e argila expandida Leca®Hydro); tem como função fornecer a área de suporte para as raízes da vegetação instalada bem como fornecer água e nutrientes; dado que se trata de uma Cobertura Verde extensiva, a altura desta camada será de 15 cm.

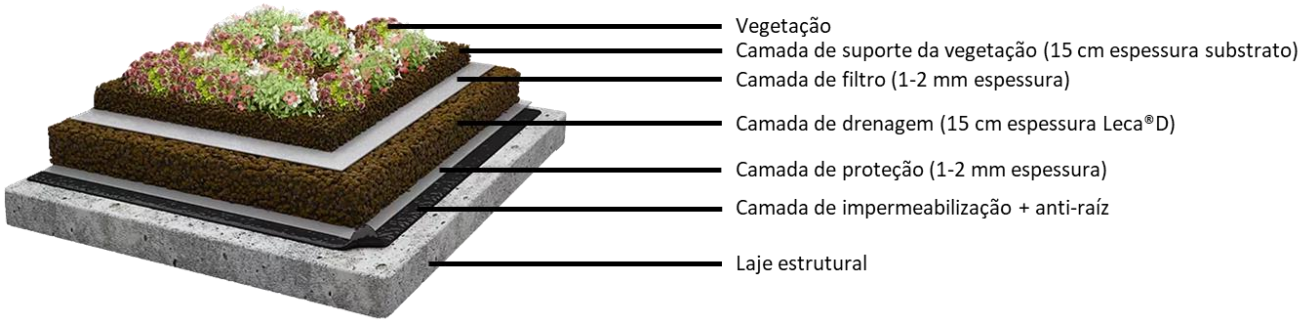


Figura 1 – Caracterização construtiva da Cobertura Verde em estudo (Fonte: www.leca.pt).

A seleção das várias espécies de vegetação a instalar terá em conta características específicas para que a manutenção seja reduzida e a resistência às condições adversas seja elevada, nomeadamente: (1) serem nativas da região (e por isso apresentarem uma elevada capacidade de resistência e sobrevivência às condições climáticas da região); (2) necessitarem de baixa manutenção e (3) serem espécies rasteiras e de baixo porte. Além disso, irá preferencialmente escolher-se plantas que além de ornamentais possam ter outros usos, nomeadamente as aromáticas de baixo porte. Irá ser instalado um sistema de rega automático, que será ativado sempre que se verifique necessidade de rega do sistema (temperatura do ar elevada no período de verão) e níveis baixos de teor de humidade do substrato.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORIZAÇÃO

Tal como foi referido anteriormente, as duas células de teste serão instrumentadas e monitorizadas para que se possa avaliar o desempenho hídrico e térmico das duas soluções construtivas, bem como a sua influência nas condições de conforto interior de cada célula de teste. Assim, irão ser instalados diversos instrumentos de monitorização (pluviómetros, sondas térmicas e de teor de humidade), tanto nas diferentes camadas que constituem o sistema de cobertura como no interior de cada uma das células de teste (sondas de temperatura e humidade relativa do ar), permitindo a análise da influência de cada uma das soluções no conforto higrotérmico interior. Pretende-se que o período de medição dos diversos parâmetros abranja pelo menos dois anos, contemplando assim os períodos da estação de aquecimento e de arrefecimento.

Apresenta-se, na Figura 2, o desenho esquemático das duas células de teste e das respetivas soluções de cobertura, sendo também indicada a localização pretendida para os diversos sensores.

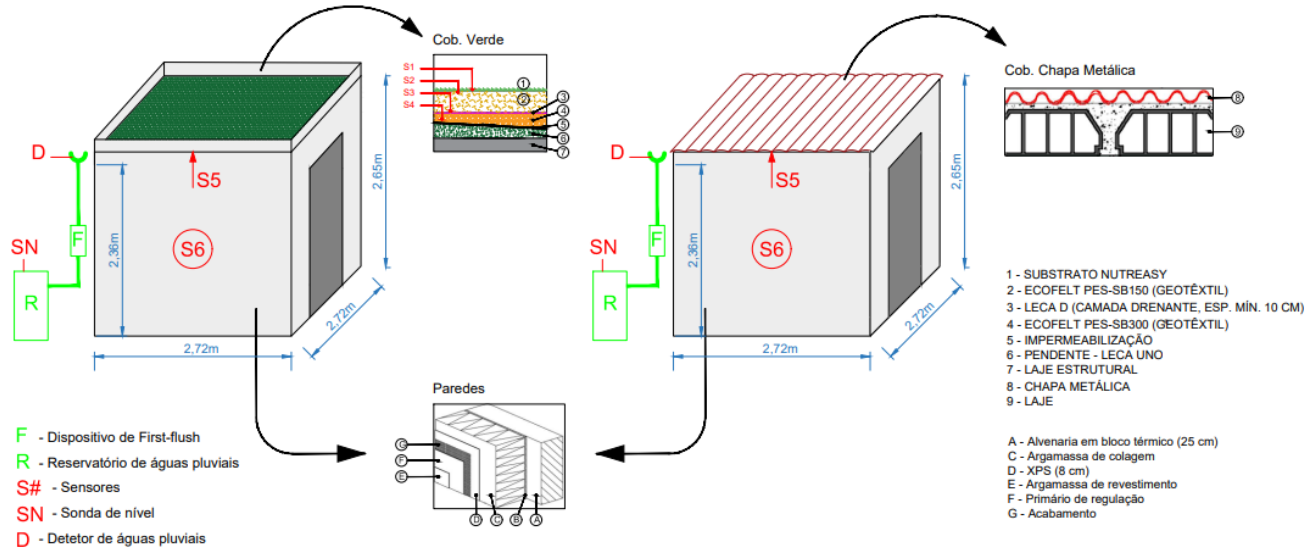


Figura 2: Desenho esquemático das Células de Teste e do respetivo sistema de monitorização.

Na Figura 3 sintetiza-se de forma esquemática a metodologia aplicada para permitir o desenvolvimento do trabalho experimental e a consequente avaliação do desempenho térmico e hídrico da Cobertura Verde, analisando os seus benefícios face a soluções de cobertura convencionais.

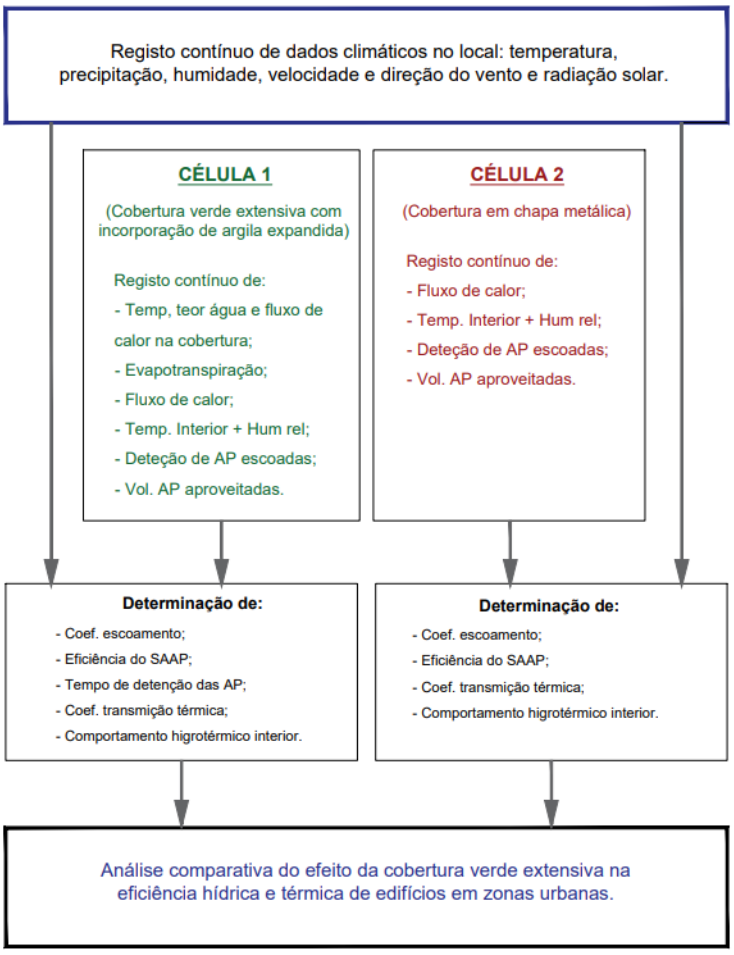


Figura 3: Esquema metodológico de monitorização e análise.

No que respeita a trabalho experimental que envolva sistemas de instrumentação e monitorização, o recurso a ferramentas de IoT revela-se fundamental na garantia da aquisição de dados e do correto funcionamento do sistema implementado, para além de se mostrar extremamente importante a visualização, à distância, dos dados recolhidos pelos diferentes sensores. Neste sentido, foi necessário proceder ao levantamento dos diversos tipos de sensores existentes no mercado e respetiva seleção, para além da definição do sistema de recolha e de transmissão de dados à distância. A escolha do sistema teve como pressupostos o custo reduzido de aquisição e a redução no consumo de energia associado ao seu funcionamento.

A definição da arquitetura do sistema de monitorização e a aquisição de todos os elementos que dela fazem parte devem ser criteriosamente definidos para que o trabalho experimental decorra de acordo com o espectável e permita a leitura dos resultados da medição em contínuo, de forma fácil e à distância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O principal resultado do trabalho desenvolvido até ao momento diz respeito à definição da arquitetura do sistema de monitorização, que se apresenta na Figura 4. O sistema proposto é composto por diversos sensores (cujas características estão apresentadas na Tabela 1) colocados nas diversas camadas da cobertura, no interior e no exterior das células de teste. Esses sensores estão ligados a módulos com transmissão de dados sem fios utilizando o protocolo LoRaWAN.

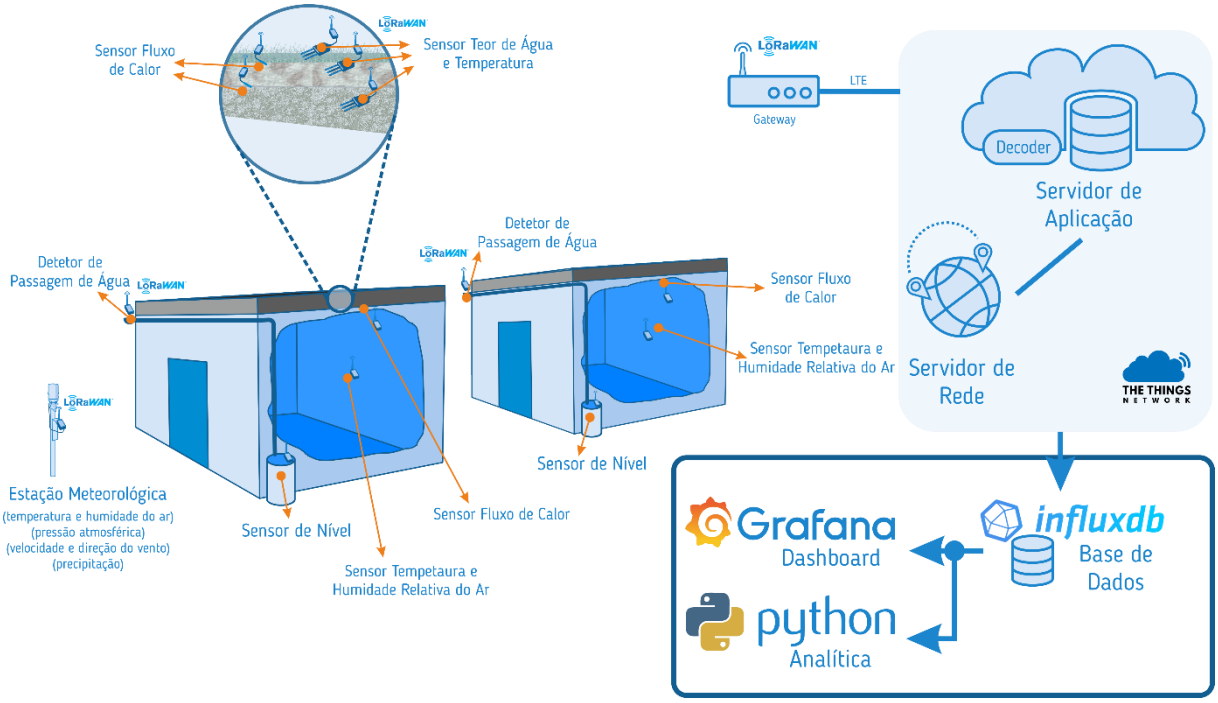


Figura 4: Arquitetura do sistema de monitorização.

Tabela 1: Características dos sensores utilizados.

Dispositivo	Variável Medida	Gama de Medição	Precisão	Resolução
Estação Meteorológica	Temperatura do Ar	-40~85°C	±0.1℃	0.01°C
	Humidade Relativa do Ar	0~100%R	±1.5%	0.01%
	Pressão Atmosférica	300~1250hPa	±50Pa	10Pa
	Velocidade do Vento	0~60m/s	±0.3m/s(≤10m/s); ±3%(10m/s~50m/s) ±5%(>50m/s)	0.1m/s
	Direção do Vento	0~360°（@-40℃~60℃）	±3.0°	0.1°
	Intensidade Luminosa	0~188000Lux	5% da leitura	5Lux
	Pluviosidade	0~200mm/h	±10%	0.2mm/0.02mm
Teor de Água e Temperatura	Teor de Água	de 0% a 100% da saturação	±2% (0 to 50 %) ; ±3% (50 to 100 %)	0.03 %(0 to 50%); 1%(50 to 100%)
	Temperatura	-30 ℃ a +70 ℃	±0.5 ℃	0.1 ℃
Sensor de Nível (Ultrassons)	Distância à coluna de água	28 cm a 750 cm		1mm
Temperatura e Humidade Relativa do Ar (Sensirion SHTC3)	Temperatura do Ar	-40° C a +125° C	±0.2° C	0.01° C
	Humidade Relativa do Ar	0% a 100%	±2.0%	0.01%
Detetor de Passagem de Água	Deteta a passagem de água (ON/OFF)	-	-	-
Sensor de Fluxo de Calor	Fluxo de Calor (Módulo Termoelétrico TEM)	-2000 a +2000 W/m²	±4.0%	0.15 W/m²

No que diz respeito à medição das condições climáticas exteriores, será colocada uma estação meteorológica junto às células de teste, permitindo medir valores de intensidade de radiação solar, temperatura e humidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e precipitação.

A variação das condições de ambiente interior das células de teste será medida através da colocação de sensores de temperatura e de humidade relativa do ar, permitindo analisar o impacto de cada uma das soluções de cobertura no conforto higrotérmico interior.

Diversos sensores estão previstos para a medição de parâmetros associados à gestão da água em cada uma das soluções. Para análise da eficiência hídrica serão instalados, em cada uma das coberturas, um detetor de passagem de água para deteção do início do escoamento superficial e um sensor de nível de água no reservatório de cada uma das células para determinação do volume correspondente à precipitação eficaz.

Para a medição de temperatura e de fluxo de calor serão colocados sensores ao nível da cobertura, em diferentes camadas, para caracterização do desempenho térmico da cobertura. Especial atenção será dada à camada de substrato em argila expandida no que respeita ao registo da temperatura e do teor de água. A monitorização destes parâmetros permitirá determinar o coeficiente de transmissão térmica, bem como caracterizar a flutuação de temperaturas e de teor de água nas diferentes soluções de cobertura. Na camada de substrato/vegetação da Cobertura Verde serão também colocados sensores de teor de água..

A aquisição de dados será efetuada em contínuo e decorrerá durante dois anos. O sistema de monitorização permitirá a visualização gráfica da variação dos diversos parâmetros medidos, bem como a identificação de situações de funcionamento irregular dos aparelhos de medição.

Deste modo, o sistema deverá ter comunicação sem-fios entre os nós sensores. Dos protocolos possíveis de serem utilizados destacam-se o *WiFi* (IEEE 802.11), o *ZigBee* (IEEE 802.15.4) e, mais recentemente, o *LoRaWAN (LoRa Alliance)*. A escolha, considerando os pressupostos do sistema (baixo-custo e baixo consumo), recaiu no protocolo *LoRaWAN* pois é de longo alcance e de muito baixo consumo, além do reduzido custo, tanto no hardware como nas comunicações (não necessita de uma subscrição numa operadora para cada nó sensor).

Os diversos sensores enviam os valores das medições, via comunicação sem fios LoRaWAN, para a *gateway* que fará a ligação dos dados para um servidor global (T*heThingsNetwork*). Um servidor local (UTAD) acede aos dados e armazena-os na base de dados (*InfluxDB*), podendo estes ser, posteriormente, tratados (ex. utilizando *Python*) ou visualizados num *dashboard* (*Grafana*). Os nós dos sensores a implementar têm em conta todos os parâmetros necessários para elaborar o estudo do desempenho das coberturas a realizar neste estudo.

4 CONCLUSÕES

A instalação de uma Cobertura Verde em substituição das soluções construtivas de cobertura comumente usadas nos edifícios resulta em diversos benefícios, não só ao nível do edifício, mas também à escala urbana, destacando-se o seu impacto na gestão da água e na melhoria do desempenho energético dos edifícios, e na redução do efeito de ilha de calor.

São diversas as variáveis influenciadoras do desempenho de uma Cobertura Verde, desde as características inerentes à sua composição, como é o caso do tipo e espessura do substrato e da vegetação utilizada, até às condições climáticas do local em que esta se encontra instalada. Neste

sentido, as especificidades associadas a este tipo de solução justificam o desenvolvimento de trabalhos que permitam a análise do desempenho de diferentes soluções, sujeitas a diferentes condições climáticas.

O trabalho desenvolvido permitiu definir a arquitetura do sistema de monitorização com recurso a ferramentas de IoT capaz de efetuar a medição em contínuo de diferentes parâmetros influenciadores e caracterizadores do comportamento hídrico e térmico de uma cobertura extensiva com incorporação de argila expandida. A utilização deste tipo de ferramentas mostra-se essencial para uma instrumentação, monitorização e controlo mais eficientes do desempenho do sistema à distância, para além de demonstrar ser possível a instalação de um sistema de baixo custo e com baixo consumo de energia de instalação.

Apesar de este trabalho de investigação se encontrar ainda numa fase inicial, a definição da arquitetura do sistema de instrumentação, monitorização, controlo e transmissão de dados à distância exige algum tempo para a escolha dos sensores e dos dispositivos utilizados, bem como das ferramentas a utilizar na transmissão e tratamento de dados, principalmente quando se pretende que o sistema desenvolvido seja de utilização simples, de baixo custo e replicável para situações futuras.

Os resultados obtidos através da implementação do sistema de monitorização permitirão analisar o desempenho da Cobertura Verde em estudo no que respeita ao uso e gestão da água e de energia, e comparar o seu comportamento com o obtido numa solução de cobertura convencional.

Concluiu-se ainda que a arquitetura do sistema definida para implementação é facilmente replicável para outras situações, sendo uma mais valia na realização de trabalhos experimentais, permitindo a aquisição à distância de séries de dados para posterior tratamento e aplicação de modelos de previsão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CQ-VR (UID/QUI/00616/2013 e UID/QUI/00616/2019). Agradece-se à empresa Leca Portugal SA o fornecimento dos materiais constituintes do sistema Leca®Nutrofertil Green Roof D.

REFERÊNCIAS

Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. and GhaffarianHoseini, A. (2014) State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. Applied Energy, 115: 411-428. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047

Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R., and Arcuri, N. (2017) Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. Energy and Buildings, 150: 318-327. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.081

EEA. Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction—EEA report n°01/2021. EEA, Copenhagen K, Denmark. https://doi.org/10.2800/919315

Enzi, V., Cameron, B., Dezsényi, P., Gedge, D., Mann, G. and Pitha, U. (2017) Nature-Based Solutions and Buildings – The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity.] In: Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., Bonn, A. (eds) Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_10

European Comission. (2021) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. In: Forging a Climate- Resilient Europe - The New EU Strategy on Adaptation to Climate. Brussels: European Commission.

FEMA. (2021). Building community resilience with nature-based solutions—A guide for local communities.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftshaue). (2008). Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing—Green Roofing Guideline; Landscape Development and Landscape Research Society: Bonn, Germany.

Liu, W., Feng, Q., Chen, W., Wei, W., Deo, R. C. (2019) The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. Journal of Hydrology, 569: 230-238. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066

Moghbel, M., Salimb, R. (2017) Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO2 content. Urban Climate, 20: 46-58. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.012

Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G., (2010) Green, Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. Water, 2: 140–154. https://doi.org/10.3390/w2020140

Santos, C., Monteiro, C.M. (2022) Chapter 8: Green Roofs influence on Stormwater quantity and quality: a review. In: Urban Green Spaces, Rui Alexandre Castanho and José Cabezas Férnandez (Eds). IntechOpen. ISBN: 978-1-80355-157-9. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.101952

Links:

European Green Deal – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt (consultado em 26/04/2024)

European Commission. (2019) Energy performance of buildings directive. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. (consultado em 26/04/2024)

ODS 11 – https://ods.pt/objectivos/11-cidades-e-comunidades-sustentaveis/ (consultado em 26/04/2024)

ODS 13 – https://ods.pt/objectivos/13-combater-as-alteracoes-climatericas/ (consultado em 26/04/2024)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Elaboração de Objetos de Terra Crua para Ambientes Internos Sob a Perspectiva do Design Science Research

Thais Costa Almada[a]; Aloísio Leoni Schmid[b]

[a] PPGEC (Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, 81531-980-DAU, Curitiba, PR, Brasil), thaisalmada2@gmail.com

[b] PPGEC (Universidade Federal do Paraná, C.P. 19011, 81531-980-DAU, Curitiba, PR, Brasil), iso@ufpr.br

RESUMO

Este manuscrito apresenta de forma abreviada os resultados de uma pesquisa que abordou o processo de produção da técnica de construção em terra crua como uma das soluções possíveis na redução dos impactos ambientais da construção. Com foco metodológico em *Design Science Research* (DSR), a pesquisa teve o objetivo de definir o processo construtivo visando o seu uso nos interiores da arquitetura a partir de três critérios, a saber, a economicidade, a qualidade visual ea reciclabilidade. O processo foi aplicado, registrado e avaliado para a confecção de dois diferentes objetos: parede e porta-vasos. Foram, nas duas aplicações, preparadas diferentes amostras de terra e selecionadas quanto a sua maleabilidade e texturas quais verificadas empiricamente. Depois, foram avaliadas as peças produzidas. Os resultados apresentados foram satisfatórios do ponto de vista do domínio dos aspectos tecnológicos de importância para a obtenção de produtos conforme critérios elencados. Sugere-se numa próxima etapa a caracterização detalhada dos solos e da resistência mecânica dos objetos obtidos.

Palavras-chave: Design nce Research, Terra Crua, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

Impactos ambientais da construção de edifícios vêm sendo reconhecidos com frequência (GALLIPOLI et al. 2017), sobretudo no período a partir de meados do séc. XX (FRANKE, 2017) quando a atividade de construção civil tornou-se responsável por cerca de 40% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PNUD 2012, apud VALPORTO e AZEVEDO, 2016), urgindo a necessidade de maior racionalidade no uso dos materiais e energia (HEISE, 2004; CARVALHO; LOPES, 2012; FRANKE, 2017).

Nesse contexto, a construção com terra crua atrai novo interesse, por ser abundante e reciclável (BERGE, 2009; PAZ, 2015), além dos seus aspectos particulares de resistência ao fogo, à podridão e aos xilófagos, da mesma forma considerando o bom desempenho térmico e acústico.

Entretanto, existem barreiras ao uso da terra crua, devido a baixas resistências a compressão, tração e abrasão por jatos d'água. Nestes casos a solução recorrente é o uso de cimento como estabilizante (GOUTSAYA et al., 2021). Contudo, esta solução se inviabiliza pelo baixa reciclabilidade do cimento, seu alto consumo energético (cerca de 1,5 kWh por Kg) e alta liberação de CO_2 qe chega a proporção de 1kg por kg (MORSY et al., 2022). Logo atenuar seu uso aumenta a qualidade do ar do planeta (SILVA, 2000).

O contexto apresentado traz, porém, um duplo desafio:

- Como obter economicidade nos processos em que os custos são 5% mais altos do que nas construções em madeira, devido à componente mão de obra (WALKER et al., 2003).
- Como obter qualidade visual (compreendida pela regularidade, conformidade dimensional e ausência de fissuras) utilizando-se de processos básicos de seleção, preparação e mistura de componentes (MINKE, 2006; NEVES; FARIA, 2011) de modo a evitar a estabilização por uso de cimento?

O enfoque nos interiores da Arquitetura, se deu pela por questões de escala, por demandarem menores resistências mecânicas e menor emprego de mão de obra especializada.

Ressalta-se que umaa caracterização detalhada e quantitativa dos solos empregados nos respectivos objetos não foram foco neste estudo, pois o problema fundamental foi evidenciar "qual o melhor caminho na construção em Terra Crua para interiores de Arquitetura, atendendo as premissas de economicidade, qualidade visual e reciclabilidade? O objetivo era recriar na prática, um processo de simples reprodutibilidade, em seu ciclo integral, na construção de objetos com a técnica de Terra Crua, elencando variáveis e analisando abdutivamente , mesmo que sem generalização estatística. .

A recriação foi pensada de modo a elencar e caracterizar as variáveis envolvidas e analisar as relações de causa e efeito

2 MÉTODO

Diante do exposto, adotou-se a metodologia criada nos anos 1960, por Herbert Simon que focava em conferir ao processo criativo o rigor praticado nas principais tradições científicas. Teve sua obra *The Sciences of the Artificial* (SIMON, 1969) reconhecida. Desde então, o paradigma do *Design Science Research* ou *Ciência do artificial* (DRESCH et al., 2013; SANTOS, 2018). Vem crescendo em diversas áreas, principalmente nas Ciências da Informação(RODRIGUES, 2018). Mais do que respostas de como o mundo funciona, o foco deste paradigma é propor e testar como o mundo deveria funcionar, a partir da criatividade e implementação do artificial (RODRIGUES, 2018; LACERDA et al., 2013 e BAX,

2015).Cientistas continuam praticando a ciência tradicional com seus métodos habituais. Porém, dentro de uma hierarquia maior:

- numa etapa inicial, o artefato é projetado com base em pesquisa bibliográfica de síntese dos temas relacionados, desenvolvendo conhecimentos técnicos, epistemológicos e metodológicos com uma rigorosa avaliação empírica (PIMENTEL e FILIPO, 2020), levando a um raciocínio abdutivo (WORDNIK, 2023).

- depois, vêm os testes do artefato com métodos da ciência tradicional: estudo de caso, survey, experimento.

- por fim, a etapa de avaliação da utilidade dos artefatos (WIERINGA, 2009) e realimentação do projeto.

Para investigar e desenvolver o uso de artefatos, métodos convencionais mostraram-se insuficientes, pois existem diferenças fundamentais entre a investigação de fenômenos naturais ou sociais e a investigação intencionalmente direcionada à resposta de um problema prático pela elaboração de artefatos (BAX 2015; DRESCH 2018; SANTOS; 2018; KAIZER; CUNHA, 2019; PIMENTEL et al., 2020).

A pesquisa sobre possibilidades de construção de soluções, em detrimento de métodos que buscam entender os fenômenos como realmente são, configura a Design Science Research.

O significado de artefato que, por vezes, no Design é relegado ao plano do objeto concreto, em DSR é mais amplo. Assim, a estruturação do conhecimento de um processo de produção também pode ocupar o foco do estudo e da aprimoração: um artefato que produz artefatos (VILELA, 2019). Na presente pesquisa, *artefato* não se limita aos objetos concretos fabricados (parede de terra-crua e o porta-vasos), sendo um artefato o conhecimento d*o processo de construção com terra crua para uso em interiores da Arquitetura*.

3 PESQUISA BICLIOGRÁFICA

A taipa de pilão, conhecida em francês como *terre pisée* ou em inglês como *rammed earth*, foi dentre as possibilidades, a técnica mais adequada *ao propósito*. Nela, o dimensionamento correto das quantidades de cada material é um dos parâmetros fundamentais (HEISE, 2004).

A compactação do material diminui a taxa de retração enquanto aumenta a resistência mecânica, denotando maior durabilidade (MINKE, 2006). Os blocos monolíticos compactados (JALALI; EIRES 2008) resultam de uma mistura homogeneizada de areia, silte, argila e água (GOMES et al. 2014). O percentual ideal de redução de volume do material pela compactação é de 60% do seu volume inicial (HEISE, 2004).

São fatores essencialmente críticos a seleção e a preparação de um solo apropriado (JALALI; EIRES, 2008). A porcentagem mínima de argila e saibro é de 20% a 25% e a máxima de 30% a 35%. A porcentagem mínima de areia fica entre 50 e 55%, enquanto que a máxima entre 70% a 75% (WALKER et al. 2003). Quanto à quantidade de água, é limitada para que a mistura não seja nem muito seca, o

que impediria a compactação, nem muito úmida (SILVA, 2000), caso no qual as partículas de argila se expandem e comprometem a compactação.

David Easton (1996) em seu livro The Rammed Earth Houses comenta o procedimento elaborado por George F. Middleton em 1953 para a verificação simples, no canteiro da obra, da umidade da mistura do material. Uma porção do material, é compactada nas mãos até que forme um volume, que em seguida é solto da altura de 1 m do chão. O ponto ideal de umidade, segundo esse teste, acontece quando a amostra se assenta formando um cone ou pirâmide. Caso não se molde ao ter contato com o chão, está muito seca, caso se espatife está muito úmida.

Durante a fase de levantamento bibliográfico, esta e outras instruções foram incorporadas de uma publicação do programa de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento (CYTED) pertencente à Rede Ibero-americana PROTERRA (NEVES et al., 2005-2010). Essas instruções compreendem explicações científicas com demonstrações de propriedades e análises laboratoriais, redigidas na forma de um manual para a realização de testes simples em campo.

Para Minke, (2006, p. 22) os testes simples de campo, apesar de não apresentarem exatidão em dados, “são exatos o suficiente para estimar a composição da carga e se a mistura é aceitável para uma aplicação específica”.

Com base nessas informações, estabeleceu-se como *artefato* o processo de construção de objetos em taipa de pilão. Esse artefato foi testado e experimentalmente na fabricação de dois objetos distintos.

4 PRIMEIRA APLICAÇÃO: PAREDES AUTOPORTANTES

Como primeira experimentação, em meados de 2018 foi promovida uma oficina de taipa de pilão, ministrada pela arquiteta Ana Veraldo (MS), que faz parte da Rede PROTERRA. Direcionada a arquitetos e estudantes, e com apoio do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), esta oficina contou com o processo de produção de duas paredes com as dimensões de 100 cm x 20 cm x 75 cm (L x A x P) em taipa de pilão, sendo uma sem estabilizante e outra com adição de cimento. Objetivou-se identificar possíveis não conformidades durante o processo descrito na literatura, à partir da avaliação das paredes quanto ao comportamento higroscópico (secagem), resistência e erosão em ambiente coberto.

O primeiro contato dos participantes com a matéria-prima deu-se pela realização do teste de Carazás (Figura 1), que aponta o melhor “ponto de massa” através de diferentes procedimentos. Consiste em um tabuleiro onde no eixo X, é representada uma escala de umidade da terra com os graus seco, úmido, plástico, viscoso e líquido. No eixo Y, as operações compactar, pressionar e preencher. Para melhor visualização das etapas referentes à oficina, apresenta-se um fluxograma do processo (Figura 2).

Figura 1: Exemplo de Resultados-Teste Carazás. Fonte: Moura (2018).

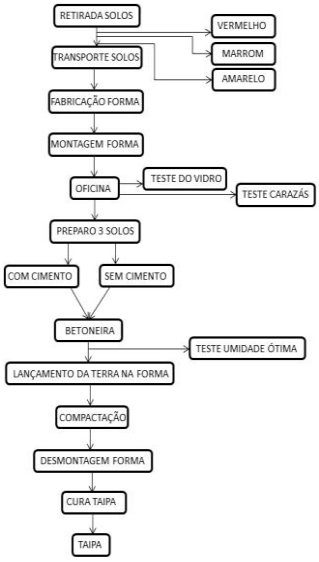


Figura 2: Sequência para construção da taipa de pilão externamente. Adaptado de Proterra (2005)

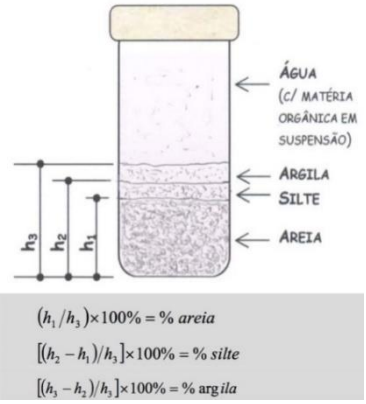


Figura 3: Fórmula das proporções dos grãos (PROTERRA, 2005)

Figura 4: Amostras preparadas, Moura (2018)

Resultado (areia, silte, argila)

1- vermelho (75%,15%, 10%)

2-marrom (58%, 25%, 16%)

3 amarelo (60%, 20%, 20%)

A mistura do solo foi feita em uma caixa no chão para depois ser colocada dentro da betoneira em ambiente descoberto do lado de fora da edificação. A quantidade de mistura utilizada para fazer uma camada da parede com cimento foi de 0,08 m³ de terra para 0,0014 m³ de cimento e 200 ml de água. Para a parede sem cimento, somente 0,08 m³ de terra com 200 ml de água. A umidade ótima da mistura foi verificada. Os alunos fizeram o procedimento descrito por David Easton (1996) e quando obtiveram um bom resultado, despejaram a mistura nas formas para a compactação, que foi realizada em pilão manual.

As formas foram realizadas de compensado naval com 2 cm de espessura obedecendo às medidas de 90 cm (comprimento) x 20 cm (largura) x 75 cm (altura). O processo de desmoldagem foi executado conforme Heise (2004).

As paredes apresentaram rachaduras e desgastes, fato que supostamente relacionava-se a inconformidades encontradas durante o processo decorrido na oficina, na armazenagem, peneiramento e período de cura.

Figura 5: Medição das paredes em 22/05
sem cimento (esquerda) e com cimento (direita).

A figura 5 apresenta registro fotográfico das duas paredes construidas Pode-se discorrer a respeito que a as duas paredes apresentaram problemas quanto a sua qualidade visual :

a) Ambas as paredes sofreram retração, erosão ou trincas;

b) a parede sem cimento sofreu menor retração e apenas duas trincas;

c) A observação da construção das paredes foi determinante para abstrair-se da necessidade de implementação de melhorias no fluxograma e nos protocolos das etapas do processo produtivo realizado;

Acredita-se que as erosões e trincas tenham ocorrido em parte por influência da alta movimentação em torno das paredes em seu período inicial de cura e secagem, enquanto as retrações podem ser explicadas pela perda de água, que no caso da parede com estabilização cimentícia foi mais importante.

Após o conhecimento adquirido com o primeiro objeto, elaborou-se um novo fluxograma (Figura 6) em que seguimos rigorosamente as etapas para a obtenção de um produto adequado de terra compactada. Desta vez objetivou-se apresentar as possibilidades da utilização dos mesmos princípios produtivos, agora com foco em ambientes internos.

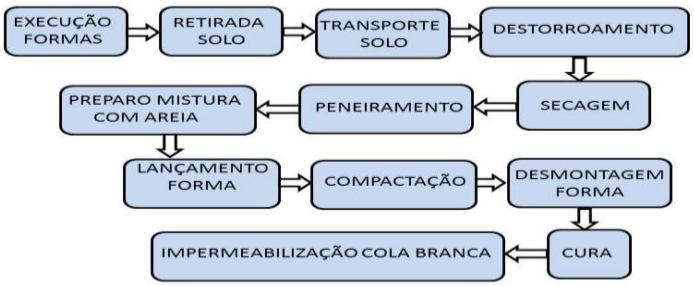


Figura 6: Fluxograma do teste 02, adaptado de Neves e Faria (2011).

5 SEGUNDA APLICAÇÃO: PORTA VASOS

Para realização de um objeto destinado ao uso nos interiores de arquitetura elaborou-se o protótipo de um porta-vasos. Além dos três critérios de economicidade, qualidade visual e reciclabilidade, acrescentou-se aqui, pela natureza do objeto construído, o critério da portabilidade. Foram realizados dois protótipos (Figura 7), cuja estabilização por cimento foi substituída pela impermeabilização das superfícies, após a cura, pelo uso de acetato de polivinila (PVA) (NEVES; FARIA 2011). Segundo os autores o mesmo material pode ser utilizado na correção de trincas;

Definidas as especificações do produto, partiu-se para a correção das não conformidades identificadas nas etapas das execuções anteriores. O peneiramento da matéria prima foi realizado com malha de largura 4 mm (HEISE, 2004). O solo foi adequadamente estocado sobre lona preta e protegido de umidade (NEVES; FARIA, 2011). Para a secagem foram utilizados dois fornos caseiros de 600 W a uma temperatura de 80º. O tempo total de secagem para 50 kg de matéria prima foi de dois dias.

Figura 7: Protótipo de porta-vasos.

Para a prova cabal de que a terra sem adição de cimento poderia ser reutilizada por muitos ciclos, realizou-se a trituração de um dos porta-vasos, e a partir dos seus resíduos, construiu-se um terceiro porta-vasos com as mesmas dimensões, utilizando a mesma fôrma, não ficando evidente neste processo perdas de material significativas. As mesmas etapas do processo anterior foram rigorosamente assistidas, comprovando assim a repetibilidade do processo. Registros fotográficos do resultado estão nas Figuras 7 e 8.

Figura 8: Reciclagem do protótipo

6 DISCUSSÃO

Retrações do solo durante a compactação e cura do porta-vasos foram consideradas insignificantes já que os valores limítrofes sujeridos em literatura são superiores (DJERBIB e HALL, 2003). Normalmente em solos argilosos e siltosos, é comum o surgimento de trincas durante o processo de cura. Solos mais arenosos são mais estáveis, com superfície menos porosa, por serem abundantes em conteúdo fino. Neste sentido preocupou-se na correção granulométrica com adição de areia. O resultado obtido foram paredes homogêneas, lisas e livres de trincas, com baixo índice de retração na cura. Desta forma conclui-se atingida a meta qualidade visual.

Como citado ao início deste artigo, o custo da construção em terra crua é impactado pela sua demanda de mão de obra (WALKER et al., 2003) entretanto no caso de aplicações internas, com baixos volumes de matéria-prima, evidenciam-se menores impactos da mão obra pelo grau de complexidade. Um pequeno treinamento nos testes simples de campo e nos processos de peneiramento, fabricação de moldes e compactação manual pode qualificar os construtores (NEVES et al., 2005; Mink, 2006).

TABELA 1– Estimativa de custo comparativo para Porta Vasos em Madeira

Item	Quantidade	Custo
Ripa (5 x 2 m)	02	R$ 62,30
Prego 17x27	250 gr (aprox.)	R$ 3,32
Cola branca	250 gr (aprox.)	R$ 5,97
Compensado naval 15mm	1,6 x 0,8 m	R$ 46,04
Diária de profissional	01	R$ 250,00
	TOTAL	R$ 367,63

FONTE: Os Autores (2018)

A estimativa de custos é aproximada e realizada sobre mão de obra e material de uso direto no Brasil. Não foram incluidos equipamentos e ferramentas. Também não foram levantados os custos de logistica e distribuição. Conclui-se que os custos com mão de obra e material direto entre a fabricação de um porta-vasos em Taipa de pilão apresentou a redução de cerca de 33% (Tabelas 1 e 2). Apesar de

simples em sua formulação, tal resultado dá pistas de que a meta de de economicidade da Taipa de pilão, para objetos de uso interior as edificações foi alcançado.

TABELA 2 – Materiais Utilizados para o Porta -Vasos Em Terra Crua.

Item	Quantidade	Custo
Solo Arenoso	19,5 kg	R$ 40,00
Areia	16,5 kg	R$ 5,80
Água*	4 L	R$ 0,02
Moldes	Fabricação própria	R$ 75,00
Diária de profissional**	01	R$ 150,00
	TOTAL	R$ 251,54

*custo de agua da torneira (levando em consideração o uso de agua para os testes de teor de umidade);
**custo de mão de obra considerando grau necessário de qualificação dos profissionais;
FONTE: Os Autores (2018)

A execução de Taipa de Pilão no interior de ambientes pode ter redução em custos relacionadas com demandas de tempo pela possibilidade de controle de temperatura e umidade, e também na demanda de espaço. No caso da cosnstrução do porta-vasos o espaço solicitado no canteiro foi de cerca de 2 m², onde em dois momentos ocorreram o armazenamento e a manipulação dos materiais.

No caso das paredes na oficina citada, o procedimento que consumiu mais tempo foi a preparação da terra, confirmando as observaçõe de HEISE (2004), porém esta foi significativamente reduzida no caso da construção dos protótipos do porta vasos, que utilizou pequeno volume de material. O tempo de cura para os porta-vasos foi de cerca de 04 semanas, enquanto na literatura para a construção de paredes o estimado é um tempo de cura de cerca de 04 meses (NEVES; FARIA, 2011).

Além dos indicadores de consumo energético e emissão de gases citado, constatou-se a partir da reciclagem do porta-vasos que a taipa de pilão sem material cimentício é amplamente reversível, ou seja, não gera resíduo que não possa ser aproveitado em um novo ciclo, mitigando a necessidade de maiores gastos energéticos e emissões gasosas com as etapas de destinação final, reciclagem ou descarte.

De forma satisfatória, os objetivos foram se refinando de acordo com as iterações, conforme o previsto pela metodologia DSR, sobretudo na aquisição do conhecimento tecnológico em relação aos processos da Taipa de Pilão (BAX 2015; DRESCH 2018; SANTOS; 2018; KAIZER; CUNHA, 2019; VILELA, 2019; PIMENTEL et al., 2020).

A projetação dos objetos, aqui novamente com foco tecnológico, cumpriu com os requisitos de rigor, demonstrando fluxogramas que mais tarde serviriam para avaliar o artefato “processo”. Todas as fases do processo da construção em terra crua foram relacionadas às suas fontes bibliográficas, e também testadas em prototipagem, amarrando-se desta forma a projetação, a conceituação, a sua demonstração, e posteriormente a sua avaliação.

De acordo com Dresch (2015), os artefatos elaborados, projetados a partir de uma pesquisa fundamentada em Design são a prova de sua validade. O artefato "processo de taipa de pilão" apresentou-se de forma satisfatória, passando pelas devidas correções no seu percurso, atingindo os objetivos e as características elencadas anteriormente. O incremento dos fluxogramas a partir dos problemas encontrados, vão ao encontro das ferramentas conhecidas como "as it /to be".

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa precisa ser compreendida na sua proposta epistemológica de darmos uma formulação científica a um processo de construção com terra crua. Fomos buscar na teoria do Design um método apropriado. Em estudos futuros, a cooperação com a área de Materiais de Construção, permitirá satisfazermos a caracterização quantitativa do solo assim como a medição da resistência mecânica dos objetos construídos. Os critérios de avaliação, fundamentados nas três características, a saber, economicidade, qualidade visual e reciclabilidade foram interpretativos e complementados por um registro documental fotográfico.

Cabe aqui informar que para este estudo optou-se pelo uso da terra crua em sua composição básica, visando a mitigação da necessidade do uso de cimento, porém existem autores (Losini et al., 2022; Parlato et al., 2023) que vêm estudando a substituição do cimento em tecnicas de terra crua a partir do uso de polímeros naturais. (Losini et al., 2022; Parlato et al., 2023)

7 REFERÊNCIAS

Barreto, Benício. D. H. T.. Arquitetura temporária: proposição de módulo educacional temporário para instituições públicas do Brasil dedicados á educação de jovens e adultos no meio rural sob a ótica de minimização do gasto energético. Dissertação - PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2017.

Bax, Marcelo. P. *Design Science*: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia. Ciência da Informação, v. 42, n. 2, 2013. DOI: 10.18225/ci.inf..v42i2.1388

Berge, Bjorn. The Ecology of building materials. Elsevier, Architectural Press, Oxford, UK, 2009.

Carvalho, Thaís. M. P.; Lopes, Wilza G. R.. A arquitetura de terra e o desenvolvimento sustentável na construção civil. VII CONNEPI Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas, Tocantins, Brasil, 2012.

Djerbib, Youcef; HALL Matthew. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. Construction and Building Materials, 18, p. 281-286, 2004.

Dresch, Aline. *Design Science* e *Design Science Research* como artefatos metodológicos para Engenharia de Produção. Dissertação - UNISINOS, Universidade do vale do rio dos Sinos, Programa de pós-graduação em Engenharia de produção e Sistemas, São Leopoldo, Brasil, 2013.

Dresch, Aline; Lacerda, Diogo P.; Antunes Júnior, José A. V.. *Design Science Research*: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Dresch, A.. Desenvolvimento Científico em *Design Science* para a Engenharia de Produção: Formulações Conceituais e Análise Empírica. Tese - Programa de pós- graduação em engenharia da produção, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. 2018. 268 p.

Easton, David. The Rammed Earth Houses. White River Junction, Chelsea, Green Publishing Company, 1996.

Franke, Lisa N.. Arquitetura Contemporânea em Terra: modos de ver e fazer. Dissertação - Curso de Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Portugal, 2017.

Gallipoli, Domenico; BRUNO, Agostino W.; PERLOT, Céline; MENDES, João. A geothecnical perspective of raw Earth building. Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, França, 2017.

Goutsaya, J. et al. Mechanical characteristics of compressed earth blocks, compressed stabilized earth blocks and stabilized adobe bricks with cement in the town of Ngaoundere - Cameroon. Journal of Building Materials and Structures, v. 8, n. 2, pág. 139-159, 31, 2021. https://doi.org/10.34118/jbms.v8i2.1441

Gomes, M. Idália; GONÇALVES, Tereza D.; FARIA, Paulina. Unstabilised Rammed Earth: Characterization of Material Colleted from old Construction in South Portugal and Comparison to Normative Requirements, Internacional Journal of Architecture Heritage, Taylor & Francis, v.8, nº 2, p. 185–212, 2014

Heise, André. F.. Desenho do processo e qualidade na construção do painel monolítico de solo-cimento em Taipa de Pilão. Dissertação - Pós-graduação Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.

Jalali, Said; Eires, Rute. Inovações científicas de construção em terra crua. 1ª Conferência Internacional – Angola: Ensino, Investigação e Desenvolvimento, Braga, Portugal, 2008.

Jorge, Luís A.. O eterno presente: entretempo, sincronia e efemeridade. Universidade de São Paulo, 1˚ COLÓQUIO INTERNACIONAL ICHT 2016 Imaginário: Construir e Habitar a Terra Cidades 'Inteligentes' e Poéticas Urbanas, 2016.

Kaizer, Felipe; Cunha Lucas do M. N.. Herbert Simon como teórico do *Design*. In: Anais do Simpósio de Pós-graduação em *Design* da Esdi. Rio de Janeiro (RJ) ESDI / UERJ, 2019.

Losini, et al. Mechanical and Microstructural Characterization of Rammed Earth Stabilized with Five Biopolymers. Materials, v.15, n.9 :3136. . 2022 https://doi.org/10.3390/ma15093136.

Lacerda, Diogo P.; Dresch, Aline; Proença, Adriano; Antunes Filho José A.V.. *Design Science Research*: método de pesquisa para a Engenharia de Produção. Gestão de Produção, São Carlos, v 20, nº 4, p 741 - 761, 2013.

Maeder, Verena. Solid Earth Adobe Buildings. Earthbuilding Construction and adobe brick manufacture, New Zealand, 2017.

Minke, Gernot. Building with Earth – *Design* and technology of a sustainable architecture. Birkhäuser, Berlin, Feb. 2006.

Mishra, Shalini. Utilization of Earth Tecnologies for sócio-Economy Upliftment. SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE), volume 2, issue 5, 2015.

Moura, Gustavo. Comunicação pessoal, 2018.

Morsy, Mohamed. I. et al. Recycling rice straw ash to produce low thermal conductivity and moisture-resistant geopolymer adobe bricks. Saudi Journal of Biological Sciences, v.29, Volume 29, n. 5,P. 3759-3771,2022. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.046.

Neves, Célia. M. M; Faria, Obede. B; Rotondaro, Rodolfo; Ceballos, Patrício S.; Hoffmann, Márcio V. Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo. Rede Ibero-americana PROTERRA. 2010. Disponível em http://www.redproterra.org.

Neves, Célia; Faria, Obede B.. Técnicas de Construção com Terra. FEB – UNESP, Proterra, Bauru, São Paulo, 2011. 79 p.

Parlato, M. C. M. et al.; RIVERA-GÓMEZ, C.; PORTO, S. M. C. Reuse of livestock waste for the reinforcement of rammed-earth materials: investigation on mechanical performances. Journal of Agricultural Engineering. 2023. doi: 10.4081/jae.2023.1434.

Paz, Daniel. J. M.. Do eterno ao instantâneo – questões que aparecem quando se projeta para a efemeridade. PROJETAR - 2015, Natal, 30 set a 2 out de 2015.

Perez, Iana .U.; Moura, Mônica; Medola, Fausto O.. A *Design Science* nas pesquisas em *Design* no Brasil. Estudos em Design Revista (online). Rio de Janeiro: v. 28 n 1, p. 38 – 52, 2020.

Pimentel, Mariano; Filippo, Denise. *Design Science Research*: pesquisa científica atrelada ao *Design* de artefatos. RE@D - Revista de Educação a Distância e Elearning V. 3 N.1,p.37-61, 2020.

Rodrigues Diogo D. *Design Science Research* como caminho metodológico para disciplinas e projetos de *Design* da Informação. Info*Design* - Rev. Bras. de *Design* da Inf ,v. 15,n. 1 , p. 111–124, 2018.

Santos, Aguinaldo dos (Org.); Seleção do método de Pesquisa. Insight Editora, 2018.

Silva, Cláudia G. T. Conceitos e preconceitos relativos às construções em terra crua. 2000. 255 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2000.

Simon, Herbert. The Sciences of the Artificial. Cambridge: Topics Science Publisher, MIT Press, 1969.

Valporto, Mariana S.; Azevedo, Patrícia S.. Gestão do design na identificação dos fatores de impactos ambientais da construção civil. Estudos em Design Revista (online), Rio de Janeiro: v. 24, n. 1, p. 124 – 151, 2016.

Vilela, Pedro J.. Metodologia de Análise de Artefatos: usando a Ciência do *Design* para aperfeiçoar metodologias para desenvolver ontologias. Dissertação de Mestrado em Ciência da Informação - Universidade de Brasília, 2019.

Waker, Peter; Maniatidis, Vasilios. A Review of Rammed Earth Construction, Partners in Innovation Project Developing Rammed Earth for UK housing. Natural Building Technology Group Department of Architecture & Engineering, University of Bath, UK, May 2003.

Wieringa, Roelf. Design Science as nested problem solving. In: Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology. New York, 2009.

Wordnik. Dicionário online em https://www.wordnik.com/words/abduction, acesso em 2/10/2023.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MICROESTRUTURA DE CONCRETOS PREPARADOS COM RESÍDUO ORIUNDO DA EXTRAÇÃO DE CALCÁRIO DE ALTA DENSIDADE

Eduardo da Cruz Teixeira[a]; Camila Macedo Medeiros[b]; Thássia Isis Barbosa Ferreira[c]; Elnatan Lins da Costa[d]; Kalley Cavalcante Santos da Rocha[e]

[a]IFPB, Campina Grande – PB, Brasil. Instituto Federal da Paraiba Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671. Campina Grande - PB, Brasil, educrtx@hotmail.com.

[b]IFPB, Campina Grande – PB, Brasil. Instituto Federal da Paraiba Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671. Campina Grande - PB, Brasil, camilamedeirosm@gmail.com.

[c]IFPB, Campina Grande – PB, Brasil. Instituto Federal da Paraiba Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671. Campina Grande - PB, Brasil, thassia.isis@academico.ifpb.edu.br.

[d]IFPB, Campina Grande – PB, Brasil. Instituto Federal da Paraiba Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671. Campina Grande - PB, Brasil, elnatan.costa@ifpb.edu.br

[e]IFPB, Campina Grande – PB, Brasil. Instituto Federal da Paraiba Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671. Campina Grande - PB, Brasil , kalley.cavalcante@academico.ifpb.edu.br.

RESUMO

O calcário laminado de alta densidade é encontrado na Chapada do Araripe no sul do estado do Ceará, no Brasil, sua exploração são causas de grande geração de resíduos devido a forma inadequada de sua extração. Este tipo de rocha apresenta uma elevada resistência mecânica, cerca de 120 MPa, especialmente pela sua formação cristalina, que lhe confere elevada dureza. Com o objetivo de se estudar o comportamento do C-S-H na zona de transição, avaliou-se a possibilidade do uso do resíduo desse calcário de alta densidade como agregado graúdo através de técnicas de caracterização. A partir disso, foram realizadas análises da caracterização do calcário de alta densidade em comparação agregado graúdo convencional, obtendo-se bons resultados como potencial uso no concreto. Foram produzidos corpos de prova com diferentes níveis de substituição do agregado graúdo (25%, 50% e 100%) em relação ao traço de referência 1:2:2:0,6, permitindo análises comparativas. O desempenho dos traços foram analisados por meio de ensaios de resistividade, ultrassom, absorção e resistência à compressão. Além da técnica de análise de microestruturas, MEV. No qual foram obtidos resultados satisfatórios em relação ao traço com substituição de 25%, que obteve uma resistência maior que a referência com 35,82 MPa.

Palavras-chave: Agregado Graúdo, Calcário de Alta Densidade, Concreto, Microestrutura.

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas mostram e comprovam a relação entre a microestrutura do concreto e suas propriedades, principalmente na zona de transição, interface entre a pasta de cimento e o agregado, considerada como a parte limitante da resistência mecânica do concreto, segundo Mehta e Monteiro (2008). Ainda conforme estes autores, a identificação e o comportamento das fases constituintes do concreto em sua microestrutura oferecem possibilidades de mecanismos capazes de aperfeiçoar as propriedades gerais do mesmo de uma maneira geral.

Estudos desenvolvidos por Kaefer (2002) mostram que porosidade e heterogeneidade em relação ao restante da pasta são as características da zona de transição, além de ser pobre do composto C-S-H (silicato cálcico hidratado), estrutura parcialmente cristalina responsável pela resistência mecânica do concreto.

Dentro do contexto de avanços tecnológicos aos concretos, a nanotecnologia tem sido elemento de destaque nas pesquisas recentes. Ela tem mudado progressivamente a ciência e engenharia de materiais, sobretudo no âmbito de propriedades através das técnicas de nanociência, incluindo os materiais cimentícios. A possibilidade de geração de novos concretos mais resistentes e duráveis, propriedades inovadoras e aplicação inéditas se darão através do melhor conhecimento de comportamentos do material cimentício no ponto de vista micro e nanoestrutural (HOU *et al*, 2013).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CALCÁRIO DE ALTA DENSIDADE

Segundo Vidal e Padilha (2003), a Chapada do Araripe tem extensão regional, englobando os estados do Ceará, Piauí e Pernambuco, com uma área total de 9.000 km², disposta no sentido Leste-Oeste por cerca de 180 km e Norte-Sul por cerca de 70 km, no seu trecho mais largo, conforme Figura 1. Os autores Vidal e Padilha (2003) explicam ainda que os calcários laminados da Formação Santana, por sua abundância, constituem-se em uma das mais importantes representações do Cretáceo cearense. Esta formação de origem marinha/lacustre apresenta uma sequência sedimentar estratificada.

Figura 1 – Localização da área de extração

Segundo Vidal e Padilha (2003), os calcários laminados, Pedra Cariri, alvo deste trabalho, afloram de modo tabular ao longo de rios e riachos, onde processos erosivos revelam com maior intensidade essas rochas que exibem uma coloração predominantemente creme claro a amarelo intenso, por vezes cinza

claro; sua laminação é bastante acentuada, exibindo estratificação planoparalelas horizontalizadas. Segundo dados oficiais do DNPM/2004, as reservas do calcário laminado nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri da ordem 114,5 milhões de metros cúbicos, o que equivale a 275 milhões de toneladas.

2.2 ZONA DE TRANSIÇÃO EM CONCRETOS

Os primeiros estudos realizados à zona de transição, região entre a pasta e o agregado foram realizados por Farran (1956), o mesmo observou características distintas nesta região em vista da diferente microestrutura apresentada em relação à matriz (GENGIYNG, 2001).

Mehta e Monteiro (2008) explicam que na microestrutura do concreto distingue-se que a pasta de cimento em contato com a face do agregado graúdo possui características diferentes do restante da pasta, isso identificado em uma espessura de 10 µm a 50 µm, sendo considerada mais uma componente do concreto, conhecida como zona de transição, conforme pode ser observado na Figura 2.

De maneira geral, Silva (2000) cita as principais características da zona de transição que difere das outras fases da microestrutura do concreto:

a) maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, sendo esses materiais mais bem formados e de maior tamanho;

b) os cristais de hidróxido de cálcio estão orientados, preferencialmente, de modo que seus planos de clivagem estejam, aproximadamente, perpendiculares à superfície do agregado; e

c) a porosidade da interface é maior do que a da matriz.

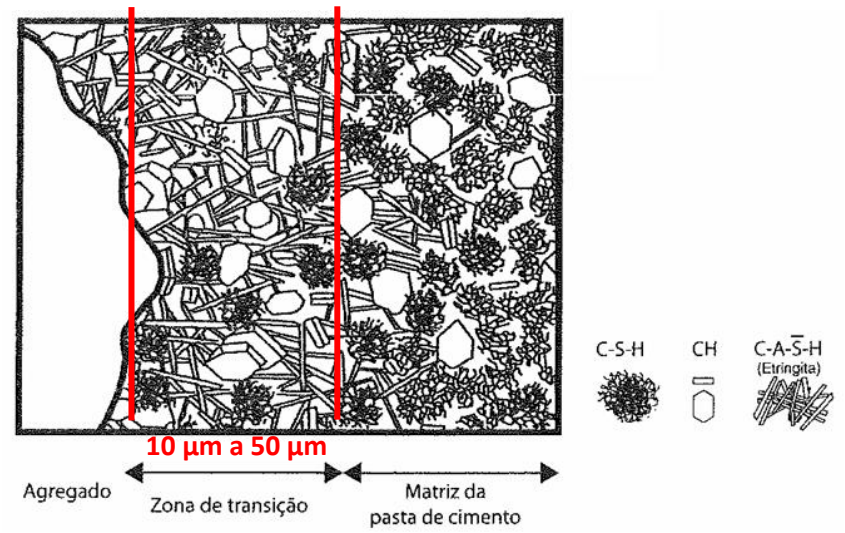


Figura 2 – Representação diagramática da ZT e da matriz da pasta de cimento no concreto.

Segundo Castro (2007), a zona de transição, se trata de um ponto de maior fragilidade da matriz, e nela ocorre a formação do efeito parede, que reflete nas propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, ou seja, o seu ponto fraco. Quando o concreto é submetido a uma tensão, a região crítica de rompimento é a zona de transição, por ser a região mais frágil, esse fenômeno é explicado pela formação heterogênea e carente de C-S-H.

Silva (2000) explica que a resistência da pasta de cimento depende principalmente das forças de atração de van der Walls, ou seja, a resistência será maior, quanto mais compacta seja a pasta e quanto menos cristalinos sejam os produtos de hidratação, ou seja, que tenha uma alta área superficial, uma alta massa molecular e um comprimento de cadeia maior – maior quantidade de C-S-H.

Com a finalidade de melhorar essa região no concreto, alguns estudos já vem sendo feitos em relação a adição de diferentes tipos de agregados a sua massa. Rossignolo (2007) observou que, para concretos leves, a adição de sílica ativa e látex SBR resultou na redução da espessura da zona de transição em comparação com o concreto de referência, além de melhorar a qualidade dos produtos de hidratação do cimento Portland devido à diminuição do teor de CH.

Silva et al (2020), também notou uma ZT mais estreita ao adicionar 5% de resíduo de borracha ao concreto. Outras adições, como resíduo do corte de granito (Gonçalves et al., 2002), pó de basalto (Dobiszewska et al., 2018) e resíduo de polimento de porcelanato (Silva, 2005), geralmente com características inertes, atuam como fillers devido à sua finura. Esses materiais influenciam a microestrutura do concreto, especialmente na zona de transição, tornando-a mais densa, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência à compressão do concreto.

3 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Inicialmente, a redução da amostra do calcário denso obtida em campo para realização de ensaios no laboratório do IFPB foi realizada conforme (ABNT NBR NM 27:2001). Em um britador de mandíbulas modelo BREAKER FIX-50x obteve-se a o tamanho desejado retido nas peneiras de 12,5 a 4,5mm, conforme Figura 3. Em seguida, ocorreu a caracterização completa do agregado graúdo e miúdo através dos ensaios constantes no Quadro 1.

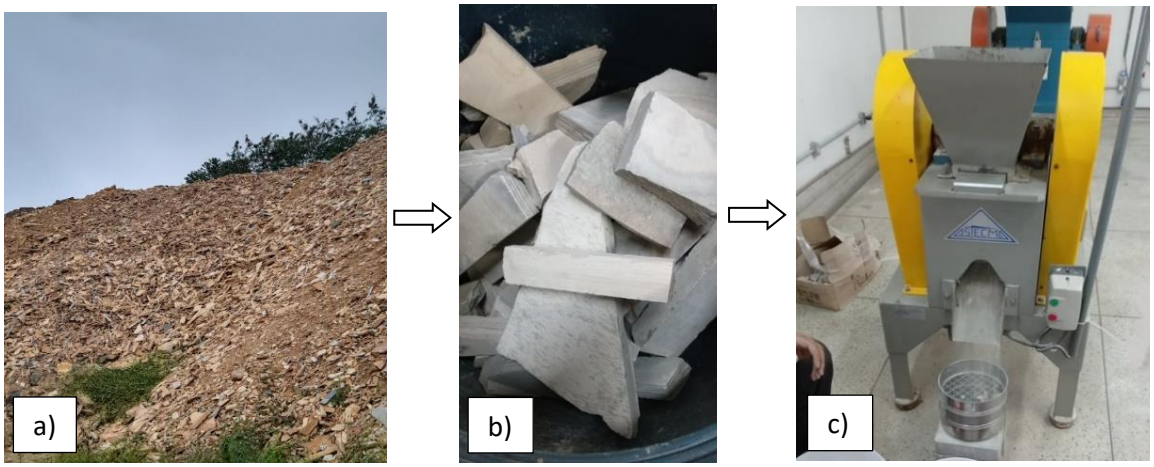


Figura 3 – a) Resíduos descartados na jazida b) Resíduo coletado c) Britagem do calcário.

Quadro 1 – Propriedade e norma respectiva

Ensaio	Norma
Índice de forma pelo método do paquímetro	ABNT NBR 7809:2006
Determinação da determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados	ABNT NBR NM 45:2006
Massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo	ABNT NBR NM 53:2009
Determinação da composição granulométrica dos agregados	ABNT NBR NM 248:2003

Os ensaios de caracterização foram realizados de forma a comparar o calcário coletado com a brita convencional, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – amostra a) brita convencional b) Pedra Cariri.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram preparadas 4 amostras de concreto com um traço de 1:2:2:0,6. Sendo um de referência e outros três com substituição ao agregado graúdo em 25%, 50% e 100%, conforme Quadro 2. Seguindo as normas da NBR 5738/03 para a moldagem e cura de corpos de prova, os materiais, conforme Figura 5, foram misturados em uma betoneira e colocados em fôrmas cilíndricas de 10cm x 20cm, utilizando vibrador para adensamento, foram produzidos 3 corpos de prova para cada tipo de amostra. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em um tanque com água e hidróxido de cálcio, durante 28 dias para cura.

Quadro 2 – Família dos concretos preparados

Concretos	Aglomerante (kg/m³)	A. Miúdo (kg/m³)	A. Graúdo (kg/m³)		Água (Kg/m³)
Famílias	Cimento CP V- ARI[1]	Areia	Convencional (19mm)	Pedra Cariri	
F1 (Ref)	2,57	5,14	5,14	-	1,58
F2 (25%)	2,57	5,14	3,85	1,29	1,58
F3 (50%)	2,57	5,14	2,57	2,57	1,58
F4 (100%)	2,57	5,14	-	5,14	1,58

[1] É um cimento que atinge alta resistência inicial. Produzido com um clínquer de dosagem diferente de calcário e argila, que passa por uma moagem mais fina. Pode atingir 26Mpa de resistência à compressão em apenas um dia de idade.

A preparação das amostras para o MEV, conforme Figura 5, seguiu a metodologia sugerida por Rossignolo (2003) com adaptações. Em sua tese, esse autor realizou pesquisas na zona de transição de concretos preparados com argila expandida. Para a análise da interface entre agregado e pasta, foram utilizadas amostras do centro do corpo-de-prova, realizados cortes na perpendicular ao sentido de moldagem, depois cortados (3,0cmx3,0cmx1,0cm) com serra de baixa rotação, com disco diamantado, lubrificado com água. Em seguida imerso em água isopropílico por 24 horas. Após esse tempo foi colocado em processo de secagem e permanecendo por 12 horas em estufa ventilada (35ºC), depois 24 horas em dissecador (23 ± 2 ºC). E seguindo para o processo de impregnação à vácuo, com embutimento a frio, utilizando resina epóxi. As amostras passaram por dois processos de polimento, um com lixas de carbeto de silício (300,400,600 e 1000) e outro com pasta de diamante com grãos de 1,00 µm (ANDRADE E VEIGA, 1998).

Figura 5 – Microscópio Eletrônico de Varredura do LSR-UFPB.

3.3 ANÁLISES DA MACROESTRUTURA

A macroestrutura de cada traço do concreto foi analisado a partir dos ensaios de resistência à compressão axial conforme a norma NBR 7215/96 para cimento Portland, absorção por capilaridade conforme a norma NBR 9779/95 para água em argamassa e concreto endurecido, resistividade elétrica superficial de acordo com a AASHTO TP 95-14, e também ensaios ultrassom. Para medir a resistividade elétrica, utilizou-se o aparelho RESIPOD - Resistivity Meter 38 mm, baseado no princípio da sonda Wenner, conforme Figura 6.

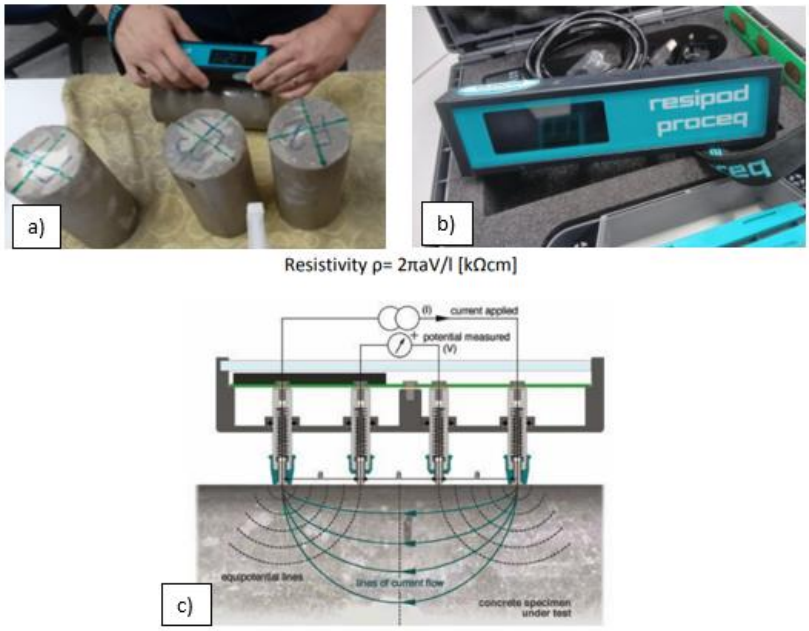


Figura 6 – a) Análise de resistividade elétrica. b) Equipamento utilizado para análise resistividade elétrica c) Esquema da medição de resistividade elétrica no concreto.

Para avaliar os corpos de prova em relação à velocidade de propagação de onda ultrassom, foram executados procedimentos de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 8802:2013. Utilizando o aparelho da marca Controls modelo 58 E4800 (Figura 7).

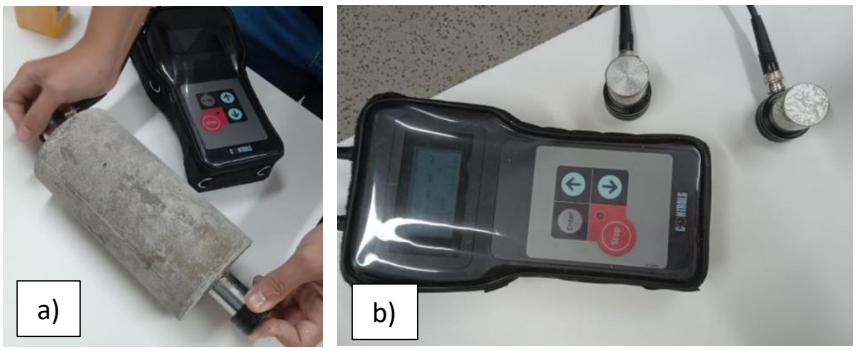


Figura 7 – a) Análise de ultrassom. b) Equipamento utilizado para análise de ultrassom.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através dos ensaios podem ser vistos a seguir no Quadro 3 e no gráfico da curva granulométrica na Figura 8:

Quadro 3 – Resultado obtido nos ensaios propostos.

Ensaio	Calcário (Pedra Cariri)	Brita Convencional (19mm)
Massa Específica	2,44 g/cm³	2,56 g/cm³
Índice de Forma	2,76	3,40
Absorção	2,19%	0,55 %
Módulo de Finura	6,99 mm	6,97 mm
Dimensão Máxima Característica (DMC)	19 mm	25 mm

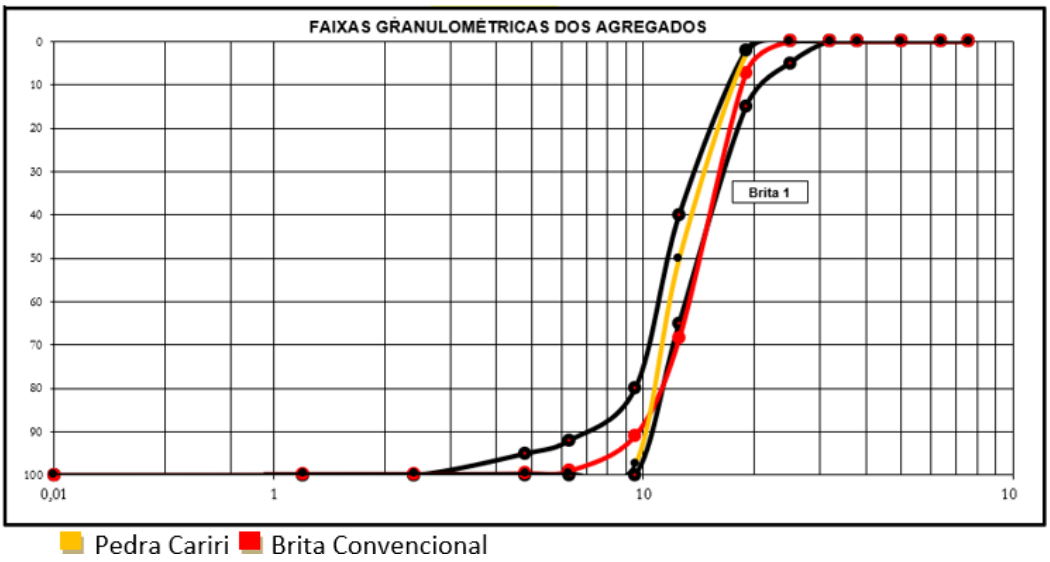


Figura 8 – Curva granulométrica dos agregados Pedra Cariri e convencional.

Os resultados obtidos pela resistividade elétrica e ultrassom podem ser vistos no Quadro 4 a seguir:

Quadro 4 – Resistividade elétrica e ultrassom.

Famílias	Resistividade elétrica	Ultrassom
F1 (Ref)	10,95 Ω.m	3053,44m/s
F2 (25%)	9,70 Ω.m	3846,15m/s
F3 (50%)	10,7 Ω.m	2820,87m/s
F4 (100%)	9,63 Ω.m	3795,06 m/s

No ensaio de resistência à compressão, foram obtidos os seguintes resultados, conforme Quadro 5:

Quadro 5 – Resistência à compressão

Famílias	Traço:	Resistência à Compressão
F1 (ref)	1:2:2:0,6	34,43 MPa
F2 (25%)		35,82 MPa
F3 (50%)		32,25 MPa
F4 (100%)		31,62 MPa

A partir dos dados obtidos, foi realizado o cálculo de absorção por capilaridade de cada família, conforme Figura 9.

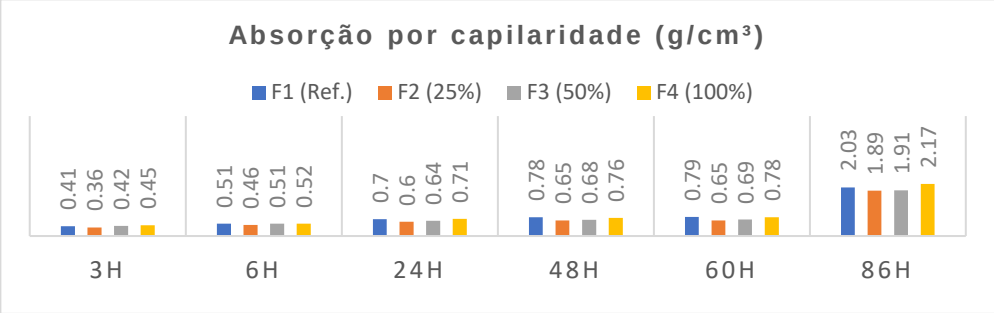


Figura 9 – Absorção por capilaridade

A Pedra Cariri demonstra características comparáveis ao agregado convencional, especialmente em relação à distribuição granulométrica semelhante à brita 1, tornando-a uma opção viável para uso como agregado graúdo no concreto. Ao comparar com o concreto de referência, a família com 25% de substituição mostrou aumento na resistência, porém, à medida que a substituição aumentou, a resistência diminuiu. Quanto à absorção capilar, as famílias com 25% e 50% de substituição destacaram-se com resultados superiores, enquanto o concreto de referência teve melhor desempenho em relação à substituição total (100%) do agregado graúdo.

A Figura 10 mostra a zona de transição do concreto preparado com o calcário de alta densidade cinza como agregado graúdo em diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

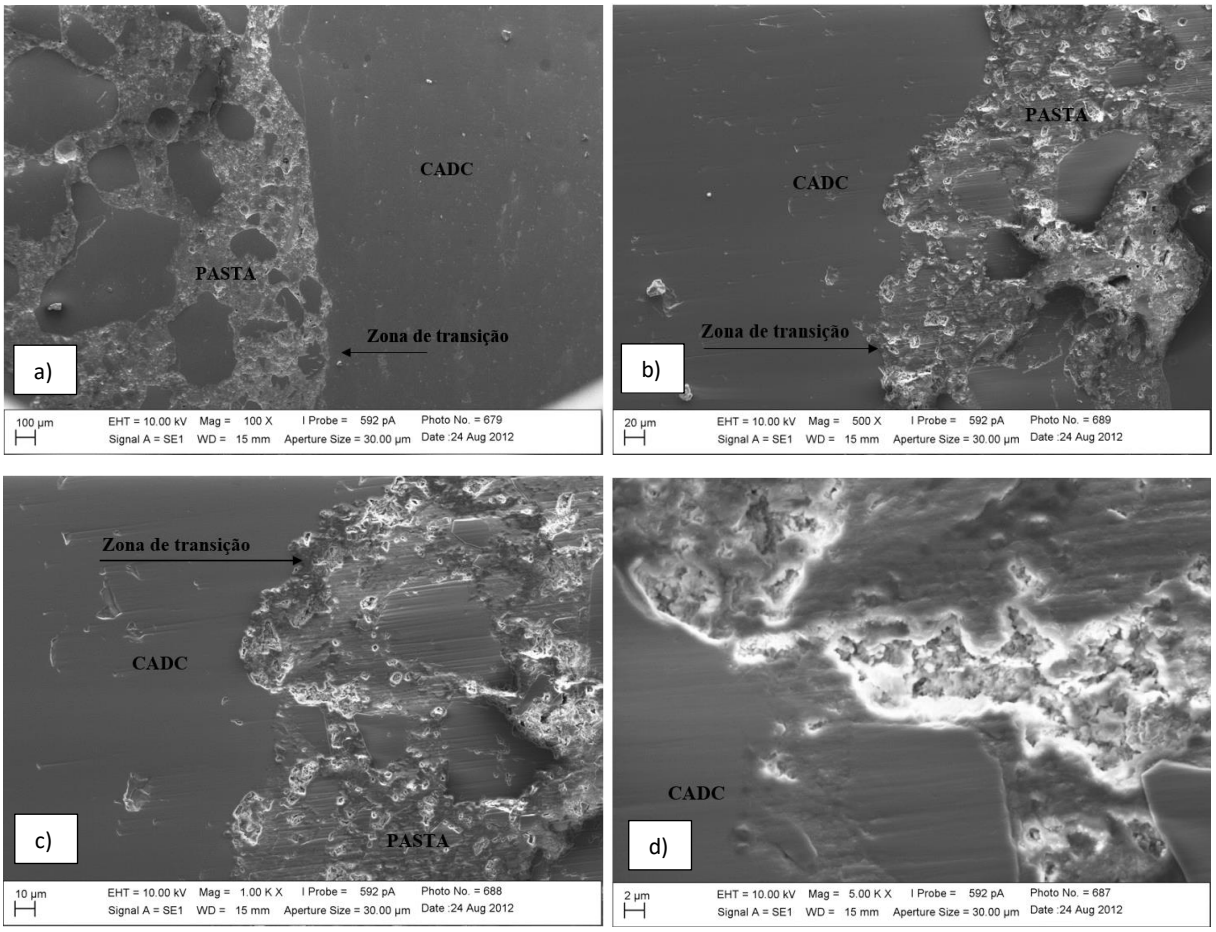


Figura 10 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC. Magnitude: a) x100 b) x500 c) x1000 d) x5000

As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com CADC (Calcário de Alta Densidade Cearense) mostraram, em geral, uma zona de transição com relativa uniformidade, que é visualizada nas Figuras 10a. e 10b., porosa, porém, ainda sim, sem trincas ou fissuras consideráveis. A uniformidade da zona de transição desse concreto foi boa, porém, ao longo da zona de transição foi encontrado porosidade na interface.

A Figura 10c. mostra a zona de transição com regiões porosas, porém, não é possível identificar trincas na interface.

Percebe-se, que a superfície do agregado citado, após os procedimentos de lixamento e polimento apresentaram uma característica bem uniforme, pouco porosa e lisa, consequentemente bem densa.

A Figura 11 mostra a zona de transição do concreto preparado com a brita granítica, que é o agregado graúdo de referência utilizado pelo trabalho, foram obtidas imagens de diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

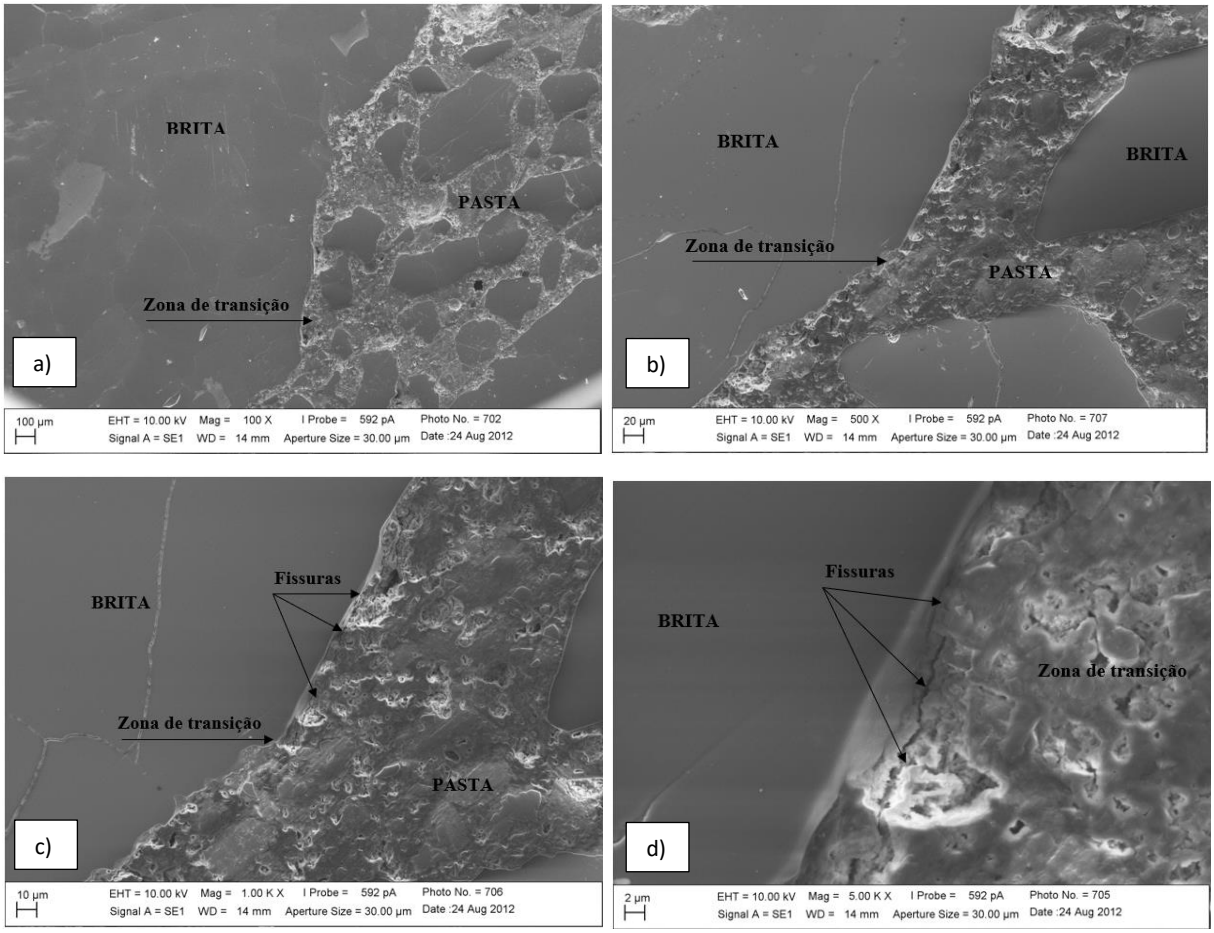


Figura 11 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA. Magnitude: a) x100 b) x500 c) x1000 d) x5000

As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com BRITA, agregado graúdo de referência, mostraram, em geral, uma zona de transição com porosidade parecida com as dos outros tipos de concreto, conforme Figuras 11a. e 11b., o que diferenciou realmente foi a

presença de trincas e fissuras na interface agregado / pasta, estas trincas apresentaram uma continuidade ao longo da zona de transição, fato este que foi visualizado nas Figuras 11c. e 11d..

Como nos concretos preparados com calcários de alta densidade, neste concreto com BRITA percebe-se também, que a superfície do agregado, após os procedimentos de lixamento e polimento apresentaram uma característica bem uniforme, pouco porosa e lisa, consequentemente bem densa.

5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados apresentados, concluímos que:

a) O calcário de alta densidade tem potencialidade para uso como agregado graúdo em concretos;

b) as propriedades físicas como granulometria, índice de forma, absorção e módulo de finura são compatíveis com os valores obtidos do agregado convencional de brita granítica;

c) A substituição parcial (25%) do agregado convencional pelo calcário laminado resultou em melhorias na resistência do concreto;

d) De acordo com os resultados, a utilização do calcário laminado como agregado graúdo pode beneficiar o desempenho do concreto, desde que a substituição seja feita de forma moderada, mantendo um equilíbrio entre a resistência mecânica e a absorção capilar;

e) O uso do calcário de alta resistência como agregado graúdo em concretos altera a formação e as características da zona de transição em relação aos concretos preparados com agregado convencional: diminuindo a porosidade, apresentando baixa ocorrência de trincas ou fissuras e apresenta melhor uniformidade;

f) sugere-estudos específicos na área de caracterização química deste minério em comparação ao convencional; e

g) Mais estudos são necessários para melhorar o traço do concreto e explorar todo o potencial desse tipo de agregado na construção civil.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio e financiamento do IFPB (Instituto Federal da Paraíba), através dos Editais 07/2023 e 56/2023.

REFERÊNCIAS

AASHTO TP 95 - Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride ion Penetration, 2014.

(ABNT NBR 7809:2006) - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.

(ABNT NBR NM 45:2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

(ABNT NBR NM 53:2009) - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

(ABNT NBR NM 248:2003) - Agregados - Determinação da composição granulométrica.

(ABNT NBR 7215: 1996) - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

(ABNT NBR 5738, 2003) - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

(ABNT NBR 5739, 2007) - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

(ABNT NBR 8953: 2015) - Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.

(ABNT NBR 8802: 2013) - Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica)

ANDRADE, N. P. H.; VEIGA, F. N. Microscopia eletrônica de varredura. Informativo, Furnas Centrais Elétricas S.A, 1998.

CASTRO, A. L. C. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. 2007. Doutorado (Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo).

DOBISZEWSKA, M.; SCHINDLER, A. K.; PICHÓR, Waldemar. Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. Construction and Building Materials, v. 177 p. 222–229, 2018.

FARRAN, J. Contribution minérlogique á l'adhérence entre constituants hidrates dês cimens et lês materiaux enrobés Revue dês materiaux des constrctions, 1956.

GENGIYNG, L. HUICAIS, X. GUANGJING, X. Transition zone studies of new-to-old concrete with diferent binders. In: Cement & Concrete Composites, nº 23, 2001.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C.C.D. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, jan./mar. 2002.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Ibracon, 2008.

RIBEIRO, R.C.; GUEDES CORREIA, J. C.; SEIDL, P. R.;, SOARES, J. B.; Vidal, F. W. H.; e Araújo, L. P, - Utilização do Calcário do Cariri Cearense como Agregado Mineral em Pavimentação Asfáltica – Série Tecnologia Mineral – CETEM, núm. 86. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2006.

ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. Revista Matéria, v. 12, n. 3, pp. 532 – 540, 2007.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2003. Tese (doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, B. C. L.; GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C. Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado. Revista Matéria, v.25, n.4, 2020.

SILVA, G. J. B. Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do Porcelanato. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de alto desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade, microestrutura. Tese (doutorado em Engenharia de Materiais), USP – Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M. A indústria extrativa da pedra Cariri no Estado do Ceará: problemas x soluções. In: IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, Fortaleza, anais, 2003.

VIDAL, Francisco W. H.; CASTRO, Nuria F.; CAMPOS, Antônio R.; PEITER, Carlos C. O arranjo produtivo local da Pedra Cariri Encontro sobre Prevenção e Gestão de Conflitos na Mineração, Centro de Tecnologia Mineral –CETEM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE REJEITOS SILICOSOS SUPERFINOS DE MINERAÇÃO

Aline Santana Figueiredo [a]; Augusto Cesar da Silva Bezerra [b]; Douglas Mol Resende [a]; José Maria Franco de Carvalho [c], Ricardo André Fiorotti Peixoto [a]

[a] (Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil), aline.figueiredo1@aluno.ufop.edu.br; douglas.mr@aluno.ufop.edu.br; ricardofiorotti@ufop.edu.br

[b] (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus I, 30421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil), augustobezerra@cefetmg.br

[c] (Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil), josemaria.carvalho@ufv.br

RESUMO

A incorporação de resíduos de grande geração em matrizes cimentícias possibilita redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte. Além disso, esses subprodutos podem promover melhoria das propriedades no estado fresco e endurecido dessas matrizes, proporcionando economia de energia e de custo associados ao produto final. Esse estudo avaliou as propriedades de rejeitos provenientes da mineração de areia (ST) e da extração de quartzito (QT) como material cimentício suplementar (SCM) em concretos de alta resistência, o que contribui para sua reintegração na cadeia produtiva em materiais de alto valor agregado. Amostras de ST e QT foram caracterizadas quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas. ST apresentou potencial como SCM devido à sua finura natural, morfologia angular e quantidade significativa de caulinita. O QT é majoritariamente constituído por quartzo, ideal para aplicação como fíler. Foram moldados concretos com substituição de até 16% de cimento por cada material. O concreto com 8% de ST atingiu resistência à compressão superior a 55 MPa e todos os concretos apresentaram propriedades físicas e desempenho ambiental igual ou superior à referência. Os concretos com 8% de ST apresentaram desempenho superior em todos os aspectos, indicando viabilidade técnica para reciclagem de um rejeito sem consumo adicional de energia.

Palavras-chave: reciclagem de rejeitos, mineração de areia; extração de rochas ornamentais; materiais cimentícios suplementares; concreto de cimento Portland.

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora é responsável por um expressivo impacto ambiental e social, desde a extração de recursos naturais não renováveis até a disposição final de seus resíduos. Essas atividades podem implicar na degradação de grandes extensões territoriais, incluindo processos erosivos, contaminação do solo e de cursos d'água (Lottermoser, 2006; Young & Yang, 2019). A nível mundial, a demanda por areia é de aproximadamente 50 bilhões de toneladas/ano e o volume de rejeitos pode representar até 20% da produção total da jazida (UNEP, 2022; Peduzzi, 2014; MME, 2009; Whitaker, Braga, & Chaves, 2002). A produção global de rochas ornamentais atinge aproximadamente 145 milhões de toneladas/ano e os resíduos gerados desde a extração até a comercialização podem chegar a 40% do volume total da extração durante os processos de corte e polimento de chapas (ABIROCHAS, 2022; Mittri, et al., 2018). Esses subprodutos são responsáveis por impactos ambientais, sociais e econômicos em função da grande quantidade de rejeitos gerada, geralmente dispostos em aterros ou áreas designadas, e não raro, descartadas incorretamente no meio ambiente (Souza, et al., 2023; UNEP, 2014).

A incorporação de resíduos da mineração e siderurgia em matrizes cimentícias pode promover a redução da quantidade de rejeitos dispostos em barragens e a melhoria das propriedades dessas matrizes no estado fresco e no estado endurecido, proporcionando significativa economia de energia e de custo associados ao produto final (Mehta & Monteiro, 2006; Lothenbach, Scrivener, & Hooton, 2011). Além disso, parte do interesse crescente em estratégias mais sustentáveis para produção de matrizes cimentícias é devida ao fato de que a fabricação do clínquer de cimento Portland, que consiste na calcinação a aproximadamente 1450ºC de uma mistura de calcário e argila, é responsável por 5% a 8% das emissões globais totais de CO_2 e por uma severa extração de matérias primas naturais (Kajaste & Hurme, 2016).

Além da incorporação de resíduos, o desenvolvimento de concretos de alta e ultra alta resistência é outro tema recorrente nas pesquisas sobre compósitos à base de cimento. Esses concretos, com resistências características à compressão entre 50 e 90 MPa (ABNT, 2023), vêm sendo produzidos nos últimos anos como resultado do desenvolvimento de materiais de alta tecnologia, como aditivos de última geração e adições minerais com características reativas e morfológicas altamente favoráveis. A associação entre esses fatores propicia a obtenção de resistências substancialmente altas mesmo com a redução no consumo de cimento. Contudo, tornar esses concretos uma opção viável economicamente para obras do cotidiano ainda é um desafio para a indústria da construção civil. Assim, aliadas à utilização destes materiais tecnológicos, técnicas de dosagem e adensamento para obtenção de concretos mais compactos e menos porosos são estratégias chave para obtenção de matrizes de alta resistência (Damineli, 2013).

Em relação às adições minerais, aqui referidas como materiais cimentícios suplementares (SCM – supplementary cementitious materials), há uma vasta gama de estudos que comprovam a aplicabilidade de rejeitos industriais e de mineração para aprimorar as características mecânicas, desempenho e durabilidade de matrizes de cimento Portland. Além disso, a incorporação desses rejeitos permite torná-las mais viáveis economicamente e ambientalmente. Sabe-se que o uso de SCM ricos em sílica amorfa ou finamente cominuída influenciam na qualidade e no volume de produtos de hidratação formados. A incorporação desses SCM na matriz cimentícia promove a redução da porosidade e resulta no aumento da durabilidade, devido à redução do fator Ca/Si no C-S-H; ao consumo de hidróxido de cálcio; à nucleação e ao efeito fíler. Os SCM ricos em alumina elevam a associação de Al ao C-S-H, assim como a quantidade de aluminatos na matriz, levando a uma maior resistência a ataques químicos (Young, Mindess, Bentur, & Gray, 1998; Mehta & Monteiro, 2006).

A composição química, a superfície específica e o percentual de material amorfo representam importantes parâmetros para a incorporação de SCM em matrizes cimentícias. Devido a isso, esses materiais geralmente são submetidos a protocolos de ativação dessas propriedades, como calcinação a altas temperaturas ou moagem, por exemplo. Sabendo disso, o presente trabalho propôs a produção de concretos de alta resistência a partir da inserção de superfinos obtidos a partir de resíduos da extração de areia e da extração de rochas ornamentais.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

O rejeito de mineração de areia (ST) utilizado neste trabalho é proveniente de uma jazida tipo cava submersa localizada no estado do Rio Grande do Sul - Brasil. O rejeito, sob a forma de polpa de cor amarelada, foi seco ao ar por 72h, seco em estufa por 48h (100ºC ± 5ºC) e destorroado manualmente. A amostra de QT foi proveniente do pátio de resíduos de rochas ornamentais da empresa Vertuos Sílicas, no município de Três Corações-MG. Esse material foi recebido com DMC = 75 µm e posteriormente seco em estufa durante 48h (100ºC ± 5ºC), seguido de cominuição em moinho planetário (Retsch PM100, jarro e esferas de ZrO_2) durante 30 minutos a 400 rpm para que atingisse d90 similar à amostra ST. Os materiais utilizados como SCM foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas de acordo com as prescrições da ASTM C29 (ASTM, 2023) e ASTM C188 (ASTM, 2023) (**Quadro 1**). A granulometria dos finos foi obtida por difração de laser (BETTERSIZER 2000®), utilizando água destilada como meio dispersor para os SCM e álcool isopropílico para o CPV.

Quadro 1 - Propriedades físicas dos finos

	ST	QT	CPV
Massa unitária (g/cm³) [ASTM C29]	0,78	0,95	0,80
Massa específica (g/cm³) [ASTM C188]	2,67	2,66	3,12

A caracterização química foi obtida por fluorescência de Raios-X (FRX - Panalytical Epsilon 3x), em amostras com tamanho de partícula inferior a 75 µm. A composição mineralógica foi determinada por difração de Raios-X (DRX - Bruker D2 Phaser, com radiação CuKα, faixa de varredura 2θ de 6-70°, passo de 0,018°, 1s/passo) em amostra com tamanho de partícula inferior a 45 µm. Foi adicionado à amostra 20% de fluoreto de lítio (griceita) em massa para quantificação de amorfos. Para a produção das matrizes cimentícias, utilizou-se cimento Portland CPV de alta resistência inicial (90-100% clínquer + gesso, 0-5% fíler calcário; equivalente ASTM Tipo III (ABNT, 2018)). Os agregados utilizados foram areia natural quartzosa (fração miúda - 2,67 g/cm³ e DMC 4,8 mm) e gnaisse (fração graúda - 2,56 g/cm³ e DMC 9,5 mm); ambos com distribuição granulométrica dentro das faixas recomendadas pela normatização brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009) (**Figura 1**).

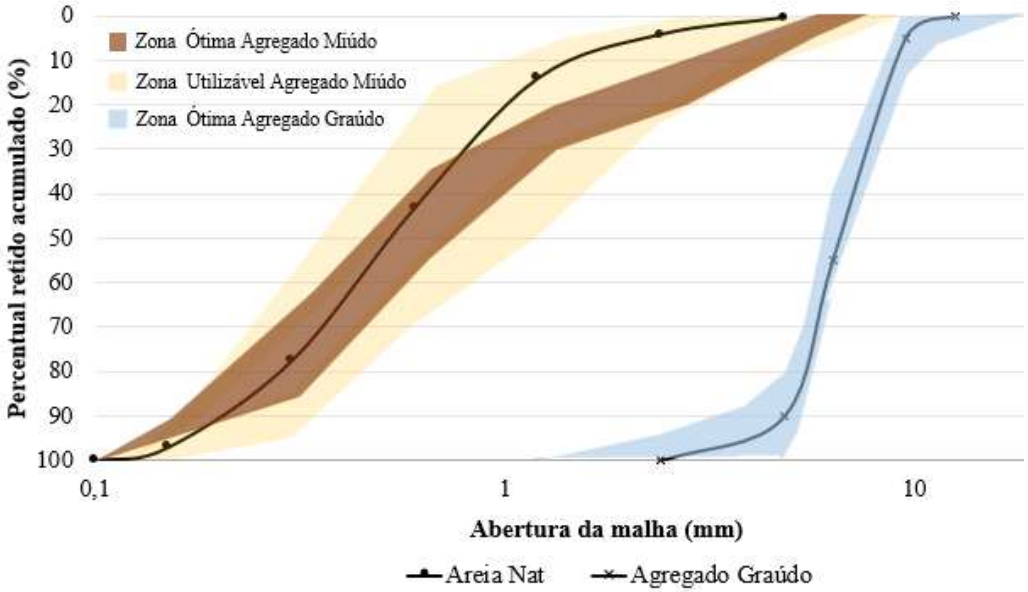


Figura 1 - Curvas granulométricas dos agregados e recomendações da NBR 7211

As dosagens propostas são apresentadas no **Quadro 2**. Foram moldados corpos de prova cilíndricos em escala reduzida (ø50x100 mm) (Azevedo, et al., 2020), mantidos em câmara úmida (UR=95%) até o momento dos ensaios no estado endurecido, segundo prescrições normativas da NBR 9479 (ABNT, 2006).

Quadro 2 – Dosagens dos concretos

Traço	Percentual de adição	CPV	ST	QT	Agregado		Água	SP PCE PF4001
					Miúdo	Graúdo		
		(kg*)	(kg*)	(kg*)	(kg*)	(kg*)	(kg*)	(%**)
REF	-	350	-	-	865	955	193	0,4
ST02	2%	350	6,9	-	861	952	193	0,6
QT02	2%	350	-	8,3	861	952	193	0,4
ST04	4%	350	13,7	-	857	949	193	0,6
QT04	4%	350	-	16,5	857	949	193	0,4
ST08	8%	350	27,4	-	850	943	193	0,8
QT08	8%	350	-	33,1	850	943	193	0,4
ST16	16%	350	54,9	-	834	930	193	1,8
QT16	16%	350	-	66,0	834	930	193	0,4

* consumo por m^3 de concreto

** dosagem em relação à massa de cimento

A resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral foram determinadas por meio de ruptura em prensa hidráulica (EMIC DL 20000) com célula de carga de 200 kN. Para determinar a velocidade de pulso ultrassônico, foi utilizado um aparelho Tico Tester (Proceq). O desempenho ambiental da matriz equivale à quantidade total de cimento Portland (kg/m³) necessária para fornecer 1,0 MPa de resistência mecânica ao concreto; intensidade de cimento (ic) (Damineli, Pileggi, & John, 2017); e foi calculado através da **Equação 1**.

$$ic = \frac{b}{c} \qquad \textbf{(Equação 1)}$$

b = consumo total de cimento Portland (kg/m³)

c = resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As técnicas aplicadas para determinação das propriedades físicas dos materiais revelaram semelhanças entre as adições ST e QT. Os SCM apresentaram diâmetros de partículas inferiores aos do cimento e massas especificas equivalentes e igualmente inferiores à do CPV, como observado no **Quadro 1**, apresentado na seção 2, e no **Quadro 3**, apresentado a seguir.

Quadro 3 – Parâmetros granulométricos dos finos

Amostra	D90 (µm)	D50 (µm)	D10 (µm)
ST	25,4	6,2	1,3
QT	18,5	4,8	1,0
CPV	39,2	15,9	2,1

A interação entre os SCM e o cimento Portland é fortemente favorecida por sua finura, visto que este fator pode influenciar diretamente a reatividade dos SCM, proporcionando maior área superficial para que a reação aconteça (Korpa, Kowald, & Trettin, 2008; Snellings, Mertens, & Elsen, 2012; Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015). Assim, ST e QT expressaram significativo potencial para atuar como agentes nucleadores, influenciando no aumento do grau de hidratação das matrizes cimentícias. Em relação à sua distribuição granulométrica, as adições ST e QT se encontram apropriadas para aplicação como SCM em matrizes cimentícias, com 100% de suas partículas menores do que 45 µm. Segundo a ASTM C618 (ASTM, 2019), que especifica limites para cinzas volantes e pozolanas naturais ou calcinadas em concretos, é permitida a retenção de até 34% do material na peneira nº 325 (45µm). Os principais constituintes químicos obtidos a partir da FRX (em óxidos) são apresentados no **Quadro 4**, seguidos pela composição mineralógica obtida a partir da DRX no **Quadro 5**, a seguir.

Quadro 4 - Teores dos óxidos por FRX

Amostra	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	K_2O (%)	Outros* (%)
ST	58,6	33,1	4,2	1,8	1,0	1,3
QT	92,8	4,6	-	-	1,0	1,6
* Elementos com teores abaixo de 1%						

Quadro 5 - Caracterização quantitativa das fases mineralógicas

Amostra	Quartzo SiO_2 (%)	Caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (%)	Muscovita $KAl_2[Si_3AlO_{10}](OH)_2$ (%)	Anatase TiO_2 (%)	Amorfo (%)
ST	26,6	38,3	-	-	35,7
QT	84,8	-	0,9	-	14,3

Os principais compostos presentes na ST são a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), sendo o QT composto majoritariamente por sílica (SiO_2). De acordo com a DRX, a composição mineralógica da ST consiste em 26,0% de quartzo (SiO_2), 38,3% de caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$] e 35,7% de material amorfo ou desconhecido. Uma vez determinado pela fluorescência de Raios-X um teor de 58,6% de sílica, pode-se inferir que parte da matéria não-cristalina é constituída por sílica amorfa. A presença de fases amorfas é favorável à contribuição da ST como SCM (Massazza, 1993; Silva, et al., 2018). O QT é composto por 92,8% de sílica (SiO_2) e contém baixos teores de outros óxidos, como Al_2O_3 (4,6%) e K_2O (1,9%). De acordo com os resultados da DRX, a sílica presente no QT se encontra na forma de quartzo (SiO_2), mesma fase da sílica presente na ST. Esse mineral possui baixa reatividade com o cimento Portland, devido à sua estrutura cristalina estável (Scrivener, Snellings, & Lothenbach, 2016). As propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido são descritas na **Figura** , a seguir.

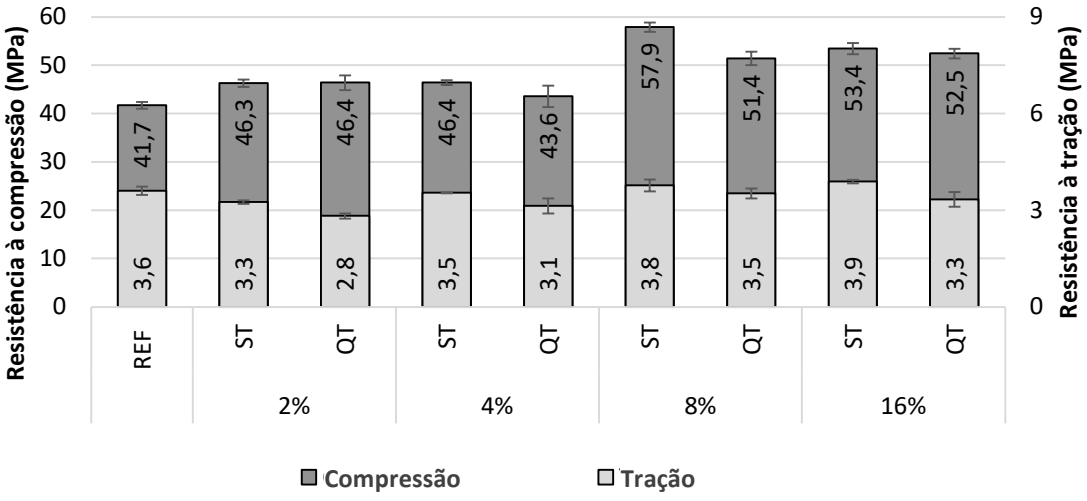


Figura 2 - Propriedades mecânicas dos concretos aos 28 dias

Todos os traços com adição de SCM apresentaram desempenho igual ou superior à referência quando submetidos ao carregamento de compressão. É perceptível um aumento significativo da resistência à compressão dos concretos com adição de 8% e 16% dos dois SCMs avaliados, o que indica ação cimentícia suplementar. O efeito dos SCM, podendo estar relacionado ao preenchimento de vazios

com produtos de hidratação provenientes de nucleação ou reações com a portlandita (Juenger & Siddique, 2015; Scrivener, Snellings, & Lothenbach, 2016) e também efeito fíler, resulta em uma matriz mais densa (Carvalho, et al., 2019). O comportamento mecânico mais satisfatório foi identificado no traço com 8% de ST. Assim, é possível inferir que a resistência à compressão 28% superior à da matriz de referência seja ocasionada pela proporção ideal de preenchimento dos vazios por partículas finas da ST e por produtos de hidratação originados de reações lentas entre a fração amorfa presente nesse material e o $Ca(OH)_2$ (Mehta & Monteiro, 2006). Embora o concreto de referência seja da classe C35, a adição de 8% de ST resultou em um concreto C55. Esse resultado indica aptidão para que o traço ST08 seja aplicado em estruturas que exigem um concreto de alta resistência.

Não houve variação significativa na resistência à tração, com exceção do traço QT 2% que apresentou redução de 22% em relação à referência. Para cada um dos teores de adição, as matrizes QT apresentaram os menores valores de resistência à tração, o que pode indicar menor interação entre os produtos de hidratação formados e enfraquecimento da zona de transição entre a pasta e os agregados (Mehta & Monteiro, 2006). A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) está diretamente relacionada à estrutura de poros da matriz, uma vez que, quanto maior a quantidade de descontinuidades, menor será a velocidade com que o pulso ultrassônico percorrerá a matriz (Mendes, Barreto, Costa, Brigolini, & Peixoto, 2020). Na **Figura** são apresentadas as velocidades de pulso ultrassônico dos concretos após 28 dias de cura.

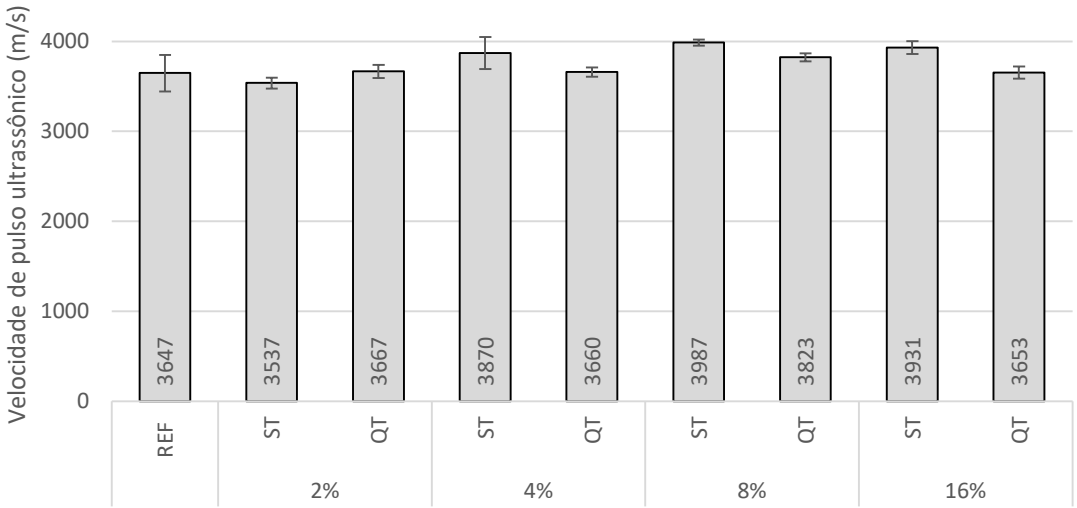


Figura 3 - Velocidade de pulso ultrassônico dos concretos aos 28 dias

Os concretos apresentaram leve variação na VPU em função de suas composições. As matrizes com 4%, 8% e 16% de ST obtiveram VPU superior à referência, sendo todas estas classificadas como de boa qualidade segundo Saint-Pierre, et al. (2016). As matrizes com 4%, 8% e 16% de QT apresentaram valores mais baixos de VPU do que as matrizes com ST; todos próximos entre si e maiores ou iguais à referência, também classificados como de boa qualidade e convergindo com os resultados de resistência à tração. A matriz com adição de 2% de ST obteve VPU média mais baixa do que a referência, sendo classificada como de qualidade questionável por Saint-Pierre, *et al*. (2016). A variação entre os teores de cada SCM não ocasionou alterações consideráveis nos valores de VPU de maneira geral, evidenciando a melhoria das propriedades físicas a partir da substituição mínima de 4%

de cimento por ST. Os resultados de desempenho ambiental das matrizes são apresentados na **Figura 4**.

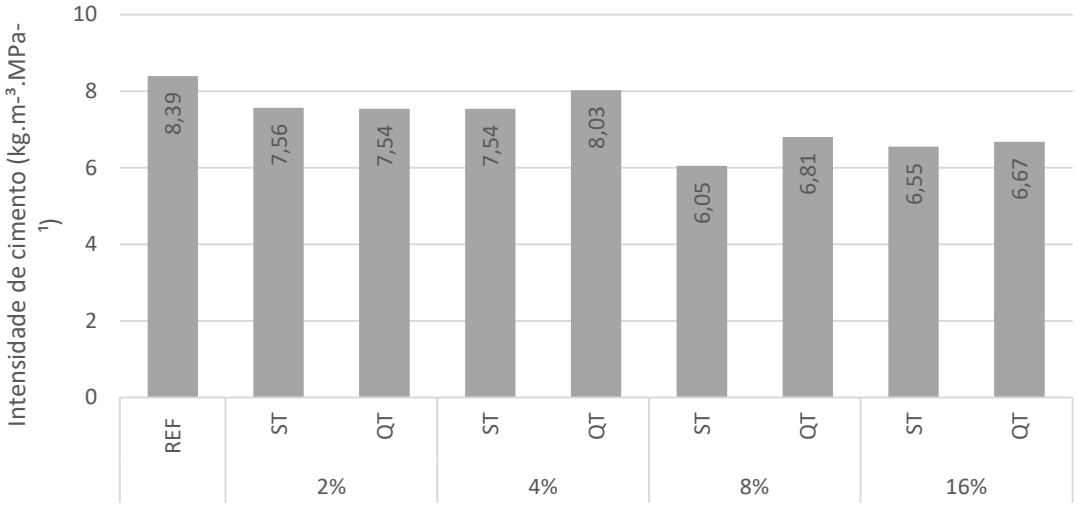


Figura 4 – Intensidade de cimento dos concretos aos 28 dias

As matrizes com ST apresentaram a menor demanda de cimento por MPa dentre os demais materiais, com exceção da matriz com 2% de substituição. Verificou-se uma redução de até 33,3% em relação à referência, com 5,60 kg/m³/MPa sob o teor de 8% de substituição; 7,6% inferior ao mesmo teor de QT. Na literatura, são reportados concretos com intensidade de cimento significativamente baixas, chegando a valores menores do que 3,0 kg/m³/MPa (Carvalho, et al., 2020; Damineli, et al., 2010). Contudo, geralmente trata-se de concretos dosados com métodos específicos que objetivam consumo de cimento abaixo de 250 kg/m³ e resistências à compressão acima de 60 MPa (Carvalho, et al., 2020). Inclusive, é verificada uma intensidade de cimento maior para concretos convencionais em função das exigências de consumo mínimo de cimento pelas normas vigentes, sugerindo um valor mínimo de 5,0 kg/m³/MPa para resistências inferiores a 50 MPa em concretos com SCM (Damineli, et al., 2010). As matrizes deste estudo foram dimensionadas com consumo aproximado de cimento de 350 kg/m³ e sem aplicação de métodos avançados de dosagem. Contudo, o ganho de resistência mecânica de todos os concretos foi superior ao concreto de referência e ocasionou melhor desempenho ambiental, aliado ao ganho de competência mecânica.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam a viabilidade técnica da incorporação de ST em matrizes cimentícias, analisando em termos de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A ST possui 90% de suas partículas abaixo de 20 µm e dispensa moagem, apresentando-se naturalmente mais fina que adições minerais comerciais como metacaulim e sílica ativa. Essa propriedade cria uma vantagem para incorporação desse material em matrizes cimentícias de forma sustentável, sem consumo adicional de energia para beneficiamento. De acordo com os resultados obtidos pela caracterização dos concretos, a incorporação de ST e QT em matrizes cimentícias é tecnicamente viável, apresentando maior

resistência mecânica, melhores propriedades físicas e melhor desempenho ambiental que o concreto referência, com máximo desempenho para 8% de substituição de cimento por ST. Apesar de os dois SCM terem apresentado desempenho satisfatório, a ST obteve resultados superiores em todos os aspectos a partir de 4% de substituição. Portanto, sugere-se que a ST possa ser utilizada como SCM para matrizes cimentícias com o objetivo de produzir elementos estruturais de alta resistência. Além disso, o emprego de ST promove uma destinação ambientalmente adequada ao rejeito de mineração de areia através de sua incorporação em matrizes cimentícias.

AGRADECIMENTOS

Chamada Pública CNPq Nº 23/2018, Processo: 443822/2018-2, Programa Doutorado Acadêmico para Inovação – DAI. Os autores também agradecem à FAPEMIG, CNPq, Vertuos e UFOP pelo apoio para a realização e apresentação dessa pesquisa. Somos gratos ainda pela infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos - RECICLOS – CNPq.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. (2022). *Balança comercial do setor de rochas naturais para ornamentação e revestimento.* Acesso em Nov. de 2023, disponível em https://abirochas.com.br/

ABNT. (2006). *NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (2010). *NBR 15894-1 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: requisitos.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (2023). *NBR6118:23 - Projeto de estruturas de concreto.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials, 74*, 176–187.

ASTM. (2019). *C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* ASTM International.

ASTM. (2023). *C188-17: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.* ASTM International.

ASTM. (2023). *C29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.* ASTM International.

Azevedo, C. F., Carvalho, J. M., Mendes, J. C., Castro, A. S., Barreto, R. R., & Peixoto, R. A. (2020). Compressive strength of reduced concrete specimens considering dimensional distortion of

coarse aggregates. *Construction and Building Materials, 257*. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119448

Carvalho, J. M., Melo, T. V., Fontes, W. C., Batista, J. O., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2019). More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials* , 397–409.

Damineli, B. L. (2013). *Concepts for the Formulation of Concretes with Low Binder Consumption: Rheologic Control, Packing and Particle Dispersion.* São Paulo: USP.

Damineli, B. L., Pileggi, R. G., & John, V. M. (2017). Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 10*(5).

GAIN. (2019). *Newsletter #5.* Global Aggregates Information Network.

Juenger, M. C., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, pp. 71-80.

Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions e management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production, 112*, 4041–4052.

Korpa, A., Kowald, T., & Trettin, R. (2008). Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives. *Cement and Concrete Research, 38*, 955-962.

Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 1244-1256.

Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, pp. 1244-1256.

Lottermoser, B. G. (2006). Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. *Journal of Cleaner Production, 14*, 1176-1177.

Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. *Cement & Concrete Composites, 15*, 185-214.

Mechi, A., & Sanches, D. L. (2010). Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados, 24*(68), 209-220.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials.* McGraw-Hill.

Mendes, J. C., Barreto, R. R., Costa, L. C., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. (2020). Correlation Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity of Cement-Based Composites. *Journal of Nondestructive Evaluation, 39*(2).

Mittri, S., Vieira, G., Guignone, G., Degen, M., Teles, C., & Zulcão, R. (2018). Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.129

MME. (2009). *Relatório Técnico 31: Perfil de areia para construção civil.* MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA.

Peduzzi, P. (2014). *Sand, rarer than one thinks. .* United Nations Environment Program (UNEP). Global Environmental Alert Service (GEAS).

Poon, C.-S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y.-L. (2003). Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites, 25*.

Ramachandran, V., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., & Delgado, A. H. (2002). *Handbook of thermal analysis of construction materials.* New York: Noyes Publications.

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials, 125*, 1022–1027.

Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.* Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials* (1 ed.). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.

Silva, K. D., Silva, G. C., Natalli, J. F., Mendes, J. C., Silva, G. J., & Peixoto, R. A. (2018). Rock Wool Waste as Supplementary Cementitious Material for Portland Cement-Based Composites. *ACI Materials Journal, 15*(5), 653-661.

Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 74*, 211-278.

Souza, A. M., Carvalho, J. M., Salgado, I. L., Santos, C. F., Ferreira, F. A., Pedroti, L. G., . . . Peixoto, R. A. (2023). Influence of filler/cement and powder/total solids on the mixture design of self-compacting micro-concretes containing waste from the ornamental stone industry. *Construction and Building Materials*. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133445

Thomas, P., & Gomes, P. M. (2009). *Mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos para o setor de extração de areia da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.* Brasília: Agência Nacional de Águas.

UNEP. (2014). *Sand, rarer than one thinks.* UN Environment Programme.

UNEP. (2022). *Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert A Crisis.* Geneva, Switzerland: GRID-Geneva, United Nations Environment Programme. doi:978-92-807-3932-9

Whitaker, W., Braga, J. M., & Chaves, A. P. (2002). *Prospeccion de un tramo de rio para el planeo de la mineracion de arenas.* Saltas: Jornadas Argentinas de Tratamento de Minerales.

Young, G., & Yang, M. (2019). Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. *Construction and Building Materials, 197*, 152-156.

Young, J. F., Mindess, S., Bentur, A., & Gray, R. J. (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials.* New Jersey: Prentice Hall.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRODUÇÃO DE ARGAMASSA SUSTENTÁVEL COM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA ANALISE DO TEMPO DE CALCINAÇÃO

Luan Moreti Alves do Nascimento[a] ; Thiago Francisco de Souza[b] ; Rosenira Serpa da Cruz [c]; Bruna Ezequielle Bernades Costa[d] ; Maicon Santos Sousa[e]; Franco Dani Rico Amado[f]

[a] (Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho. CEP 45662-900. Ilhéus-Bahia, Brasil), lmoretin@gmail.com; [b]tfsouza@uesc.br; [c]roserpa@uesc.br; [d]bebcosta@uesc.br; [e]mssousa.egc@uesc.br; [f] fdramado@uesc.br

RESUMO

O tratamento da água é um processo essencial para a saúde pública, nesse processo é gerado um resíduo sólido, o lodo de estação de tratamento de água, que pode causar sérios impactos ambientais se descartado incorretamente. O reaproveitamento do LETA é uma solução sustentável para esse problema. O uso desse resíduo na produção de compostos cimentícios apresenta vantagens pois se trata de um material de baixo custo e abundante, que pode contribuir para a redução dos custos da construção civil. Além disso, o lodo tem potencial para substituição parcial do cimento, o que reduz a emissão do dióxido de darbono. Para a utilização do lodo torna-se necessario a remoção do matérial orgânico. Nesse contexto, a calcinação é um processamento térmico que necessita elevado consumo energético, desse modo, iniciativas que possam reduzir este custo energético são interesses de pesquisadores bem como da indústria. Este estudo avaliou o impacto do tempo de calcinação (60, 90 e 120 min) na resistência à compressão e à tração na flexão de argamassas cimentícias com LETA calcinado a 515°C. O objetivo é encontrar o tempo ideal de calcinação para otimizar o processo, reduzir o consumo de energia e as emissões de gases poluentes.

Palavras-chave: Calcinação, Materiais cimentícios suplementares, Material pozolânico, Utilização de resíduos, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A água é o elemento primordial para a vida e para o desenvolvimento da humanidade, isso perpetua desde as atividades rotineiras da sociedade ao serviço e como insumo na indústria. A produção da água potável é realizada nas estações de tratamento de água (ETA) e o processamento para gerar uma água de qualidade passa por etapas de tratamento como de coagulação e floculação. O processamento nas ETA resulta em um resíduo sólido heterogêneo denominado "lodo de tratamento de água" (LETA), cuja composição química está relacionada com a região de origem da água (LITU et al., 2019).

O volume deste resíduo tem crescido conforme a demanda por água ascende, índice que acompanha o crescimento populacional. Estima-se que diariamente 10.000 toneladas de LETA são geradas globalmente e a destinação para este resíduo comumente são os aterros sanitários, um método danoso ao meio ambiente (NGUYEN et al., 2022).

No que se refere a destinação incorreta do LETA, o Portal Tratamento de Água (2018) publicou "Os lodos de ETAs têm sido dispostos em cursos de água sem nenhum tratamento. Todavia essa prática tem sido questionada pelos órgãos ambientais devido aos possíveis riscos à saúde pública e à vida aquática". A resolução nº 498, de agosto de 2020 do Conselho Nacional Do Meio Ambiente – CONAMA, considera dentre os seus critérios e procedimentos a aplicação do LETA em solos uma alterativa de destinação ambiental adequada.

Assim, objetivando diminuir os impactos ambientais do LETA, grande parte deste resíduo é tratado e disposto como condicionador do solo na agricultura e horticultura, conferindo elementos primordiais para a saúde do solo, entretanto, os metais pesados que existem neste substrato limitam a reutilização do lodo para essa finalidade (WANG et al., 2008). Outra destinação para o LETA é a sua reutilização como carga ou substituição parcial na fabricação de materiais cerâmicos, diante da similaridade da composição química e mineralógica com a argila (ERDOGMUS et al., 2021).

Em âmbito nacional, no que tange ao gerenciamento de resíduos, o Brasil promulgou a Lei 12.305, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dentre os principais objetivos, tem-se a "Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos", o que corrobora a necessidade de propor inovações sustentáveis que gerem impactos ambientais positivos na sociedade.

Hong li (2011) avaliou o custo energético da cadeia produtiva do cimento e verificou o impacto ambiental para a produção deste insumo. Também, nesse contexto, foi analisado o desempenho ambiental do lodo como matéria-prima para a produção do cimento e verificou-se que o custo energético para o processamento é um elemento chave para reduzir o impacto ambiental dessa cadeia produtiva (Hong; Li, 2011).

Diante disso, esta pesquisa visa produzir argamassas cimenticias com LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água) em substituição de 10% do volume do cimento, ou seja, 10% do cimento será substituido por LETA, e por fim, avaliar o efeito da variação de temperatura de calcinação do LETA e determinar as faixas de variações que proporcionam os melhores índices de desempenho mecânico (resistência à tração na flexão e resistência à compressão) com o menor consumo de energia possível. O LETA calcinado em diferentes temperaturas será incorporado em argamassas cimentícias, substituindo parcialmente o cimento Portland. Os impactos dessa substituição serão analisados por meio de ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, duas propriedades fundamentais das argamassas cimentícias.

Espera-se que as argamassas com LETA calcinado possuam comportamento mecânico igual ou melhor que as argamassas de referência (sem LETA), tendo em vista alguns resultados verificados na literatura.

2 REVISÃO DA LITERATURA:

2.1 ARGAMASSA CIMENTÍCIA, TIPOS DE CIMENTO E PROPRIEDADES POZOLÂNICAS

A argamassa cimentícia é um material amplamente utilizado na construção civil, composto por uma mistura de cimento e agregados finos como areia e água. Segundo Mehta e Monteiro (2013) no livro "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", apresentam características de plasticidade, permitindo sua moldagem e aplicação em diversas superfícies. Após a cura, desenvolvem resistência mecânica, aderindo firmemente a diferentes materiais de construção, além disso, oferecem durabilidade, proteção contra elementos externos e propriedades de isolamento térmico e acústico. Tal produto tem aplicação em revestimentos, assentamento de tijolos e blocos, fixação de elementos e reparos estruturais.

No brasil, a indústria do cimento comporta oito tipos básicos normalizados de cimento Portland e suas respectivas variações estão disponíveis, essa diversidade é resultado das diferentes proporções de clínquer, sulfatos de cálcio e adições, como escórias, pozolanas e fíler, conferindo a cada tipo de cimento características específicas que o tornam adequado para uma ampla variedade de aplicações. Duas dessas variedades são o Cimento Portland Composto (CP II-F) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV), que se diferenciam principalmente pela proporção de elementos utilizadas em sua composição. O CP II-F é um tipo de cimento que contém adição de fíler calcário em sua formulação, em proporções um pouco maiores em comparação com o Cimento Portland Comum (CP I-S). Essa adição de fíler calcário contribui para a melhoria das características de trabalhabilidade da mistura. No que se refere ao CP IV, o cimento Portland pozolânico, apresenta proporções maiores de adição de pozolanas em sua composição, podendo variar de 15% a 50%, tem propriedades de resistência e durabilidade do concreto, especialmente em ambientes agressivos (FORTI BATTAGIN, 2011).

Acerca do conceito pozolânico, é notado historicamente que argilas contendo cinzas vulcânicas encontradas em Pozuolli, Itália, deram origem às pozolanas, que são substâncias naturais ou artificiais de composição silicosa ou sílico-aluminosa. Embora não sejam cimentícias por si só, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias. Essa reação permite o uso das pozolanas como aditivos na produção de materiais de construção, como cimentos, devido às suas propriedades de ligação e resistência (CAMPOS et al., 2018). Essa reação pozolânica contribui para melhorias nas propriedades do cimento, como aumento da resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade do material (SILVA et al., 2020).

A indústria da construção civil é um setor crucial para o desenvolvimento socioeconômico de um país, sendo o cimento um insumo fundamental nesse contexto. No Brasil, a indústria do cimento enfrenta grandes desafios em relação às emissões de CO^2 que impactam diretamente o meio ambiente e a sustentabilidade do setor. Na busca por ações que reduzam esse impacto ambiental, destacam-se a pesquisa de novas fontes alternativas de adições no cimento, para que se possa produzir o cimento de forma sustentável. Ou seja, investir em inovações tecnológicas que levem a menor emissão de CO2 é imprescindível para o setor (FORTI BATTAGIN, 2011).

Os dados demonstrados pela SEEG (2023) de emissão de dióxido de carbono (CO2) da indústria do cimento no Brasil indicam um total de 137.103.595 toneladas foram lançadas na atmosfera entre os anos de 2018 a 2021, ocasionando em um crescimento de 17,6% como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 Dados de emissão de CO2 em toneladas emitidos pela SEEG

Ano	Emissão em Toneladas
2018	31.216.613
2019	32.552.843
2020	35.454.529
2021	37.879.610
Total	**137.103.595**

Scrivener et al. (2018) discutem o impacto ambiental da produção de cimento e exploram possíveis soluções para tornar a indústria mais sustentável. Eles abordam a redução das emissões de CO2, o uso de materiais alternativos na produção de cimento e a importância de práticas de gestão de resíduos. Outro material que contribui para as propriedades de trabalhabilidade das argamassas cimentícias, é o aditivo superplastificante, sendo um componente utilizado com a finalidade de melhorar suas propriedades de fluidez e trabalhabilidade. Esse aditivo é capaz de reduzir significativamente a viscosidade plástica, facilitando sua aplicação e espalhamento sem a necessidade de aumentar a relação água/cimento (a/c) MONTEIRO et al., 2012).

Ainda segundo Monteiro et al. (2012) a principal vantagem do uso de aditivos superplastificante na argamassa cimentícia é a obtenção de uma mistura mais fácil de trabalhar, proporcionando melhor aderência em superfícies verticais ou irregulares e garantindo a homogeneidade da argamassa para uma aplicação mais eficiente e de alta qualidade.

Conclui-se na indústria da construção civil, segundo a perspectiva do livro de BATTAGIN (2012) que somente um esforço conjunto entre a indústria, governo e a sociedade, por meio de políticas e práticas sustentáveis, será possível mitigar os impactos ambientais do setor, e garantir um futuro mais verde e sustentável para o Brasil.

2.2. Sustentabilidade: utilização do lodo de ETA

2.2.1. Resíduos sólidos, leis e diretrizes

Segundo Jacobi e Besen (2011) a sociedade moderna enfrenta o desafio de lidar com a geração excessiva e a disposição adequada dos resíduos sólidos de maneira ambientalmente segura. Esse tema se tornou prioritário no Brasil e em outros países desde a Conferência Rio 92, devido ao impacto no aquecimento global e nas mudanças climáticas. A gestão sustentável dos resíduos sólidos tem como prioridades a redução na origem, a diminuição da disposição final em aterros, o aumento da reutilização, a participação da sociedade, a compostagem e a recuperação de energia.

No Brasil, a gestão e manejo dos resíduos sólidos são regulados pela Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Essas legislações estabelecem os marcos legais, sendo que o plano de resíduos sólidos deve fazer parte dos planos municipais de Saneamento. O Decreto nº 7.404/2010 foi implementado, e estabeleceu um novo marco regulatório para o país (BARBOSA DA SILVA JUNIOR; DOS SANTOS; DOS SANTOS ARAÚJO, 2022).

Dentre os principais objetivos dessa lei, destaca-se o Art. 7º da LEI 12.305:

Art. 7o São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

I - Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; II - Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; IV - adoção, desenvolvimento E aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais; V - Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos; VI - Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados; VII - gestão integrada de resíduos sólidos; (Brasil, 2010)

Nesse contexto, o Portal Tratamento de água (2018) demonstra a preocupação com o descarte adequado do lodo de esgotos sendo um tema relativamente recente no Brasil. Até há alguns anos, os projetos de tratamento mencionavam apenas a "disposição final" do lodo, sem especificar o local ou o método de descarte. Desse modo, as empresas responsáveis pelo saneamento básico buscavam simplesmente se livrar do resíduo, e a forma mais comum de descarte era em aterros sanitários. No entanto, essa abordagem não considerava devidamente os impactos ambientais e a necessidade de uma gestão adequada dos resíduos.

Uma alternativa para a utilização desse resíduo pode ser verificada por Ruviaro et al. (2021) após analisar o alto impacto ambiental através das emissões de gás carbônico (CO^2) associado à produção de cimento Portland, propôs a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS) uma alternativa viável para reduzir essas emissões, sendo o LETA enquadrado como MCS.

O lodo de ETA, resíduo resultante do processo de coagulação e floculação nas ETAs, é classificado como resíduo sólido não inerte, pertencente à Classe II A, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). Esse tipo de resíduo não pode ser descartado em corpos d'água ou na rede de esgoto, sendo destinado principalmente aos aterros sanitários, o que acarreta altos custos para as empresas responsáveis (MANSOUR; ABDEL SHAFY; EL AZAB, 2020) (COCCO, 2017).

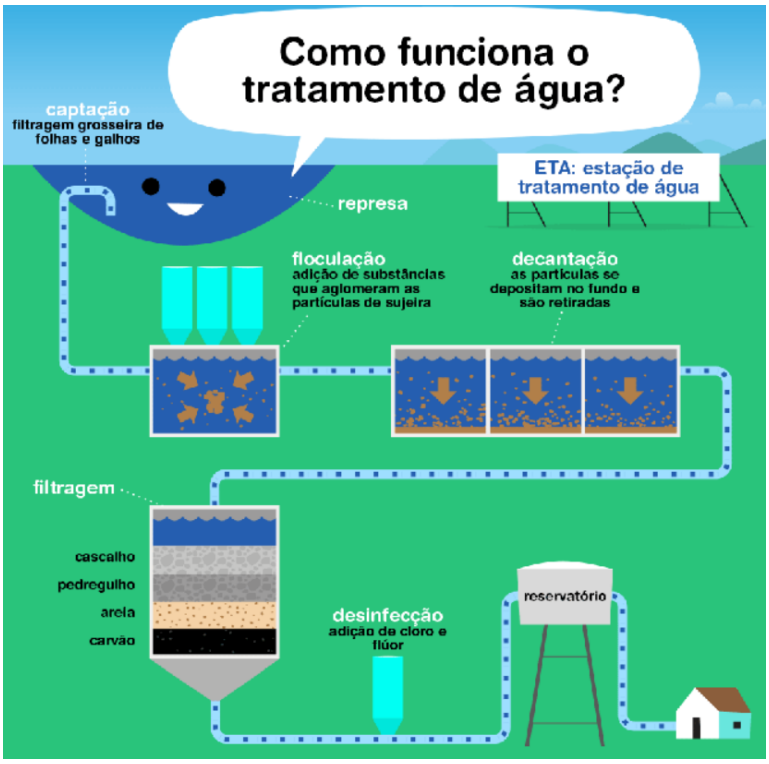
Nesse sentido, o lodo de ETA apresenta-se como uma alternativa promissora, sendo a utilização desse material na produção de materiais de construção como uma solução promissora o impacto ambiental, ao mesmo tempo em que oferece uma opção sustentável e eficiente. (RUVIARO et al., 2021)

2.2.2. Lodo de ETA: características, calcinação e utilização

Por se tratar de um bem primordial para a relação do homem e sociedade, a água está presente em todos os contextos na qual o ser humano está inserido, ou seja, a necessidade de água potável se torna clara, como resultado grandes quantidades de lodo de ETA são produzidas diariamente. (GOMES et al., 2019; RUVIARO et al., 2020).

No Brasil, é estimado que o volume diário de lodo gerado em uma estação de tratamento varie entre 0,1% e 3% em relação ao volume diário de água tratada (BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). O processo de tratamento em uma estação, envolve processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 Etapas do processamento de água.



Segundo Ruviaro et al. (2020) o lodo de ETA tem despertado interesse na indústria da construção civil devido à sua similaridade com os materiais cimentícios e suas propriedades químicas e físicas. Composto por Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2, que são os principais componentes das matérias-primas cimentícias, o lodo de ETA apresenta potencial para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis. As composições do loto de ETA podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 Exemplo de composição química do LETA bruto (em % peso). Adaptado de Ruviaro et al. (2020)

Componentes	Lodo de ETA (%)
SiO_2	45,47
Al_2O_3	20,41
Fe_2O_3	7,94
MgO	1,58
K_2O	1,20

Gomes et al. (2019) identifica algumas das aplicações do lodo de ETA, como a produção de telhas cerâmicas incorporando o lodo, resultando em propriedades térmicas e acústicas favoráveis. Além disso, o lodo de ETA tem sido utilizado como agregado leve na fabricação de concretos, proporcionando redução de peso e melhorias nas propriedades mecânicas. Essas inovações apontam para a possibilidade de valorizar o lodo de ETA como um recurso viável, promovendo a sustentabilidade na indústria da construção e reduzindo a necessidade de utilizar matérias primas tradicionais.

Analisando a utilização do lodo de ETA em argamassas cimentícias, Godoy et al. (2019) realizaram a caracterização de um lodo proveniente de uma estação de tratamento de água localizada no sul do Brasil, foi observado que a reatividade desse resíduo é influenciada pela temperatura de calcinação, porém, não forneceram informações sobre o tempo de calcinação utilizado.

A calcinação é um processo termoquímico no qual um material é submetido a altas temperaturas, com o objetivo de promover a decomposição térmica e a transformação físico-química desse material. Durante a calcinação, ocorrem reações que resultam na remoção de água, dióxido de carbono entre outros componentes voláteis, onde promove um produto com propriedades diferentes do material original (CAMPOS et al., 2018).

No que se refere ao LETA, a calcinação objetiva submeter o resíduo a temperaturas controladas para promover a queima dos compostos orgânicos e a promover a desidroxilação de alumino-silicatos existentes. Pesquisas relacionadas a utilização do LETA como substituto parcial do cimento em argamassas cimentícias, apontam um resultado que demonstra um efeito pozolânico superior, ou seja, uma capacidade de reagir quimicamente com o cimento e melhorar suas prioridades. Os dados demonstraram aumento na resistência à compressão chegando até 5% de crescimento com 5% de substituição, isto devido ao efeito de nucleação do LETA e a sua atividade pozolânica superior, que favorece a formação de C-S-H (Cálcio Silicato-Hidratado), composto responsável pela resistência mecânica do cimento, tais fatores evidencia a atividade pozolânica desse resíduo. (RUVIARO et al., 2020; STEIN, 2016; EL-DIDAMONY et al., 2014)

No que diz respeito às propriedades mecânicas das argamassas cimentícias incorporando lodo de ETA, são escassas as pesquisas sobre a resistência à compressão, conforme destacado por Ahmad et al (2016). A falta de estudos nesse aspecto limita a aplicação prática desse material. Além disso, há ainda uma carência ainda maior de pesquisas relacionadas à resistência à tração na flexão, uma propriedade importante na caracterização de argamassas cimentícias.

3 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

3.1 MATERIAIS E FLUXOGRAMA

Os materiais que foram utilizados na produção dos corpos de prova, para posterior ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, são:

Cimento Portland CP V-ARI;

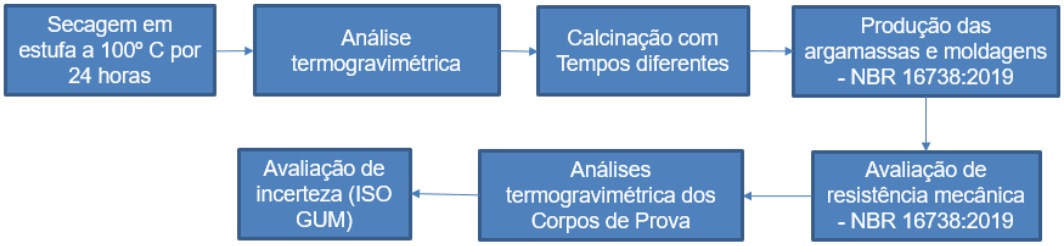
Areia fina: a areia foi fornecida por uma empresa localizada na cidade de Ilhéus – BA. Foi utilizada a areia fina, a areia mais fina pode impactar menos na consistência das argamassas (em relação à argamassa de controle), o que pode promover uma maior facilidade no momento da moldagem das argamassas nos moldes.

Água: fornecida pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA) à cidade de Ilhéus-BA.

LETA (Lodo de estação de tratamento de água) Calcinado: o LETA foi coletado em uma estação de tratamento de água da EMBASA (Empresa Baiana de Águas e Saneamento S/A), localizada no município de Buerarema – BA. O LETA foi coletado na sua forma bruta, diretamente de um dos bags de armazenamento da ETA, e encaminhado à UESC. Foi calcinado de acordo com os resultados da análise termogravimétrica.

As etapas para a realização do projeto podem ser visualizadas no fluxograma da figura 2.

Figura 2 Fluxograma da metodologia.



3.2 ENSAIOS

Na tabela 3 é demonstrada a quantidade dos materiais utilizados para a produção da argamassa cimenticia com LETA.

Tabela 3 Composição utilizada para produção das argamassas.

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland CP V- ARI	440
LETA calcinado	90
Água	225
Areis	1350

As análises termogravimétricas foram realizadas numa termobalança Shimadzu, modelo DTG-60H, onde foram utilizados cadinhos de alumina e massas de amostra de aproximadamente 10 mg. Foi utilizada uma razão de aquecimento 10 ºC.min^{-1} , na faixa de temperatura ambiente até 900 ºC, em atmosfera de ar sintético com vazão de 50 mL.min^{-1}.

As análises de DRX foram realizadas pelo método do pó utilizando-se um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-6000, com radiação CuKα (λ = 0,1542 nm), filtro de Ni, voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA.

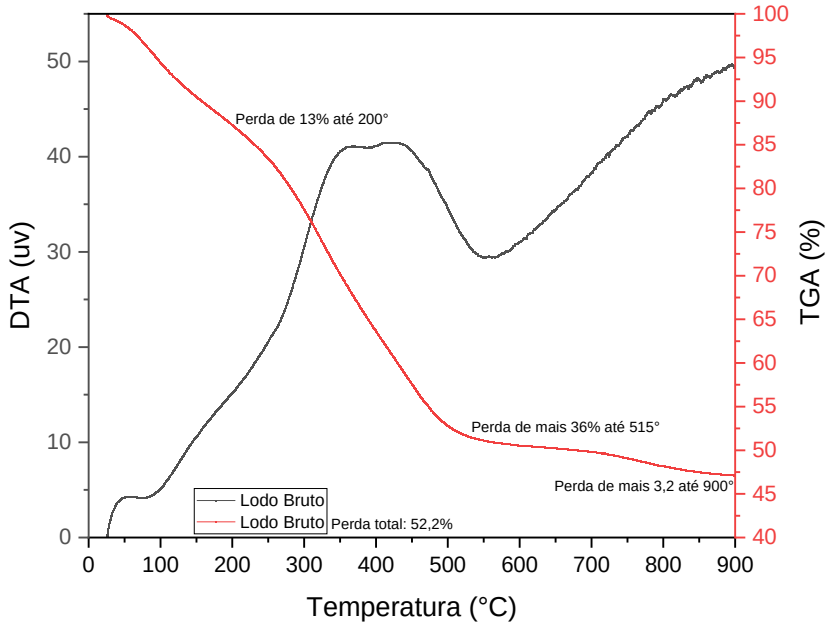
Os ensaios de tração na flexão foram realizados pelo equipamento Autograph AG-X Plus 100KN, baseado na NBR 16738 que especifica a quantidade e dimensão dos apoios e do cilindro de força.

Os ensaios de tração na flexão foram realizados pelo equipamento Autograph AG-X Plus 100KN, baseado na NBR 16738 que especifica a dimensão dos pratos superiores e inferiores e força exercida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

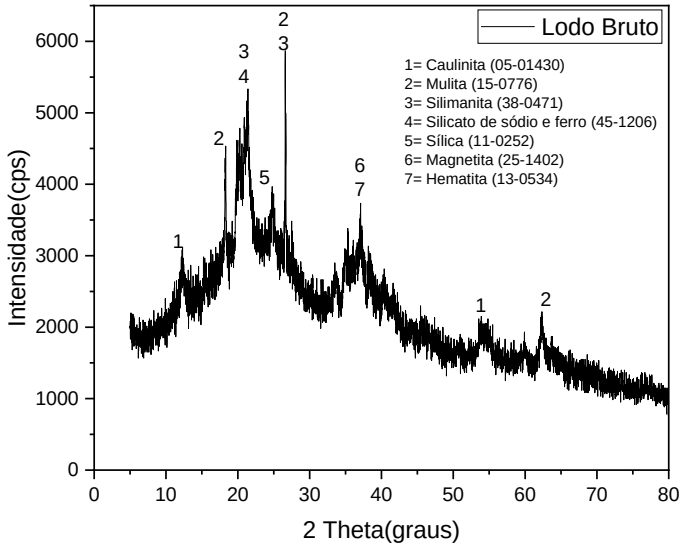
O resultado da análise de TGA pode ser visualizada na figura 3 onde a primeira perda de 13% que ocorreu até 200°C é atribuída a perda de água de umidade(água não estrutural), a segunda perda de 36% que ocorre até 515°C é atribuída a queima de matéria orgânica, desidroxilação de hidróxidos, a terceira perda é de 3,2% que ocorre ate 900°C é atribuída à perda de hidroxila (água estrutural). A perda total de massa do lodo é de 52,2%.

Figura 3 Análise termogravimétrica.



As análises de DRX podem ser analisadas na figura 4 com as possíveis fases químicas identificadas sendo tais compostos formados à base de alumínio, ferro e sílica. Observa-se a presença de Mulita: uma adição mineral de alta atividade pozolânica, ou seja, ela reage com a cal hidratada do cimento para formar gel de silicato de cálcio. Silimanita: é uma adição mineral de alta atividade pozolânica, semelhante à mulita. Silicato de sódio: é uma adição mineral que pode ser utilizada para melhorar a trabalhabilidade do concreto. Silicato de ferro: é uma adição mineral que pode ser utilizada para melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

Figura 4 Análise DRX.



Observa-se na figura 5 a analise dos ensaios mecânicos a resistência à tração na flexão, onde os valores de referência – sem a utilização do lodo como substituto parcial do cimento – demonstraram maior resistência à tração na flexão que as outras amostras, as amostras que utilizaram LETA calcinado a 60 minutos obtiveram melhores índices de resistência comparado com as amostras calcinadas em tempos superiores, o que foi avaliado como positivo, visto que não foi necessario maior tempo de calcinação – maior custo energético – para alcancar melhores resultados mecânicos. Os ensaios de resistência à compressão foram avaliados de maneira semelhante, como visualizado na figura 6.

Figura 5 Gráfico de resistência à tração na flexão.

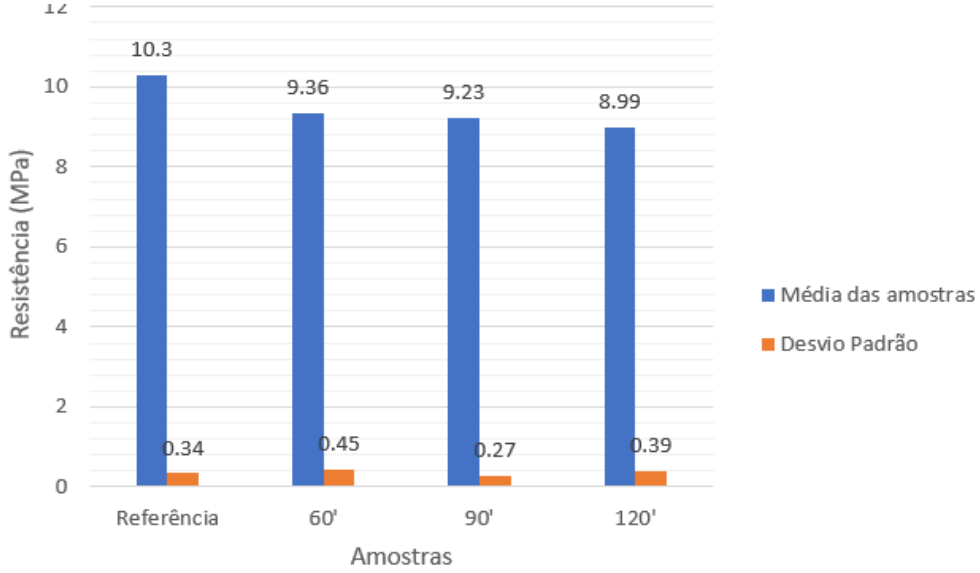
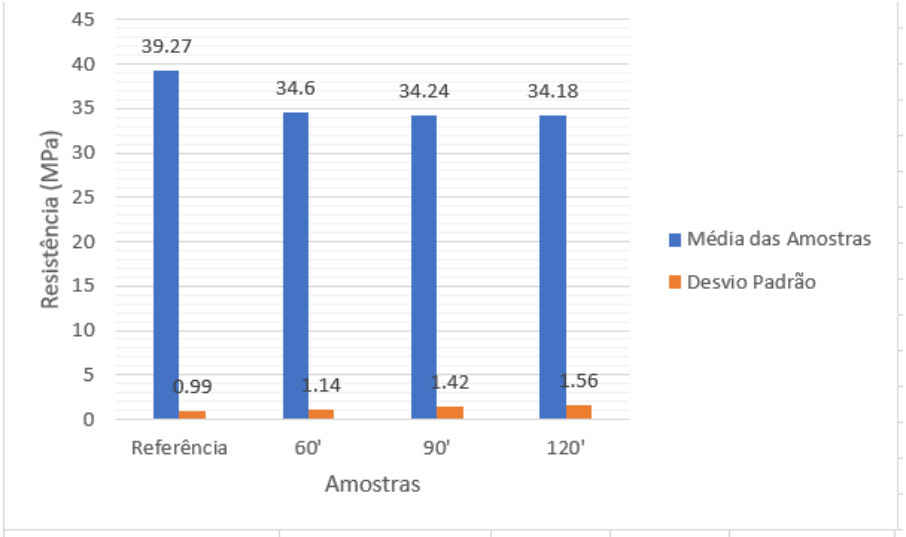


Figura 6 Gráfico de resistência à compressão.



5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que o tempo de calcinação de 60 minutos se destaca como o ideal para a produção de argamassas cimentícias com lodo de ETA calcinado a 515°C. Este tempo

proporcionou o melhor desempenho em termos de resistência à compressão e à tração na flexão, além de representar um menor consumo energético, aspecto crucial para a sustentabilidade do processo.

Embora os resultados sejam promissores, a investigação precisa ser aprofundada. A realização de ensaios de reatividade e difração de raios X permitirá uma compreensão mais abrangente da estrutura mineralógica dos corpos de prova, elucidando as relações entre as propriedades mecânicas e a microestrutura do material.

Com base em análises mais detalhadas, será possível otimizar ainda mais o processo de calcinação, buscando o equilíbrio entre o tempo de calcinação, as propriedades mecânicas e o consumo energético. Essa otimização trará benefícios para a indústria da construção civil, viabilizando a produção de argamassas com lodo de ETA de forma sustentável e economicamente viável, com menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

LITU, L. et al. (2019) COMPARATIVE STUDY BETWEEN FLOCCULATION - COAGULATION PROCESSESIN RAW/WASTEWATER TREATMENT. AgroLife Scientific Journal, v. 8, n. 1, 2019.

NGUYEN, M. D. et al. (2022) Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. Environmental Technology and InnovationElsevier B.V., , 1 nov. 2022.

Portal Tratamento de Água. (2018) Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. 2018. Disponível em: < https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/> . Acesso em: 01 mai. 2018

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020. Resolução nº 498, 19 de Agosto de 2020. Ministério do Meio Ambiente.

WANG, P.-F. et al. (2008) Study of heavy metal in sewage sludge and in Chinese cabbage grown in soil amended with sewage sludge. African Journal of Biotechnology, v. 7, n. 9, p. 13291334, 2008.

ERDOGMUS, E. et al. (2021) New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. Journal of Building Engineering, v. 42, 1 out. 2021.

Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

HONG, J.; LI, X. (2011) Environmental assessment of sewage sludge as secondary raw material in cement production - A case study in China. Waste Management, v. 31, n. 6, p. 1364–1371, jun.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. (2011) Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos Avancados, v. 25, n. 71, 2011.

BARBOSA DA SILVA JUNIOR, E.; DOS SANTOS, T. N.; DOS SANTOS ARAÚJO, Á. (2022) sustentabilidade na construção civil. Revista Eletrônica TECCEN, v. 15, n. 1, 2022.

RUVIARO, A. S. et al. 2021 Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. Journal of Cleaner Production, v. 327, 2021.:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

BERNARDO, L.; DANTAS, A.; VOLTAN, P. E. N. (2012) Métodos e técnicas de tratamento dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: LDiBe Editora, 2012. BERODIER.

GOMES, S. C. et al. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. Resources, Conservation and Recycling, v. 145, p. 148-159, 2019.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T. P.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 243-260, out./dez. 2020.

MANSOUR, M. S. M.; ABDEL-SHAFY, H. I.; EL AZAB, W. I. M. Innovative reuse of drinking water sludge for the treatment of petroleum produced water to enhance oil recovery. Egyptian Journal of Petroleum, v. 29, n. 2, p. 163–169, 1 jun. 2020.

COCCO, M. Resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de lodo de ETA e calcário moído. Santa Maria, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

GODOY, L. G. G. DE et al. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. Construction and Building Materials, v. 223, p. 939950, 30 out. 2019.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3R concept. Journal of Cleaner Production, v. 124, p. 1-13, 2016.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2013). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education. Scrivener, K. L., Juilland, P., Monteiro, P. J., & Weiss, J. (2018). Applications of inorganic polymer concrete. In Inorganic polymer concrete (pp. 91-106). Springer.

Scrivener KJohn VGartner E. (2018) Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research. 2018.

CAMPOS, A. R. DE et al. Calcinação. Em: Tratamento de Minérios. [s.l: s.n.].

EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, K. A.; HEIKAL, M. (2014) Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slagfired drinking water sludge composite cement pastes. HBRC Journal, v. 10, n. 1, p. 73-81, 2014.

SILVA, L. H. P. et al. (2020) Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.

STEIN, R. T. (2015) Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de lodo de ETA. Santa Maria, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

GASTALDINI, A. L. G. et al. (2015) The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. Construction and Building Materials, v. 95, p. 513-520, 2015.

RODRÍGUEZ, N. H. et al. (2010) Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 5, p. 778-786, 2010.

TIRONI, A. et al. (2013) Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. Cement and Concrete Composites, v. 37, p. 319327, 2013.

DE OLIVEIRA ANDRADE, J. J. et al. (2018) Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. Journal of Cleaner Production, v. 192, p. 159168, 10 ago. 2018.

. NBR 16738: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2019.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DE UM ADITIVO À BASE DE LIGNINA RESIDUAL PARA MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

Victor R. Carvalho[a]; Karollaine Teresa S. e Silva[b]; Bruno Eduardo L. Baêta[c]; Ricardo André F. Peixoto[d]

[a]Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 35402-163, Ouro Preto, Brasil, victor.rezende.carvalho@gmail.com

[b]Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 35402-163, Ouro Preto, Brasil, karollaine.silva@aluno.ufop.edu.br

[c]Laboratório de Química Tecnológica e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, 35402-163, Ouro Preto, Brasil, brunobaeta@ufop.edu.br

[d]Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 35402-163, Ouro Preto, Brasil, ricardofiorotti@ufop.edu.br

RESUMO

Nas biorrefinarias, o pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração gera um licor residual à base de lignina, polímero que apresenta propriedades plastificantes quando incorporado em matrizes cimentícias. Este estudo buscou avaliar o desempenho de um licor à base de lignina residual como aditivo para argamassas de cimento Portland. O licor foi obtido de um pré-tratamento Organosolv do bagaço de cana-de-açúcar e foi incorporado em diferentes dosagens nas argamassas (1,5, 4,0, e 6,5% em relação à massa de cimento). Para fins comparativos, matrizes com dosagens de um aditivo comercial à base de lignosulfonatos (0,3, 0,8 e 1,3%) e matrizes não aditivadas também foram avaliadas. As argamassas produzidas foram submetidas a ensaios no estado fresco (índice de consistência) e no estado endurecido (velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão e resistência à tração na flexão). Nas dosagens avaliadas, o aditivo proposto apresentou melhor desempenho plastificante que o aditivo comercial. Ainda, as matrizes contendo o aditivo à base de lignina residual apresentaram melhor desempenho mecânico que as matrizes não aditivadas. Este estudo alinha-se com os princípios da economia circular e oferece uma alternativa para o aproveitamento de resíduos industriais na produção de matrizes cimentícias ecoeficientes.

Palavras-chave: Lignina residual, cimento Portland, aditivos plastificantes, biorrefinarias, lignosulfonatos.

1 INTRODUÇÃO

A lignina é o segundo polímero natural mais abundante na natureza, podendo ser obtida a partir de fontes como plantas, madeira e resíduos agroindustriais. Sua diversidade de grupos funcionais e suas propriedades estruturais a tornam uma matéria-prima valiosa para a produção de uma ampla gama de produtos químicos (Collins *et al*. 2019).

Os principais métodos usados para separar a lignina são os processos sulfito, Kraft, soda e Organosolv. Eles são empregados em biorrefinarias lignocelulósicas e na indústria de papel e celulose, gerando como subproduto licores residuais à base de lignina. As ligninas obtidas desses licores, conhecidas como ligninas técnicas, têm uma geração global estimada em 100 milhões de toneladas por ano (Kun e Pukánszky 2017; Bajwa *et al*. 2019). Elas podem ser utilizadas como matérias-primas na produção de adesivos, resinas, dispersantes, entre outros produtos (Aro e Fatehi 2017).

As ligninas obtidas do processo sulfito, mais conhecidas como lignosulfonatos, são amplamente utilizadas na indústria da construção civil como aditivos plastificantes de 1ª geração para matrizes cimentícias. Quando comparados aos aditivos de 2ª e 3ª geração, os aditivos à base de lignosulfonatos são mais baratos e ambientalmente favoráveis (Arel e Aydin 2017). No entanto, sua grande variabilidade de composição e pureza restringem sua comercialização e aplicação (Aitcin 1998).

Buscando novas alternativas para a produção de aditivos à base de lignina, estudos avaliaram o desempenho de diferentes ligninas técnicas como plastificantes e superplastificantes para concretos e argamassas (Yu *et al*. 2013; Konduri e Fatehi 2015; Takahashi *et al*. 2015). A pesquisa de Carvalho *et al.* (2023), no entanto, mostrou que os estudos relacionados à utilização de ligninas geradas a partir do pré-tratamento Organosolv ainda são escassos, mas representam uma estratégia promissora para o mercado brasileiro.

As ligninas Organosolv vêm ganhando popularidade no mercado global devido a sua pureza e viabilidade de serem geradas por processos mais sustentáveis de deslignificação (Upton e Kasko 2016; Bajwa *et al*. 2019). Além disso, o pré-tratamento Organosolv pode ser adotado no fracionamento do bagaço de cana-de-açúcar (Meighan *et al*. 2017), a biomassa vegetal mais abundante no Brasil.

Em um estudo anterior (Carvalho *et al*. 2022), os autores demonstraram o potencial plastificante de um licor à base de lignina obtido a partir do pré-tratamento Organosolv do bagaço de cana-de-açúcar em pastas de cimento Portland. A fim de complementar os conhecimentos sobre o tema, este estudo buscou avaliar a performance do licor residual em argamassas de cimento Portland. Para este propósito, o aditivo proposto foi avaliado em diferentes dosagens e as matrizes aditivadas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido. Os achados deste trabalho contribuem com os conhecimentos acerca dos aditivos à base de lignina e oferecem uma alternativa de valorização para os resíduos industriais gerados nas biorrefinarias lignocelulósicas.

2 MATEIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

A Figura 1 apresenta o licor residual à base de lignina Organosolv (LO) avaliado como aditivo neste estudo. O material foi obtido do pré-tratamento Organosolv do bagaço de cana de açúcar a partir da utilização de glicerol como solvente orgânico, conforme metodologia adaptada de Meighan *et al*. (2017) por Carvalho (2022). Para avaliar o desempenho do aditivo proposto, um aditivo comercial de 1ª geração à base de lignosulfonatos (LS) também foi usado (MC-Bauchemie Muraplast FK93).

Figura 1 – Licor residual à base de lignina Organosolv.

Para a produção das argamassas foi utilizado o cimento CPII-F 32, composto por 75-89% de clínquer e sulfato de cálcio e 11-25% de material carbonático (ABNT 2018). Os autores optaram por esse cimento pois ele possui apenas adições de fílers inertes, o que permite uma melhor avaliação dos aditivos nas matrizes. Por fim, como agregado miúdo foi utilizada uma areia quartzosa natural de rio, devidamente seca em estufa e separada por peneiramento em 4 frações iguais, conforme proposto pela NBR 16697 (ABNT 2015): areia fina (0,15-0,30 mm); areia média-fina (0,30-0,60 mm); areia média-grossa (0,60-1,18 mm); e areia grossa (1,18-2,36 mm).

2.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas foram produzidas conforme o traço proposto pela NBR 7215 (ABNT 2019a), que consiste na relação de 1:3:0,5 (cimento:areia:água). A dosagem dos aditivos foi adotada conforme os valores indicados pelo fabricante do aditivo comercial (LS). Assim, sabendo que o LS pode ser usado em concentrações de 0,3 a 1,3%, foram adotadas as dosagens de 0,3%, 0,8% e 1,3%. Para o licor residual (LO), as dosagens adotadas foram cinco vezes maiores (1,5%, 4,0% e 6,5%). Essa consideração foi feita de acordo com os resultados obtidos nos primeiros testes com o material (Carvalho *et al*. 2022).

Para serem avaliadas no estado endurecido, 3 corpos de prova prismáticos (4x4x16 cm) foram produzidos para cada traço. Os corpos de prova foram desmoldados em 24 horas e permaneceram em uma câmara úmida (25 ± 2 °C ; umidade relativa de 90% ± 5%) até a data dos ensaios. A Tabela 1 apresenta as quantidades de materiais adotadas para cada traço, considerando a produção de 3 corpos de prova (ABNT 2019a).

Tabela 1 – Proporções de materiais para a produção das argamassas.

Traço	Cimento (g)	Água (g)	Areia (g)	LO (g)	LS (g)
REF	450	225	1350	-	-
LO-1,5	450	225	1350	6,75	-
LO-4,0	450	225	1350	18,00	-
LO-6,5	450	225	1350	28,25	-
LS-0,3	450	225	1350	-	1,35
LS-0,8	450	225	1350	-	3,60
LS-1,3	450	225	1350	-	5,85

2.3 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

As argamassas propostas foram avaliadas no estado fresco pelo ensaio de índice de consistência, previsto na NBR 13276 (ABNT 2016). O ensaio consiste na medição do diâmetro de espalhamento da argamassa após 30 golpes na mesa de consistência (*flow table*).

2.4 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram avaliados no estado endurecido pelos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e de resistência mecânica. Para o ensaio de VPU, os corpos de prova foram secos em estufa à 60°C por 12 horas e em seguida testados conforme a NBR 8802 (ABNT 2019b), utilizando um medidor Proceq Pundit Lab+.

A caracterização mecânica se deu pelos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão. Os ensaios foram realizados em uma prensa universal (EMIC DL 20000/PC200), de acordo com a NBR 16738 (ABNT, 2019a).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A Figura 2 apresenta os índices de consistência das argamassas propostas. A argamassa não aditivada (REF) sofreu degradação durante o ensaio e por isso seu índice de consistência foi definido como 120 mm, que representa o diâmetro do molde usado.

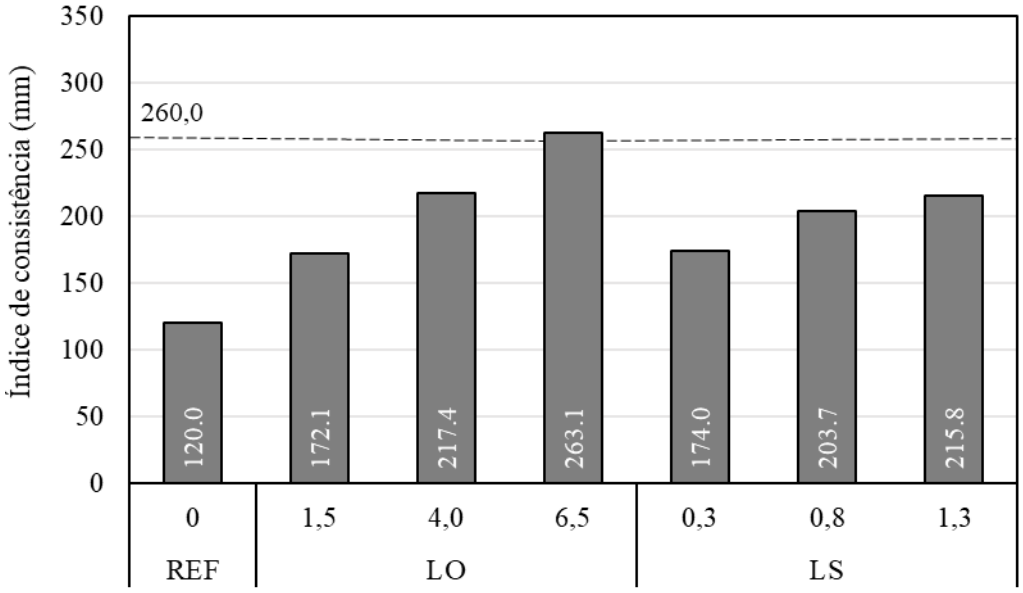


Figura 2 - Resultados do ensaio de índice de consistência

Com relação às argamassas aditivadas, pode ser observada a tendência de aumento nos espalhamentos conforme o aumento nas dosagens dos aditivos. No entanto, as dosagens do aditivo proposto (LO) contribuíram mais para o espalhamento quando comparadas às dosagens do aditivo comercial (LS). Os traços LO-1,5 e LS-0,3 apresentaram índices de consistência muito semelhantes (172,1 e 174,0 mm, respectivamente), enquanto os traços LO-4,0 e LO-6,5 apresentaram índices 6,7% e 21,9% superiores aos dos traços LS-0,8 e LS-1,3, respectivamente. A Figura 2 também mostra que apenas o traço LO-6,5 apresentou índice de consistência superior a 260 mm, valor referente ao índice

de consistência normal de argamassas (ABNT 2016). Esses resultados podem ser confirmados com as imagens dos espalhamentos apresentadas na Figura 3.

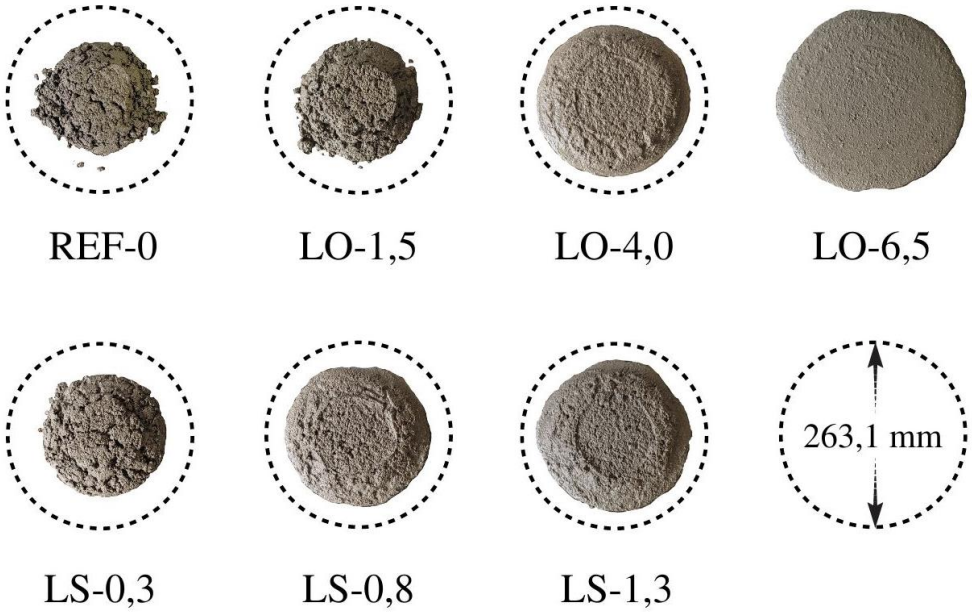


Figura 3 - Imagens do ensaio de índice de consistência

Os aditivos comerciais à base de Lignosulfonatos agem por meio de repulsão eletrostática. Suas cadeias contendo grupos funcionais aniônicos (e.g., ácidos sulfônicos) se adsorvem nos grãos de cimento, o que diminui a tensão superficial da água e confere hidrofilicidade aos grãos (Mehta e Monteiro 2014). O mecanismo de ação do aditivo proposto possivelmente também se deve à adsorção de grupos funcionais aniônicos nas partículas de cimento (e.g., grupos hidroxila) (Takahashi *et al*. 2015). As dosagens superiores do LO em comparação com o LS são justificadas pelo fato de que as ligninas Organosolv possuem menor densidade de carga aniônica e menores cadeias poliméricas que os lignosulfonatos (Vishtal e Kraslawski 2011). Outro fator importante é o de que a lignina Organosolv não se encontra em seu estado puro no aditivo proposto, visto que está contida no licor residual.

3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA E VPU

A Figura 4 mostra os resultados do ensaio de tração na flexão aos 28 dias nas argamassas endurecidas. O traço REF apresentou uma resistência média de 6,9 ± 0,9 MPa. Ao analisar as argamassas aditivadas com LO, observa-se que o traço com a dosagem de 4,0% obteve a maior resistência média (6,7 ± 0,3 MPa) e que todos os traços apresentaram resistência superior ou equivalente à da matriz REF. Com relação ao aditivo LS, as matrizes contendo as dosagens de 0,3% (8,4 ± 0,2 MPa), 0,8% (7,2 ± 0,3 MPa) e 1,3% (8,2 ± 0,1 MPa) apresentaram resultados superiores a todas as outras matrizes.

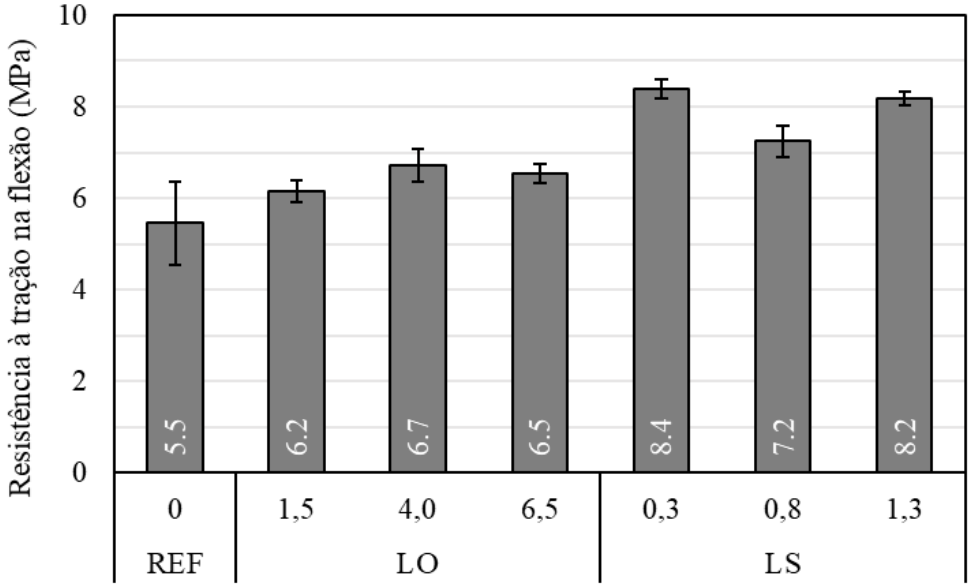


Figura 4 - Resultados do ensaio de tração na flexão

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de compressão aos 28 dias e VPU. Com relação à resistência à compressão, as argamassas contendo 1,5% (32,5 ± 0,8 MPa), 4.0% (30,3 ± 0,6 MPa) e 6.5% (30,9 ± 1,6 MPa) de LO, bem como as argamassas contendo 0,3% (32,2 ± 1,4 MPa), 0,8% (35,1 ± 0,7 MPa) e 1,3% (36,7 ± 1,1 MPa) de LS mostraram desempenho superior ao da argamassa REF (23,5 ± 2,8 MPa). Esses resultados indicam que, além do efeito plastificante, esses aditivos possivelmente contribuiram na hidratação do cimento, promovendo maior refinamento de poros e, consequentemente, maior resistência mecânica.

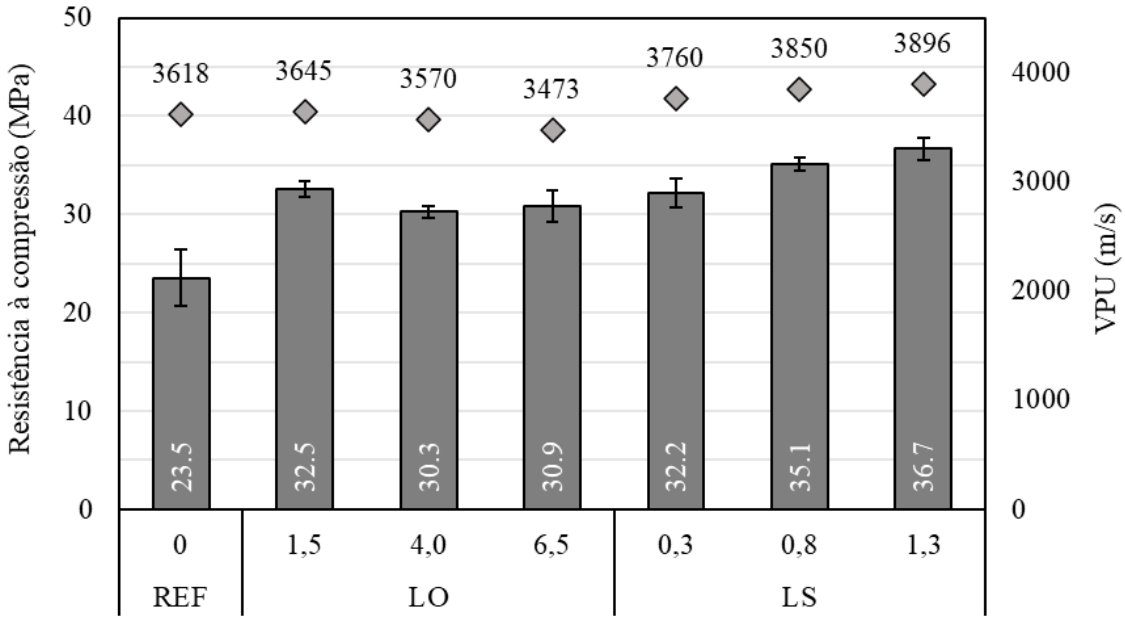


Figura 5 - Resultados dos ensaios de compressão e VPU

Analisando os valores de VPU, observa-se que as argamassas aditivadas com LS apresentaram resultados semelhantes entre si e superiores aos resultados das argamassas aditivadas com LO. Esses resultados estão de acordo com os resultados de resistência à compressão, considerando a relação

entre VPU e desempenho mecânico (Saxena e Tembhurkar 2018). Ainda, o traço REF apresentou um desempenho semelhante aos dos traços contendo LO.

4 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o desempenho de um licor residual à base de lignina Organosolv (LO) como aditivo para matrizes de cimento Portland. O licor residual utilizado foi obtido como resultado de um pré-tratamento Organosolv realizado em laboratório, simulando um processo de deslignificação do bagaço de cana-de-açúcar aplicado em biorrefinarias lignocelulósicas. Um aditivo de 1ª geração à base de lignosulfonatos (LS) foi avaliado para comparação e matrizes de referência (não aditivadas) também foram avaliadas.

Os resultados revelaram que o aditivo produzido contribuiu na melhoria da trabalhabilidade das argamassas em todas as dosagens propostas (1,5%, 4,0%, 6,5%) e apresentou melhor desempenho no ensaio de índice de consistência que o aditivo LS. Além disso, as argamassas produzidas com 1,5%, 4,0% e 6,5% de LO apresentaram um aumento significativo na resistência à compressão quando comparadas à argamassa de referência.

O uso do licor Organosolv residual como aditivo não apenas aprimora o desempenho e a durabilidade das matrizes de cimento Portland, como também viabiliza e estimula práticas mais sustentáveis na construção civil e no manejo de resíduos nas biorrefinarias lignocelulósicas. Assim, esta pesquisa representa um avanço significativo no desenvolvimento de novos aditivos à base de lignina, contribuindo para a criação de soluções mais eficazes e sustentáveis na indústria.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [processo 88887.575714/2020-00], do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [processo 403545/2020-0; 304108/2022-7], da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) [RED-00191-23] e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Os autores também agradecem ao grupo Vertuos (Rolth do Brasil), à Samarco Mineração e ao grupo de pesquisa em resíduos sólidos (Reciclos/CNPq) pelo apoio, infraestrutura e colaboração.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. ABNT, Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. ABNT, Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. ABNT, Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019a). NBR 16738: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. ABNT, Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019b). NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. ABNT, Rio de Janeiro.

Aitcin, P. (1998). High Performance Concrete. E-book ed. Taylor & Francis, London.

Arel, H., Aydin, E. (2017). Effects of Ca-, Mg-, K-, and Na-lignosulfonates on the behavior of fresh concrete. Construction and Building Materials, 157:1084-1091. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.190

Aro, T., Fatehi, P. (2017). Production and application of lignosulfonates and sulfonated lignin. ChemSusChem, 10:1861-1877. https://doi.org/10.1002/cssc.201700082

Bajwa, D., Pourhashem, G., Ullah, A., Bajwa, S. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products their environment impact. Industrial Crops and Products, 139: 111526. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526

Carvalho, V. (2022). Aditivo dual para matrizes de cimento Portland. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Carvalho, V., Costa, L., Baêta, B., Melo, T., Resende, D., Peixoto, R. (2022). Produção e avaliação de aditivos à base de lignina residual para matrizes de cimento Portland. Anais do 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 433-444.

Carvalho, V. Costa, L. Baêta, B. Peixoto, R. (2023). Lignin-based admixtures: a scientometric analysis and qualitative discussion applied to cement-based composites. Polymers, 15(5): 1254. https://doi.org/10.3390/polym15051254

Collins, M., Nechifor, M., Tanasa, F., Zanoaga, M., McLoughlin, A., Strozyk, M., Culebras, M., Teaca, C. (2019). Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications – A review. International Journal of Biological Macromolecules, 131:828-849. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.069

Konduri, M., Fatehi, P. (2015). Production of water-soluble hardwood kraft lignin via sulfomethylation using formaldehyde and sodium sulfite. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 3(6):1172-1182. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00098

Kun, D., Pukánszky, B. (2017). Polymer/lignin blends: Interactions, properties, applications. European Polymer Journal, 93: 618–641. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.04.035

Mehta, P., Monteiro, P. (2014). Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. IBRACON, São Paulo.

Meighan, B., Lima, D., Cardoso, W., Baêta, B., Adarme, O., Santucci, B., Pimenta, M., Aquino, S., Gurgel, L. (2017). Two-stage fractionation of sugarcane bagasse by autohydrolysis and glycerol organosolv delignification in a lignocellulosic biorefinery concept. Industrial Crops and Products, 108:431–441. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.049

Saxena, S., Tembhurkar, A. (2018). Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. Construction Building Materials, 165:126–137. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030

Takahashi, S., Hosoya, S., Hattori, M., Morimoto, M., Uraki, Y., Yamada, T. (2015). Performance of Softwood Soda-Anthraquinone Lignin–Polyethylene Glycol Derivatives as Water-Reducing Admixture for Concrete. Journal of Wood Science and Technology, 35(5):348-354. https://doi.org/10.1080/02773813.2014.968739

Upton, B., Kasko, A. (2016). Strategies for the conversion of lignin to high-value polymeric materials: Review and perspective. Chemical Reviews, 116(4):2275–2306. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00345

Vishtal, A., Kraslawski, A. (2011). Challenges in industrial applications of technical lignins. BioResources, 6(3):3547-3568. https://doi.org/10.15376/biores.6.3.3547-3568

Yu, G., Wang, H., Liu, C., Mu X. (2013). Preparation of concrete superplasticizer by oxidation sulfomethylation of sodium lignosulfonate. BioResources, 8(1):1055-1063. http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.1.1055-1063

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE BLOCOS DE BASE CIMENTÍCIA COM INCORPORAÇÃO DE BAGAÇO DE AZEITONA

Ana Briga-Sá[a]; Alexandre Jerónimo[b]

[a] (CQ-VR-Centro Química Vila Real/ Escola de Ciência e Tecnologia, UTAD-Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, Vila Real, Portugal), anas@utad.pt

[b] (CQ-VR-Centro Química Vila Real/ UTAD-Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, Vila Real, Portugal), ajaj@utad.pt

RESUMO

O setor da construção é caracterizado pelo elevado consumo de matérias-primas e pela elevada quantidade de resíduos produzidos, o que justifica o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis e que, simultaneamente, permitam dar resposta aos requisitos técnicos e funcionais aplicáveis. Neste contexto, a avaliação do potencial de valorização de diferentes resíduos e subprodutos na produção de novos materiais e soluções construtivas é, atualmente, um desafio, particularmente nos que constituem um resultado do setor agroindustrial. Da produção de azeite resultam diversos resíduos e subprodutos, entre os quais, o bagaço, cujo escoamento é dificultado em anos de excedência de produção, obrigando por vezes à sua paragem. Esta situação é demonstrativa da necessidade de procurar destinos alternativos, minimizando a deposição em aterro e a incineração. Neste contexto, o trabalho de investigação aqui apresentado pretende dar um contributo nesta temática, avaliando a possibilidade de incorporação de bagaço de azeitona (BA) na produção de blocos maciços. Para tal, foram preparadas diferentes formulações de misturas cimentícias com incorporação de BA, em substituição parcial da areia, nas percentagens de 5%, 10% e 20%, bem como uma mistura de referência sem incorporação de resíduo. O programa experimental baseou-se na caracterização das propriedades físicas e mecânicas das diferentes composições. Foram realizados ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção de água por capilaridade, durabilidade e resistência mecânica. Os resultados demonstraram que há um aumento da porosidade e uma diminuição da densidade com o aumento da adição de BA. Verifica-se também que a adição de 20% de BA conduz a resultados insatisfatórios ao nível da resistência mecânica. No entanto, a adição de 5% permite cumprir os valores de resistência requeridos. Verificou-se ainda que o aumento da incorporação de BA conduziu à redução do coeficiente de capilaridade face ao verificado para as amostras sem adição. As amostras com 0% de incorporação, 5% e 10% de BA apresentaram maior resistência à alternância de temperatura no ensaio de durabilidade do que a amostra com 20%. Os resultados obtidos são indicativos da possibilidade de aplicação deste tipo de materiais em elementos interiores de compartimentação e para fins não estruturais. Demonstram, no entanto, a necessidade de prosseguir com os estudos no sentido de proceder à otimização da composição das misturas com vista à melhoria das suas propriedades e consequente desempenho como material de construção.

Palavras-chave: Valorização de resíduos; Resíduos agrícolas; Bagaço de azeitona; Materiais Sustentáveis; Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

A rápida escassez dos recursos naturais e a elevada quantidade de resíduos produzidos são preocupações atuais que exigem a adoção de comportamentos mais sustentáveis a nível económico, ambiental e social.

Na União Europeia (UE) são produzidos, todos os anos, 2,1 mil milhões de toneladas de resíduos [1]. Atendendo ao atual cenário, diversas políticas e estratégias têm surgido a nível europeu com o objetivo de incentivar a valorização dos resíduos, tendo por base padrões de sustentabilidade e princípios de economia circular. Partindo deste pressuposto, as principais metas a atingir em matéria de resíduos incluem a redução da produção de resíduos, a maximização da reciclagem e da reutilização, bem como o estímulo à inovação na reciclagem, como forma de limitar a incineração a materiais não recicláveis e a utilização de aterros a resíduos não recicláveis e não valorizáveis [1]. Assim sendo, mostra-se fundamental encontrar soluções de valorização e reaproveitamento de resíduos e subprodutos resultantes das diversas atividades económicas que permitam a sua reintrodução no ciclo produtivo e na cadeia de valor, minimizando o impacto nefasto no meio ambiente.

Paralelamente, é sabido que o setor da construção é caracterizado por um elevado consumo de matérias-primas e por uma elevada produção de resíduos, representando mais de 35 % do total de resíduos da UE [1]. Para inverter esta situação, é necessário desenvolver soluções construtivas mais sustentáveis e que permitam, simultaneamente, dar resposta aos requisitos técnicos e funcionais exigidos.

Neste contexto, a avaliação do potencial de valorização de diferentes resíduos e subprodutos na produção de novos materiais e soluções construtivas é, atualmente, um desafio, particularmente nos que constituem um resultado do setor agroindustrial, dada a variabilidade que lhes é subjacente. Partindo deste pressuposto, vários estudos científicos têm sido realizados no sentido de avaliar o seu reaproveitamento como matéria-prima para desenvolver novos materiais [2,3], revelando que estes poderão ser uma alternativa aos correntemente utilizados no setor da construção.

Resíduos e subprodutos agrícolas, submetidos ou não a processos de transformação, têm sido estudados como componentes de vários tipos de materiais e para diferentes aplicações. Grande parte dos estudos desenvolvidos até ao momento foca-se na reutilização de resíduos decorrentes de processos de incineração na produção de misturas cimentícias, tais como cinzas resultantes da folha de bananeira [4], da casca de arroz [5], do bagaço da cana-de-açúcar [6] e das folhas de bambu [7,8], ou ainda na produção de tijolos [9]. Outros estudos demonstram ainda a possibilidade de utilizar resíduos e subprodutos agrícolas, sem transformação térmica ou química, como elemento de reforço ou como agregado em misturas à base de cimento [10-15].

No entanto, apesar de existirem diversos estudos neste âmbito que demonstram a possibilidade de valorização de vários tipos de resíduos e subprodutos, a variabilidade que os caracteriza, principalmente quando se trata de resíduos de origem orgânica, é reveladora da necessidade de prosseguir com a investigação. São, portanto, vários os resíduos e subprodutos disponíveis e passíveis de reaproveitamento para diversos fins.

No que respeita ao setor agrícola, a produção de azeite assume um papel preponderante a nível económico nos países da bacia mediterrânica, cuja dieta se caracteriza pelo elevado consumo de azeitona e de azeite. Grande parte da produção mundial de azeitonas é destinada à extração de azeite, sendo apenas 7%-10% utilizada para consumo como azeitona de mesa [16].

Em 2013, aproximadamente 2,67 milhões de toneladas de azeitonas foram destinadas à produção de azeite a nível global. Esta produção concentra-se em países com uma longa tradição no consumo de azeite, com a Espanha a assumir a liderança, registando uma produção de cerca de 4,5 milhões de toneladas, seguida pela Grécia, com aproximadamente 2,5 milhões de toneladas [17]. Em Portugal, a produção de azeitona alcançou 1,35 milhões de toneladas em 2021 [18], sendo a região do Alentejo responsável por mais de 79% deste total.

Do processo de extração de azeite resultam diversos resíduos, incluindo o bagaço de azeitona, os caroços, as folhas e as águas residuais. Estes resíduos representam um desafio ambiental significativo, uma vez que apresentam uma carga poluente entre 200 a 400 vezes superior à das águas residuais domésticas [19]. Estima-se que, na região norte de Portugal, sejam anualmente produzidas cerca de 80.000 toneladas de bagaço de azeitona, causando sérias perturbações nos ecossistemas locais. O escoamento do bagaço pode ser dificultado em anos de excedência de produção, obrigando, por vezes, à paragem do processo de produção de azeite. Esta situação é demonstrativa da necessidade de procurar destinos alternativos, minimizando a deposição em aterro e os processos de incineração.

Neste contexto, o trabalho de investigação aqui apresentado pretende constituir um contributo nesta temática, avaliando a possibilidade da incorporação de bagaço de azeitona (BA) na produção de blocos maciços à base de cimento. Para tal, foram preparadas diferentes formulações de misturas cimentícias com adição de BA, como substituto parcial de areia, e analisadas diferentes propriedades físicas e mecânicas para as diferentes composições. Foram realizados ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção de água por capilaridade, durabilidade e resistência mecânica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta secção, serão caracterizados os materiais utilizados na composição dos blocos maciços com bagaço de azeitona (BBA) incorporado, atribuindo especial ênfase ao resíduo em estudo. Serão apresentadas as formulações das diferentes misturas. Proceder-se-á ainda à descrição do procedimento experimental para avaliação das respetivas propriedades físicas e mecânicas.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE AZEITONA (BA)

Durante as diversas etapas de produção de azeite são vários os resíduos e subprodutos que daí decorrem. O bagaço de azeitona é um desses resíduos, composto por uma pasta resultante da fase de mistura e de moagem, e que é separada da fase líquida que irá dar origem, posteriormente, ao azeite. Esta pasta, que inclui também os resíduos do caroço de azeitona, é posteriormente submetida a um processo de centrifugação do qual resultará, em frações separadas, o caroço de azeitona triturado, por um lado, e a pasta de bagaço de azeitona sem caroço, por outro. Na Figura 1 é apresentado, de forma simplificada, o processo de produção do azeite, salientando-se os resíduos e subprodutos resultantes. O bagaço de azeitona sem caroço (BA) é o resíduo utilizado neste trabalho de investigação.

O BA é uma pasta castanha, com cerca de 60% de água, de odor intenso, e que pode conter quantidades residuais de caroço de azeitona após o processo de centrifugação, consideradas desprezáveis no estudo. Na Figura 2 apresenta-se o BA estudado, fornecido pela Cooperativa Agrícola Sabodouro, localizada em Mogadouro.

Numa primeira fase, procedeu-se à determinação de algumas das suas propriedades físicas e químicas, tendo sido avaliado o pH da mistura, efetuada a caracterização química elementar e a análise por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) (Figura 2), bem como determinada a sua densidade.

A análise simplificada de pH revelou o caracter ácido da pasta, apresentando valores de acidez entre 4 e 5. Esta informação poderá ser revelante aquando da incorporação do resíduo em diferentes tipos de misturas atendendo à influência que este poderá ter no comportamento do ligante durante o processo de cura. Trabalhos realizados neste âmbito sugerem especial atenção ao carácter ácido das misturas quando se trata de bases cimentícias, uma vez que águas ácidas na mistura poderão conduzir à diminuição do desempenho mecânico [20, 21].

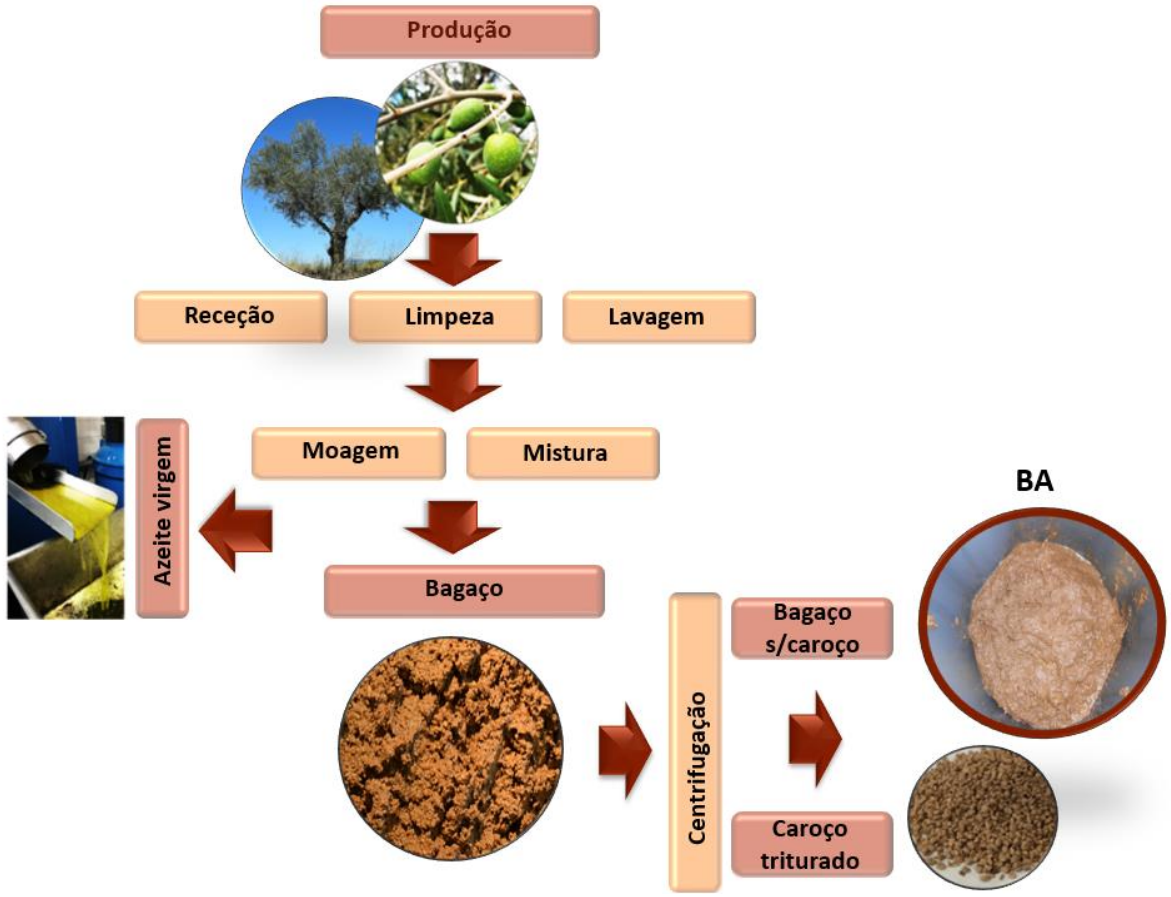


Figura 1: Etapas da produção de azeite e resíduos e subprodutos resultantes.

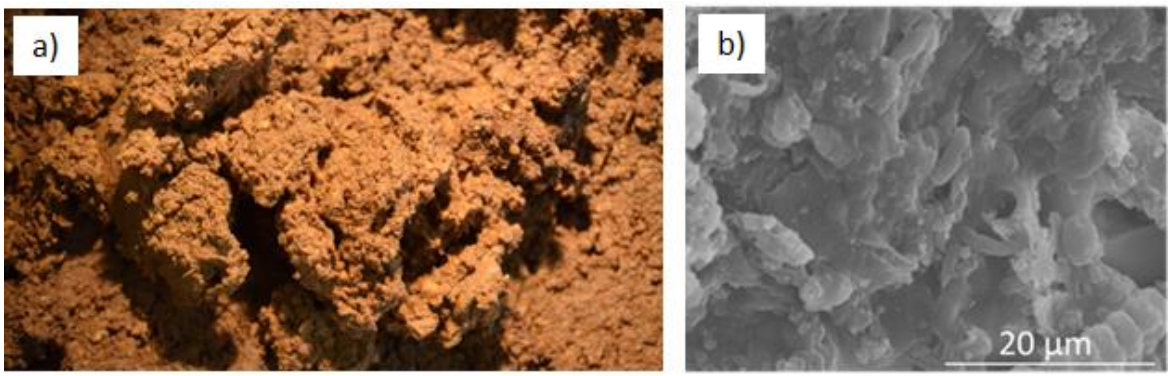


Figura 2: BA em estudo: a) aquando da recolha; b) análise SEM.

Relativamente à composição química elementar (Tabela 1), o carbono representa mais de 50% da sua composição, sendo o oxigénio o segundo elemento mais representativo. No que respeita à densidade, a pasta de bagaço de azeitona apresenta o valor de 1154,11 Kg/m³.

Tabela 1: Caracterização química elementar do BA.

Elemento	Composição (%)
C	50.21±11.50
O	43.40±10.44
Mg	0.17±0.07
K	2.07±0.19
N	3.83±1.67
P	0.28±0.08
S	0.11±0.06

2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A pasta de bagaço de azeitona (BA) foi introduzida na mistura cimentícia no sentido de avaliar a possibilidade de produção de blocos maciços (BBA) de dimensões 200 mm x 100 mm x 60 mm. O BA foi introduzido na composição da mistura nas percentagens de 5%, 10% e 20% como substituto parcial da areia, resultando nas amostras BBA.5, BBA.10 e BBA.20, respetivamente. Uma amostra de referência sem incorporação de BA, designada por BA.0, foi utilizada como amostra de controlo. Para a composição das referidas amostras foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland (2.999 kg/m³), areia natural de rio (2.322 kg/m³), superplastificante (SP) Master SKY617 (1.041 kg/m³) e água destilada.

Na Tabela 2 apresenta-se a formulação das misturas utilizadas para a produção dos referidos blocos. Foi utilizado o traço 1:4. Estudos desenvolvidos anteriormente sobre o desempenho de misturas cimentícias com BA, em estado fresco, revelaram que a sua introdução conduziu a alterações nas reações químicas de hidratação do cimento, traduzindo-se num atraso no ganho de presa da mistura. Atendendo a estes resultados, optou-se por aumentar a quantidade de cimento na composição das misturas para dar continuidade ao estudo das suas propriedades em estado endurecido [21]. Apesar de esta quantidade de cimento poder ser considerada mais elevada do que a habitualmente aplicada em blocos, estudos desenvolvidos por outros autores demonstram a utilização de quantidades elevadas de cimento, nomeadamente aquando da introdução de resíduos agrícolas [22, 23].

Tabela 2: Formulação das misturas para a produção dos blocos de bagaço de azeitona (BBA) (kg/m³).

Amostra	BA	Cimento	Areia	SP	Água
BBA.0	0,00	500,00	1583,16	1,00	300,00
BBA.5	25,00	500,00	1522,64	1,00	300,00
BBA.10	50,00	500,00	1462,12	1,00	300,00
BBA.20	100,00	500,00	1341,08	1,00	300,00

Na Figura 3 é possível observar a colocação das misturas nos moldes para a produção dos blocos (Figura 3a)), bem como o aspeto final de cada uma das amostras após a desmoldagem e 28 dias de cura (Figura3b)).

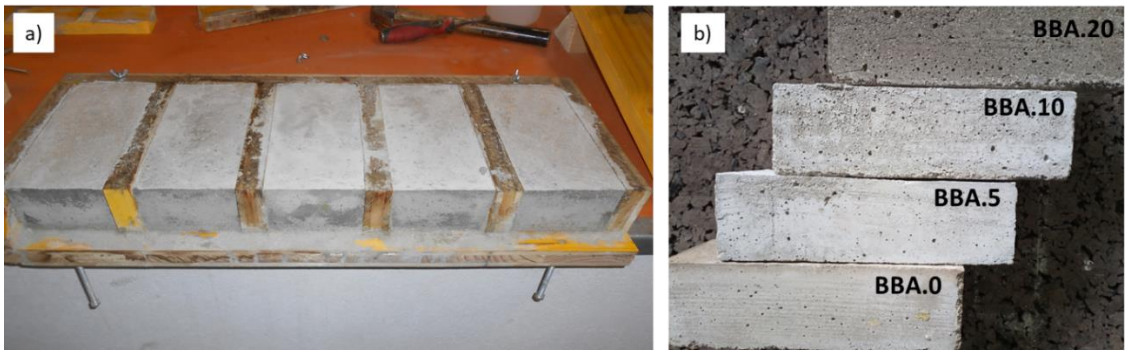


Figura 3: Produção dos blocos com BA em estudo: a) fase de moldagem; b) aspeto final das diferentes amostras de BBA.

No que respeita ao odor que caracteriza a pasta de BA no seu estado original, verifica-se que, para percentagens inferiores de incorporação do resíduo, este desaparece durante o processo de cura, enquanto para valores superiores de BA, o odor permanece durante mais tempo após o endurecimento. Atendendo a que esta análise foi efetuada de forma expedita, os resultados sugerem a necessidade de avaliar esta situação de forma mais aprofundada e cuidada em trabalhos futuros assim que se definir qual a percentagem de BA mais adequada para a preparação das misturas.

2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após o fabrico dos diferentes provetes de BBA, e decorrido o processo de cura, vários ensaios foram realizados no sentido de avaliar algumas das propriedades químicas, físicas e mecânicas das diferentes composições de blocos. Foram realizados ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, porosimetria por intrusão de mercúrio, absorção de água por capilaridade, durabilidade e resistência mecânica dos compósitos.

A análise SEM permitiu identificar a influência da adição de BA na composição das misturas no que respeita à sua microestrutura.

O ensaio de determinação da porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizada recorrendo ao porosímetro de mercúrio *Poremaster 60* - da *Quantachrome*, utilizando uma faixa de pressão de 0,2396 a 413 MPa, que permitiu a medição do tamanho dos poros no intervalo de 10,64 µm a 3,5 nm. Diferentes parâmetros caracterizadores da porosidade dos compósitos foram obtidos, tais como diâmetro médio dos poros, porosidade interpartícula, porosidade intrapartícula, porosidade total e porosidade teórica.

A caracterização mecânica foi efetuada no sentido de avaliar o comportamento dos blocos a esforços de compressão e de flexão. No que respeita à determinação da resistência à compressão, os provetes foram ensaiados aos 28 e 300 dias de cura. Relativamente ao ensaio de flexão, estes foram analisados para as mesmas idades de cura, mas para as posições vertical e horizontal dos blocos. Os resultados do comportamento mecânico aos 300 dias serão úteis para posterior comparação com os decorrentes dos testes de durabilidade.

Os ensaios de durabilidade foram realizados tem por base ciclos de gelo-degelo, de acordo com a especificação europeia CEN/TS 12390-9:2006 [24]. A câmara climática utilizada para a realização dos testes foi programada de forma a que cada ciclo de gelo-degelo durasse 24 horas com uma humidade constante de 90%. Foram realizados 56 ciclos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO

A análise da microestrutura através de imagens SEM permitiu verificar de forma clara o impacto da introdução de BA na composição das misturas. Na Figura 4 são apresentadas as imagens SEM obtidas para cada um dos compósitos, sendo possível observar um aumento da porosidade da mistura decorrente do aumento da percentagem de BA incorporado.

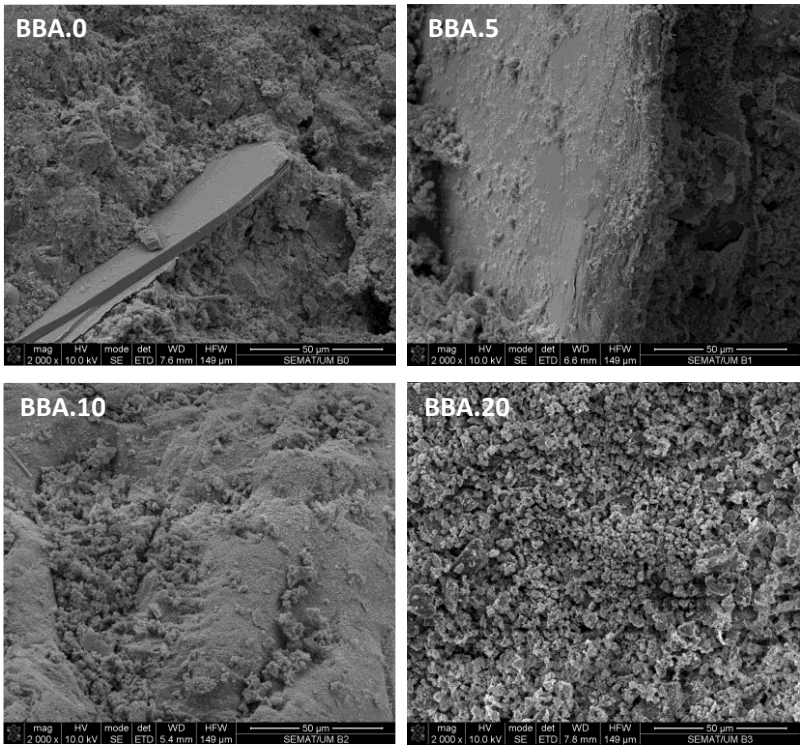


Figura 4: Imagens SEM das diferentes amostras de bloco BBA.

Significativas diferenças são observáveis entre a amostra de referência sem incorporação de resíduo, BBA.0, e a composição do bloco com 20% de incorporação, BBA.20. Estes valores estão em concordância com os valores de densidade obtidos para os diferentes blocos, tendo-se verificado uma diminuição do valor com o aumento de BA incorporado, variando entre 2115.89 kg/m^3, no caso de BBA.5, e 1839.20 kg/m^3 no caso de OB.20.

3.2 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

A porosimetria por intrusão de mercúrio permitiu determinar diversos parâmetros caracterizadores desta propriedade nas diversas amostras em estudo, cujos resultados obtidos se apresentam na Tabela 3. Os valores obtidos encontram-se em concordância com os apresentados na Figura 4 referente às imagens SEM dos diferentes compósitos, na medida em que se verifica o aumento da porosidade teórica com o aumento da percentagem de BA incorporado.

É ainda observável um aumento do diâmetro médio dos poros na amostra BBA.20, verificando também um aumento significativo relativamente à amostra de controlo no caso das amostras com 10% e 20%. Na amostra com maior teor de BA verifica-se um aumento significativo da porosidade interpartículas e, consequentemente, um decréscimo da porosidade intrapartículas face à amostra sem adição de resíduo. No que diz respeito à porosidade total, não se verifica uma disparidade tão significativa entre as diferentes amostras.

Tabela 3: Resultados obtidos através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

Amostra	Diâmetro médio dos poros (nm)	Porosidade interpartículas (%)	Porosidade intrapartículas (%)	Porosidade total (%)	Porosidade teórica (%)
BBA.0	83,40	0,58	12,81	13,39	17,52
BBA.5	18,49	3,22	16,14	19,36	24,97
BBA.10	135,00	1,34	11,44	12,78	26,99
BBA.20	1921,00	13,50	4,56	18,06	38,06

3.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E COMPRESSÃO

Os ensaios de flexão foram efetuados para duas direções diferentes, designadas por horizontal e vertical, atendendo à posição possível de aplicação dos blocos. Estes ensaios foram realizados aos 28 dias e 300 dias de cura e os resultados são apresentados na Figura 5.

Os resultados revelam que o aumento da percentagem de BA na composição dos blocos conduz a uma diminuição dos valores da resistência mecânica, quer à flexão, quer à compressão, em comparação com a amostra sem BA incorporado. Esta redução mostra-se mais significativa no caso das amostras com 10% e 20%, independentemente da idade de cura em análise. De uma forma geral, verifica-se ainda que os valores de resistência mecânica apresentados são relativamente baixos tendo em consideração o que seria expectável face ao aumento da quantidade de cimento introduzida na

mistura, o que poderá dever-se ao impacto da acidez da fase líquida da mistura decorrente da incorporação de BA [20].

Atendendo à posição do bloco aquando da submissão ao ensaio de flexão, são observáveis valores superiores de resistência à flexão na posição vertical em todas as amostras, como aliás seria expectável dado o aumento da inércia resultante do referido posicionamento do bloco. Este comportamento é visível na maior parte das amostras, sendo que a diferença entre os valores da resistência à flexão decorrentes da alteração da posição do bloco é mais notória no caso do bloco com 5% de BA. No que diz respeito à amostra com 20% de resíduo, é diferença é pouco significativa.

Considerando o estabelecido na norma EN 772-1 [25], que especifica um mínimo de 1,5 N/mm² para a resistência à flexão em alvenarias de blocos de betão aos 28 dias, pode concluir-se que os blocos com 5% de BA cumprem os valores definidos, quer aos 28 dias, quer aos 300 dias de cura, o que não se verifica nas restantes amostras com o aumento da percentagem de BA. Os resultados obtidos revelam que a incorporação de 20% de BA nas misturas cimentícias conduz a blocos com valores de resistência mecânica de flexão e de compressão bastante reduzidos e que não cumprem os valores mínimos requeridos. No entanto, os resultados obtidos para as restantes percentagens de incorporação, nomeadamente os relativos aos blocos com adição de 5% de BA, sugerem a possibilidade de ajustar as percentagens de incorporação do resíduo, nomeadamente para fins não estruturais.

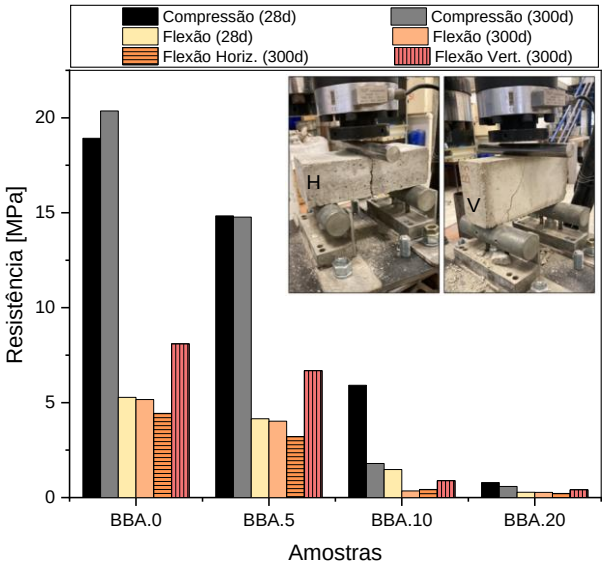


Figura 5: Resultado dos ensaios mecânicos de flexão e de compressão aos 28 dias e 300 dias de cura.

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados decorrentes da realização do ensaio de absorção de água por capilaridade permitiram concluir que o aumento da incorporação de resíduo conduziu à redução do coeficiente de capilaridade face ao verificado para as amostras sem adição. Na Figura 6 é possível observar que a amostra referente a BBA.20 apresenta um coeficiente de capilaridade de 0,07 kg/m^2.min^{0,5}, bastante inferior aos 0,4 obtidos para a amostra BBA.0. No entanto, verifica-se também que a amostra com 10% de BA apresenta um aumento em relação à amostra com 5%, quebrando a tendência de decréscimo entre as amostras com incorporação de resíduo. No entanto, este comportamento pode estar relacionado com

os resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, tendo em conta que esta amostra mostrou algumas discrepâncias face às amostras com menor e maior quantidade de BA. Estes resultados conduzem à necessidade de prosseguir com a investigação no sentido de melhor entender a influência do aumento da quantidade de resíduo nas reações químicas da mistura.

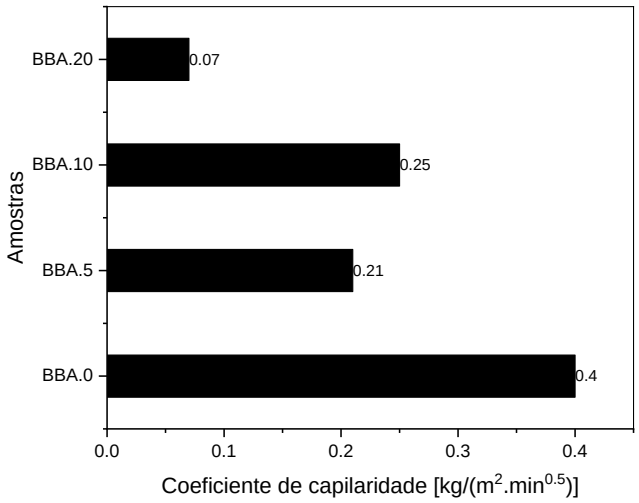


Figura 6: Coeficiente de capilaridade das diferentes amostras.

3.5 ENSAIO DE GELO-DEGELO

A durabilidade das diferentes amostras foi analisada nesta fase recorrendo ao ensaio de gelo-degelo, cujos resultados se apresentam na Figura 7. Os resultados obtidos permitiram concluir que as amostras com 0% de incorporação, 5% e 10% de BA apresentaram maior resistência à alternância de temperatura, suportando 56 ciclos. A amostra com 20% de BA mostrou menos resistência, revelando uma desintegração total dos provetes aos 28 ciclos. Verificou-se ainda que a amostra com adição de 10% de resíduo apresentou menores perdas de material durante a ação de gelo-degelo.

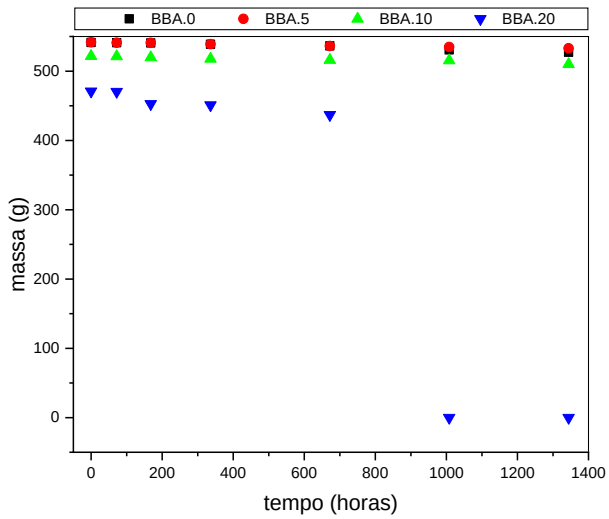


Figura 7: Resultados do ensaio de durabilidade.

4 CONCLUSÕES

A possibilidade de valorização de resíduos resultantes de diversos setores de atividade na produção de novos materiais de construção é vista, atualmente, como uma alternativa no caminho da economia circular e da sustentabilidade do setor. No entanto, dada a variabilidade e as especificidades dos diversos tipos de resíduos e subprodutos disponíveis, verifica-se a necessidade de prosseguir com a investigação neste domínio no sentido de identificar as suas vantagens, limitações e possíveis aplicações.

No trabalho de investigação aqui apresentado foi avaliada a possibilidade de utilização de um resíduo agrícola como componente de um material de construção. O bagaço de azeitona, resíduo resultante da produção de azeite, foi incorporado em misturas cimentícias, nas percentagens de 5%, 10% e 20%, para o fabrico de blocos maciços. Foi efetuada, numa primeira fase, a análise química elementar e de microestrutura da pasta de bagaço, tendo-se verificado que esta é maioritariamente composta por carbono e oxigénio, revelando um caracter ácido e uma percentagem de cerca de 60% de água na sua composição. Procedeu-se ao fabrico de blocos com as diferentes percentagens de incorporação, tendo-se produzido também uma amostra de referência sem adição de bagaço de azeitona para efeitos comparativos. Foram realizados ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, porosometria por intrusão de mercúrio, resistência mecânica, absorção de água por capilaridade e durabilidade através de ciclos de gelo-degelo.

Os resultados demonstraram que há um aumento da porosidade e uma diminuição da densidade com o aumento da adição de resíduo. Verifica-se também que a adição do resíduo na composição conduz à redução dos valores da resistência mecânica dos blocos apesar da elevada quantidade de cimento incorporada, o que poderá dever-se ao pH ácido que caracteriza a pasta de bagaço de azeitona e que influencia a hidratação do cimento durante o processo de cura. Verifica-se ainda que a adição de 20% de resíduo conduz a resultados insatisfatórios ao nível da resistência mecânica. No entanto, a adição de 5% permite obter valores de resistência que cumprem os requisitos definidos nos documentos normativos. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade permitiram concluir que o aumento da incorporação de resíduo conduziu à redução do coeficiente de capilaridade face ao verificado para as amostras sem adição. Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que as amostras com 0% de incorporação, 5% e 10% de BA apresentaram maior resistência à alternância de temperatura no ensaio de durabilidade do que o verificado para a amostra com 20% de bagaço de azeitona.

Estes resultados preliminares revelam a possibilidade de incorporação deste tipo de resíduos em quantidades mais reduzidas e para fins não estruturais, sugerindo que esta aplicação se efetue em elementos de compartimentação interior. No entanto, sendo estes resultados de estudos preliminares, mostra-se necessário prosseguir com a investigação no sentido de otimizar composições de mistura e efetuar uma análise mais aprofundada da influência do resíduo nas propriedades químicas, físicas e mecânicas do material. Fragilidades do resíduo como a acidez, a libertação de odores e a suscetibilidade biológica deverão ser contempladas e analisadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CQ-VR (UID/QUI/00616/2013 e UID/QUI/00616/2019).

REFERÊNCIAS

[1] Comissão Europeia "Gestão sustentável de resíduos: o que a UE está a fazer." Disponível em https://www.europarl.europa.eu/; Data de atualização: 21/03/2024; Consultado em 03/06/2024.

[2] M. V. Madurwar, R. V. Ralegaonkar, and S. A. Mandavgane, 2013. "Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review," vol. 38, pp. 872-878.

[3] C. Maraveas, 2020. "Production of sustainable construction materials using agro-wastes," vol. 13, no. 2, p. 262.

[4] R. C. Kanning, K. F. Portella, M. O. Bragança, M. M. Bonato, and J. C. dos Santos, 2014. "Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement," vol. 54, pp. 460-465.

[5] R. Khan, A. Jabbar, I. Ahmad, W. Khan, A. N. Khan, and J. Mirza, 2012. "Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete," vol. 30, pp. 360-365.

[6] N. Singh, V. Singh, and S. Rai, 2000. "Hydration of bagasse ash-blended portland cement," vol. 30, no. 9, pp. 1485-1488.

[7] M. Frías, H. Savastano, E. Villar, M. I. S. de Rojas, and S. Santos, 2012. "Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes," vol. 34, no. 9, pp. 1019-1023.

[8] N. Singh, S. Das, N. Singh, and V. Dwivedi, 2007. "Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement,".

[9] S. M. S. Kazmi, S. Abbas, M. J. Munir, and A. Khitab, 2016. "Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks," vol. 7, pp. 372-378.

[10] R. Dungani, M. Karina, A. Sulaeman, D. Hermawan, and A. Hadiyane, 2016. "Agricultural waste fibers towards sustainability and advanced utilization: a review," vol. 15, no. 1/2, pp. 42-55.

[11] K. Ghavami, "Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, 2005. " vol. 27, no. 6, pp. 637-649.

[12] Y. Li, Y.-W. Mai, and L. Ye, 2000. "Sisal fibre and its composites: a review of recent developments," vol. 60, no. 11, pp. 2037-2055.

[13] P. Shafigh, H. B. Mahmud, M. Z. Jumaat, and M. Zargar, 2014. "Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures–A review," vol. 53, pp. 110-117.

[14] AR. de Azevedo, M. Amin, M. Hadzima-Nyarko, IS. Agwa, AM. Zeyad, BA. Tayeh, A. Adesina, 20222. "Possibilities for the application of agro-industrial wastes in cementitious materials: a brief review of the Brazilian perspective". Clean Mater, vol. 3:100040.

[15] E. Cintura, L. Nunes, B. Esteves, P. Faria, 2021. "Agro-industrial wastes as building insulation materials: A review and challenges for Euro-Mediterranean countries", Industrial Crops and Products, vol. 171, 113833.

[16] ECO "Preço do azeite em Espanha subiu 165,5% nos últimos três anos". Disponível em: https://eco.sapo.pt/2024/01/12/preco-do-azeite-em-espanha-subiu-1655-nos-ultimos-tres-anos/; Data de atualização: 12/01/2024; Consultado em 11/06/2024.

[17] INE: Instituto Nacional de Estatística. Disponível em https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0008302&contexto=bd&selTab=tab2; Consultado em setembro de 2022.

[18] J. Alves, E. Sivinski, M. De Oliveira e F. Santos, "Biomassa de oliveira: cenário atual e perspectivas." em Agricultura em foco:Tópicos em manejo, fertilidade do solo e impactos ambientais - Volume I., editora científica digital, 2020, pp. 65-79. doi: 10.37885/200600514.

[19] Noctula, "Soluções para reaproveitar resíduos dos lagares de azeite", Disponível em https://noctula.pt/residuos-dos-lagares-de-azeite/; Consultado em 11/06/2024.

[20] K.M. Mbuh, N.L. Nsahlai, B.J. Penka *et al.* "Analysis of the influence of water qualities on the strength of concrete". *J. Eng. Appl. Sci.* **71**, 110 (2024). https://doi.org/10.1186/s44147-024-00432-8

[21] A. Briga-Sá, J. Teixeira, A. Jerónimo, and M. Fernandes, 2022. "The influence of Olive Bagasse on the Heat of Hydration of 478 Ordinary Portland Cement Pastes based on Infrared Thermography Analysis " Proceedings of *ICEUBI2022 – "International* 479 *Congress on Engineering – Innovation and Sustainability Praxis"*, 2022, 28-30 November, Covilhã, Portugal.

[22] E. Fortes, G. Parsekian, J. Camacho, and F. J. R. I. d. E. e. M. Fonseca, "Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks," vol. 10, no. 06, pp. 1273-1319, 2017.

[23] A. B. Souza, H.S. Ferreira, A. P. Vilela, Q. S. Viana, J. F. Mendes, and R. F. J. J. o. B. E. Mendes, "Study on the feasibility of using agricultural waste in the production of concrete blocks," vol. 42, p. 102491, 2021.

[24] *CEN/TS 12390-9:2016:* "Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts – Scaling", 2016.

[25] *EN 772-1:2011,* "Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength", 2011.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO GEOPOLIMÉRICO DE CINZA VOLANTE DE BIOMASSA PARA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

Tomás Archer de Carvalho[a]; Florindo Gaspar[b]; Ana C. Marques[c]; Artur Mateus[d]

[a]CDRSP, Politécnico de Leiria, Edifício IPLeiria, Rua de Portugal – Zona Industrial, 2430-028 Marinha Grande – Portugal; tomas.carvalho@ipleiria.pt

[b]CDRSP, ESTG, Politécnico de Leiria, Edifício IPLeiria, Rua de Portugal – Zona Industrial, 2430-028 Marinha Grande – Portugal; florindo.gaspar@ipleiria.pt

[c]CERENA, DEQ, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal; ana.marques@tecnico.ulisboa.pt

[d]ISISE, Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, Pólo II da Universidade de Coimbra, 3030-790 Coimbra – Portugal; artur.mateus@dec.uc.pt

RESUMO

O cimento geopolimérico (CGP) é um material ligante que tem captado a atenção da comunidade científica devido ao seu excelente desempenho e potencial para promover a construção sustentável.

Neste trabalho apresentam-se as fases preliminares do desenvolvimento de formulações de argamassas de CGP destinadas a impressão 3D por extrusão (eb-3DP). Assim, com base em investigação anterior focada na seleção e caracterização de matérias-primas, e otimização de argamassas de CGP em relação ao seu desempenho mecânico e equilíbrio químico, neste trabalho foram desenvolvidos testes de eb-3DP com argamassas baseadas numa mistura de metacaulino (MK) e cinzas volantes de biomassa (CVB). Com o objetivo de otimizar a capacidade de construção camada após camada e obter um tempo em aberto adequado, estudou-se uma adaptação à mistura de agregados finos e também a inclusão de aditivos, nomeadamente agentes retardadores de presa e modificadores de consistência.

Os resultados preliminares obtidos com incorporação de pó de calcário na mistura de agregados, e sulfato de zinco e amido de milho como agentes retardador e modificador de consistência, respetivamente, permitem concluir que é possível adaptar argamassas de CGP ao processo de eb-3DP, abrindo assim perspetivas de uma maior utilização conjunta deste material e tecnologia.

Palavras-chave: economia circular; cimento geopolimérico; impressão 3D

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de impressão 3D na construção (3DPC) desenvolveu-se rapidamente nos últimos 10 anos e apresenta o potencial para revolucionar esta indústria. Como principais vantagens da 3DPC face às técnicas de construção tradicionais podem referir-se a maior eficiência (redução da necessidade de mão de obra manual e minimização do desperdício de material), a maior velocidade de construção (estruturas que tradicionalmente demorariam meses a construir podem ser concluídas em semanas) e a maior flexibilidade de design (permitindo a criação de designs complexos e personalizados que seriam difíceis de alcançar com os métodos tradicionais) (Ahmed, 2023; Al-Tamimi et al., 2023; Guamán-Rivera et al., 2022; Puzatova et al., 2022). No entanto, existem ainda diversos desafios na implementação prática desta tecnologia. No que se refere especificamente ao desenvolvimento e adequação dos materiais a utilizar, é necessário ter em consideração a sua reologia (para que seja possível bombear, extrudir e construir camada após camada) e também as suas propriedades depois de curados (como por exemplo o desempenho mecânico na ausência de reforço ou a resistência de adesão entre camadas) (Al-Tamimi et al., 2023; Bhushan Jindal & Jangra, 2023). De facto, no processo de desenvolvimento de argamassas destinadas à 3DPC é crucial ter em conta a existência de relações de interdependência entre as propriedades dos materiais, a parametrização do processo de impressão e as propriedades finais da estrutura impressa (Panda et al., 2018; Qaidi et al., 2022), tal como se evidencia na Figura 1. Assim, a otimização das propriedades da argamassa, para utilização num determinado equipamento de impressão, implica normalmente a existência de um processo prévio de experimentação com diferentes formulações e aditivos.

Por outro lado, no contexto da busca por soluções mais sustentáveis no domínio dos materiais de construção, o cimento geopolimérico (CGP) está a atrair a atenção da comunidade científica. Este tipo de material ligante apresenta tipicamente desempenhos mecânicos, químicos e térmicos comparáveis com o OPC, com a vantagem adicional de estar a associado a emissões de CO_2 reduzidas e à possibilidade de incorporação de diferentes tipos de resíduos inorgânicos na sua composição (Davidovits, 2020; Duxson et al., 2007; Novais et al., 2018; Provis, 2014; Rees et al., 2008; Singh & Middendorf, 2020).

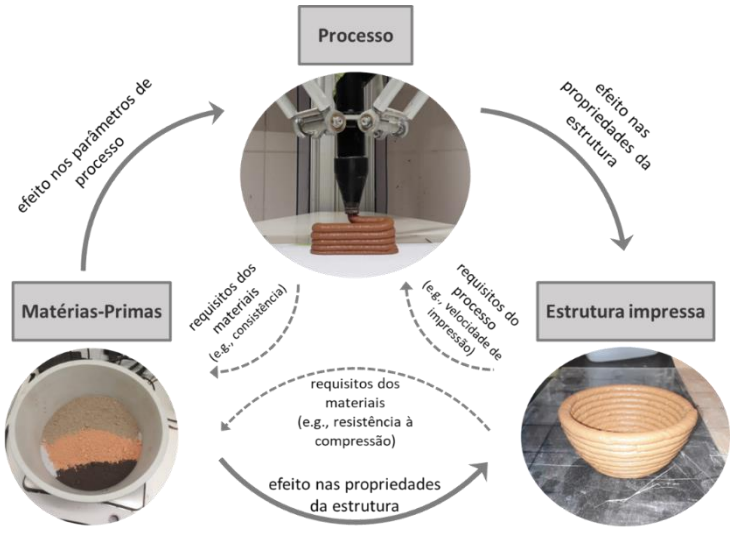


Figura 1 - Interdependência entre as propriedades dos materiais, a parametrização do processo de impressão e as propriedades finais da estrutura impressa em 3D.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho de investigação foi o desenvolvimento e otimização preliminares de uma argamassa de CGP, baseada numa mistura de metacaulino (MK) e cinza volante

de biomassa (CVB), de modo a ajustar as suas propriedades ao processo de impressão 3D. Este estudo pretendeu assim responder ao desafio de alargar a base de conhecimento no que se refere ao desenvolvimento de materiais de construção destinados a 3DPC, e contribuir para aliar os benefícios desta tecnologia à utilização de materiais cada vez mais sustentáveis.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

As matérias-primas selecionadas como precursores para a formulação de CGP foram o MK e a CVB. O MK utilizado foi fornecido pela *Mota Ceramic Solutions* (Portugal) e resulta do processo de ativação de argilas cauliníticas, por meio de calcinação. Quanto à CVB, o material utilizado no presente estudo é um subproduto do processo de combustão de biomassa florestal residual, recolhido em filtros de mangas numa central da *Greenvolt* localizada em Portugal. Como se pode verificar no Quadro 1, onde se apresentam os resultados da análise química por fluorescência de raios-X (XRF), ambos os materiais possuem na sua composição química significativas frações de sílica e alumina – as principais espécies químicas envolvidas no processo de geopolimerização.

Quadro 1 - Composição química dos precursores, em termos dos principais óxidos.

Principais óxidos	**MK**	**CVB**
SiO_2	58.4%	34.8%
Al_2O_3	33.0%	4.4%
CaO	0.1%	27.3%
Na_2O	0.1%	0.9%
K_2O	3.1%	4.0%
Fe_2O_3	3.2%	1.3%
SO_3	0.0%	3.1%
MgO	0.2%	2.2%

Por forma a complementar a informação obtida pela análise química, e para melhor compreender o comportamento dos precursores no processo de geopolimerização, as quantidades das espécies de aluminato e silicato que se dissolvem em meio alcalino foram determinadas de acordo com o método desenvolvido em Archer de Carvalho et al. (2023). Este método, utilizado como medida do potencial de precursores para o processo de geopolimerização, permite estimar as quantidades de silicatos e aluminatos que se libertam em meio alcalino e ficam disponíveis para formar a matriz geopolimérica nas argamassas frescas. As formulações de argamassas de CGP podem assim ser desenvolvidas tendo por base a estimativa de aluminossilicatos disponíveis para participar no processo de geopolimerização ao invés de considerar apenas a composição química inicial dos materiais, que não fornece informação acerca da sua reatividade. De acordo com os dados apresentados no Quadro 2, os dois materiais exibem níveis de reatividade interessantes no teste de dissolução alcalina, sendo o MK o precursor que maior quantidade de aluminossilicatos disponibiliza.

Quadro 2 - Quantidades dissolvidas de SiO_2 e Al_2O_3 dos precursores, em termos de mmol/g de precursor (Archer de Carvalho et al., 2023)

Espécie química	**MK**	**CVB**
SiO_2 (mmol/g precursor)	1.2	0.21
Al_3O_2 (mmol/g precursor)	0.9	0.11

Os dados constantes no Quadro 2 foram utilizados para o cálculo das formulações de argamassas de CGP.

Na composição base da argamassa de CGP utilizou-se areia lavada como agregado fino (D50[1] = 370 µm) fornecido pela empresa portuguesa *IMOSA*.

A solução ativadora foi composta por solução de silicato de sódio (SS) com módulo de sílica de 3,3 e 34,9 %m/m de sólidos dissolvidos (*Quimialmel, Lda.*), solução de hidróxido de sódio 32 %m/m (HS) utilizada como fonte principal de Na_2O (*Ângelo Coimbra, S.A.*) e água. A mistura dos vários componentes da solução ativadora foi realizada com recurso a agitação mecânica e até que a solução resultante se apresentasse límpida e à temperatura ambiente (cerca de 20 ºC).

Finalmente, no processo de adaptação da composição base de argamassa de CGP ao processo de impressão 3D, a areia foi parcialmente substituída por pó de calcário (Calcite 70, D50 = 8,5 µm), fornecido pelo grupo *Parapedra*, e foram testados diferentes aditivos, nomeadamente sulfato de zinco heptahidratado (ACS, PanReac), EDTA (sal dissódico dihidratado, ACS, Sigma-Aldrich), borax (tetraborato dissódico decahidratado, ACS, Sharlau), e amido de milho (Sigma-Aldrich).

2.2 FORMULAÇÃO DA ARGAMASSA DE CGP

A composição base da argamassa de CGP do corrente trabalho foi estabelecida no seguimento de investigação anterior, descrita em Archer de Carvalho et al. (2024), na qual se estudou a otimização dos rácios químicos SiO_2/Al_2O_3 e H_2O/Na_2O, e do rácio água/sólidos totais nas argamassas de CGP por forma a maximizar a resistência à compressão e a incorporação de CVB, mantendo a trabalhabilidade e os níveis de eflorescência dentro de limites adequados. Assim, no presente estudo foram utilizados os rácios apresentados no Quadro 3 que correspondem à composição base apresentada no Quadro 4.

Quadro 3 – Rácios usados na formulação base

Rácio	**Valor usado**
Incorporação CVB (%m/m do total de precursores)	40
SiO_2/Al_2O_3 *	4,5
H_2O/Na_2O *	16,0
Água/sólidos totais **	0,17
Agregados/ Precursores **	2,0
* - Rácios molares ** - Rácios mássicos	

[1] O parâmetro D50, em microns, corresponde à mediana da distribuição granulométrica, ou seja, para determinada distribuição granulométrica, 50% das partículas têm tamanho inferior a D50 e 50% das partículas têm tamanho superior a D50.

Quadro 4 – Composição base da argamassa de CGP

Material	Composição (%m/m)
MK	15,9
CVB	10,6
SS	11,2
HS	8,7
Água	0,8
Areia	52,8

As argamassas de CGP foram preparadas numa misturadora automática (Controls, 65-L0502) adicionando primeiro as quantidades medidas dos precursores (MK e CVB) e da solução de alcalinização. A mistura decorreu durante 120 segundos a 140 rpm e mais 120 segundos a 285 rpm. De seguida, após raspar as paredes do recipiente da misturadora, foi adicionada a quantidade necessária de agregado fino e a mistura continuou durante mais 120 segundos a 140 rpm. As paredes do recipiente do misturador foram novamente raspadas antes de continuar a misturar durante mais 120 segundos a 285 rpm.

2.3 PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

Os ensaios de impressão 3D das argamassas de CGP desenvolvidas foram levados a cabo numa impressora WASP ceramic printer cujas fotografias se apresentam na Figura 2.

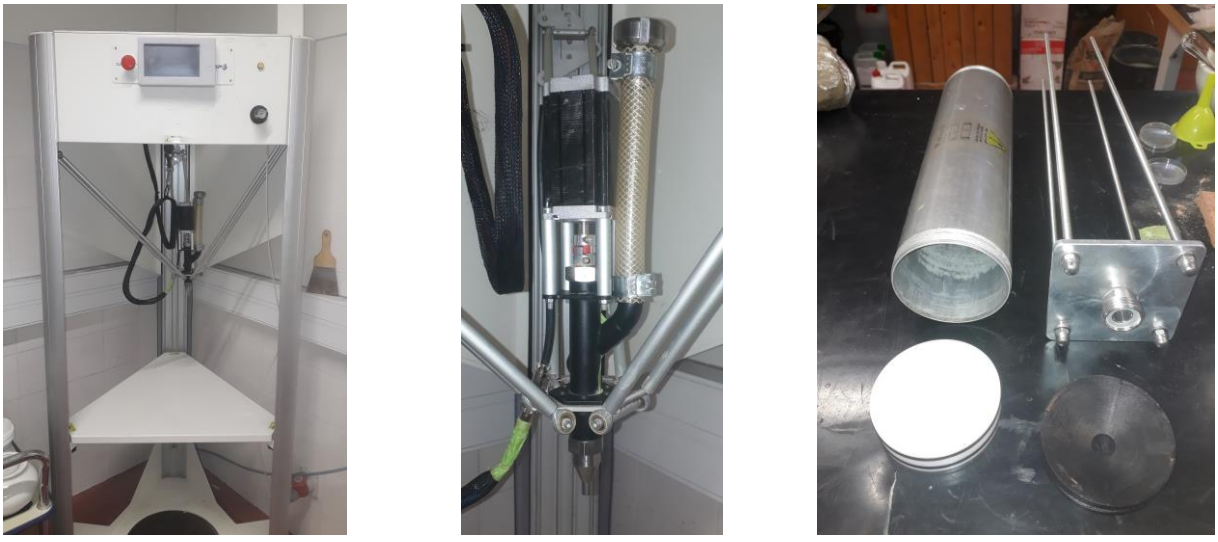


Figura 2 – Impressora WASP ceramic printer. À esquerda: vista geral do equipamento; ao centro: pormenor da cabeça de impressão; à direita: pormenor do cilindro de alimentação de argamassa.

Em cada ensaio de impressão, a argamassa fresca, imediatamente após o processo de preparação descrito anteriormente, foi colocada no interior do cilindro de alimentação de alumínio (Figura 2, à direita) onde um embolo acionado por meio de ar comprimido faz o material extrudir através do orifício no fundo do cilindro de alimentação e pela mangueira que liga à cabeça de impressão (Figura 2, ao centro). Aí, o fluxo de material é regulado com recurso ao parafuso de extrusão, cuja velocidade é controlável, e faz o material escoar através do bico de impressão (com diâmetro de 8 mm). A velocidade do movimento de translação da cabeça de extrusão foi mantida constante, em 6 mm/s. O modelo 3D selecionado para os testes de impressão é o que se mostra na Figura 3, com dimensões de L x W x H = 148 mm x 48 mm x 50 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ADAPTAÇÃO DA ARGAMASSA DE CGP PARA APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D

3.1.1 Otimização da consistência/ fluidez inicial da argamassa de CGP

Os primeiros testes de impressão com argamassa de CGP com a composição base (ver Quadro 4) permitiram concluir que esta formulação apresenta uma consistência demasiado fluida, permitindo a sua extrusão mas tornando impossível a construção de estruturas em camadas subsequentes.

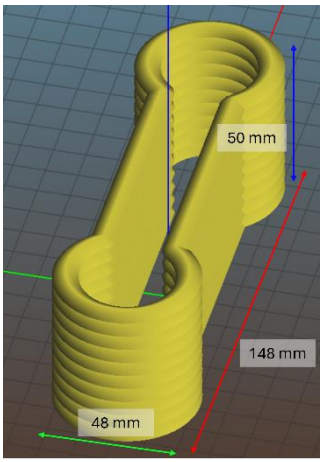


Figura 3 – Modelo 3D utilizado nos testes de impressão

Na Figura 4, referente a um teste preliminar de impressão, pode verificar-se que as várias camadas se fundem devido à elevada fluidez que não permite ao material manter a forma após extrusão.

Figura 4 – Teste inicial de impressão com composição base de argamassa de CPG.

Tendo em conta os resultados dos testes preliminares de impressão, ficou evidente a necessidade de ajustar as características da argamassa ao processo de impressão 3D de modo a obter as propriedades reológicas necessárias para que seja possível extrudir o material através do bico de impressão e construir a peça pretendida camada sobre camada.

Assim, numa etapa inicial, o objetivo passou por reduzir a fluidez da argamassa sem, no entanto, alterar substancialmente a composição química, isto é, mantendo os rácios definidos anteriormente que permitem obter bons resultados em termos de desempenho mecânico e equilíbrio químico (nível insignificante de eflorescência). Para tal, testou-se a incorporação de pó de calcário como substituto

parcial da areia, devido à sua granulometria mais fina, que pressupõe uma menor fluidez da argamassa fresca para a mesma quantidade de fase líquida na mistura inicial.

A percentagem de substituição foi definida com base num método de maximização do empacotamento de partículas, nomeadamente através do ajuste da distribuição granulométrica (PSD) da mistura de agregados finos, i.e. areia + calcário, à curva de otimização de Fuller. O processo, neste caso concreto, resume-se a encontrar a combinação de proporções entre areia e pó de calcário cuja curva PSD composta melhor se aproxime da curva de Fuller com d_{max} correspondente ao tamanho de partícula máximo da areia.

As proporções volumétricas de areia e pó de calcário assim determinadas foram aproximadamente 75% e 25%, respetivamente, e as proporções mássicas foram consideradas semelhantes, uma vez que a massa volúmica dos dois materiais é aproximadamente a mesma: 2,6 a 2,8 t/m^3.

Esta alteração na composição produziu melhorias na reologia da argamassa, permitindo uma redução significativa da sua fluidez. No entanto, esta melhoria não foi suficiente para se obter uma capacidade de construção satisfatória nos testes de impressão, ou seja, a estrutura impressa camada após camada apresentava ainda elevados níveis de deformação. Neste contexto, a taxa de substituição de areia por pó de calcário foi incrementada para 35 %m/m, o que permitiu melhorar consideravelmente a capacidade de construção face às composições anteriores, tal como se mostra na Figura 5.

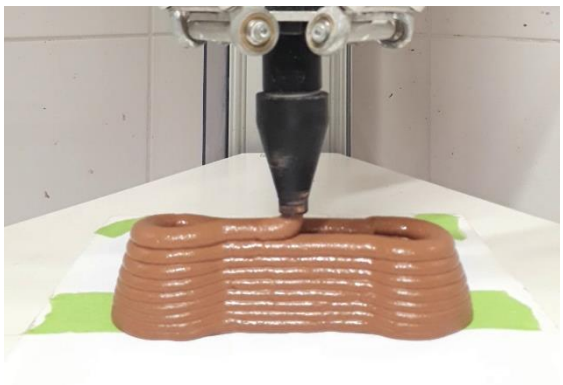


Figura 5 - Teste de impressão com de argamassa de CPG, incorporando 35% substituição de areia por pó de calcário na mistura de agregados finos.

Na Figura 6 apresentam-se as curvas PSD da areia, pó de calcário, a curva de Fuller correspondente, a curva PSD da mistura areia + calcário otimizada por aproximação à curva de Fuller (75% areia + 25% de pó de calcário), e a curva PSD da mistura melhorada em termos do processo de impressão (65% areia + 35% de pó de calcário).

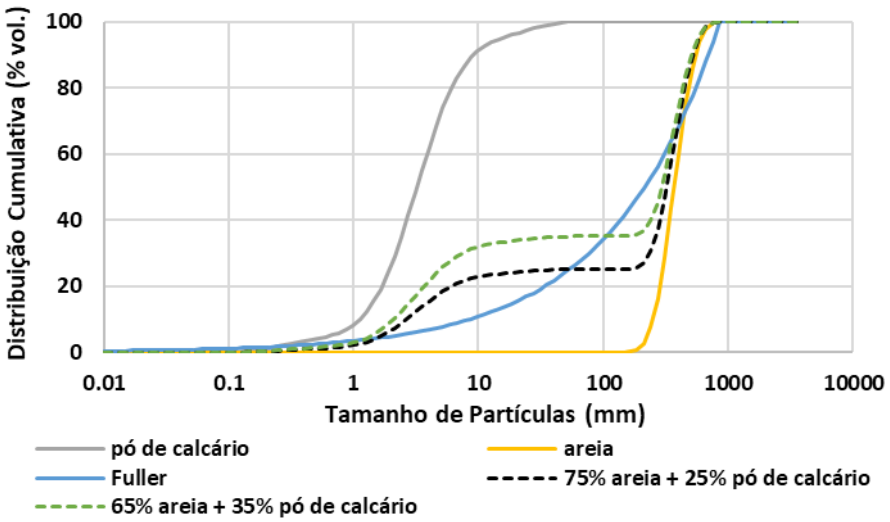


Figura 6 – PSD dos agregados finos, curva de otimização de Fuller e curvas compostas (25% e 35% pó de calcário)

3.1.2 Otimização do tempo em aberto da argamassa de CGP

Estabelecida a formulação da argamassa cuja consistência inicial permite a sua extrusão e construção de estruturas camada a camada, um novo desafio se colocou nos ensaios de impressão, relacionado com o curto tempo de presa que tipicamente os cimentos geopoliméricos apresentam (Komnitsas & Zaharaki, 2007; Lee et al., 2016).

De facto, no caso concreto da argamassa de CPG desenvolvida, incorporando 35% de pó de calcário na mistura de agregados, o seu rápido processo de cura implica que o intervalo de tempo em que foi possível fazer impressão 3D se tenha revelado insuficiente. Na verdade, em cada ensaio foi testada a impressão do modelo 3D da Figura 3 em três tempos diferentes após o início da preparação da argamassa. Assim, uma quantidade de argamassa de CGP suficiente para a impressão de 3 peças foi carregada inicialmente no cilindro de alimentação da impressora. Depois, foram realizados 3 testes de impressão: aos 45 min, 75 min e 105 min, contados a partir do momento de adição da solução ativadora à mistura de precursores. O intervalo de tempo de 45 min após o início da preparação da argamassa é o intervalo de tempo mínimo necessário para fazer a mistura, carregar o cilindro de alimentação e preparar a impressora para o teste. Com o teste aos 105 min fica definido um intervalo de impressão de 1 hora (105 min – 45 min = 1 h), que é considerado adequado para o processo em causa. Por outras palavras, nesta fase de otimização, pretendeu-se obter uma argamassa com propriedades reológicas que permitam a sua impressão satisfatória durante um período de 1 hora. Este intervalo de tempo é considerado adequado ao processo uma vez que permite facilmente a impressão da totalidade do material carregado no cilindro de alimentação, garantindo simultaneamente tempo suficiente para resolver qualquer problema processual ou correção de erros, sem que exista o risco de a argamassa endurecer no interior do equipamento. Por outro lado, a extensão deste período de tempo além de 1 hora implicaria a necessidade de uma modificação mais acentuada da evolução da reologia da argamassa e reduziria a capacidade de construção camada após camada, devido ao atraso que seria imposto no processo de cura.

Figura 7 – Testes de impressão da argamassa modificada com pó de calcário. À esquerda: 45 min; à direita: 75 min.

Na Figura 7 apresentam-se as fotografias do processo de impressão aos 45 min e aos 75 min da argamassa incorporando pó de calcário – é possível verificar que aos 75 min o material apresenta um aspeto mais seco e a capacidade de construção é superior (menor deformação). No entanto, o rápido endurecimento desta argamassa não permite imprimir aos 105 min – a argamassa perde extrudibilidade e não chega ao bico de extrusão, ou por outras palavras, o seu tempo em aberto é inferior a 105 min.

Com o objetivo de ultrapassar esta dificuldade, foi considerada a incorporação de um agente retardador na argamassa modificada com pó de calcário, por forma a retardar o seu endurecimento e prolongar o tempo em aberto até pelo menos 105 min.

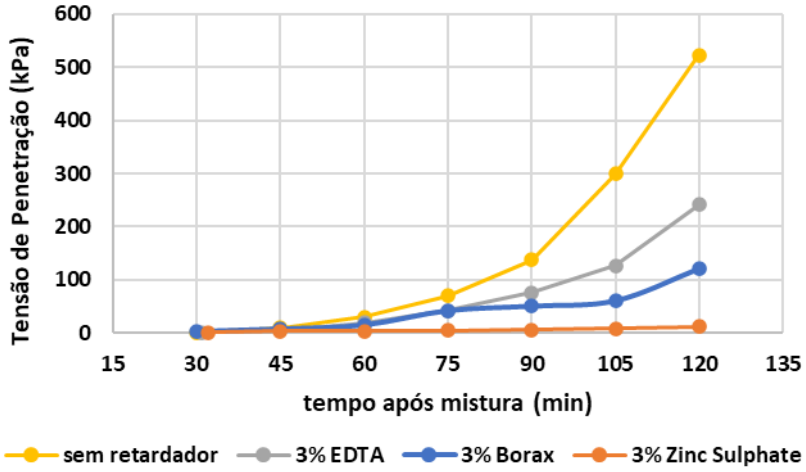


Figura 8 – Curvas de tensão de penetração das argamassas.

No seguimento de resultados publicados na literatura, 3 tipos de retardador foram testados – EDTA (Sasaki et al., 2019; Yan et al., 2020), borax (Liu et al., 2017; Oderji et al., 2019) e Sulfato de Zinco (Chamssine et al., 2022; Cong et al., 2019) – numa proporção de 3 %m/m da mistura de precursores. A evolução do endurecimento da argamassa foi monitorizada através de um ensaio de penetração com sonda cónica (12 mm diâmetro da base, 20 mm altura do cone) realizado num texturómetro (TA.XTplusC, Stable Micro Systems), de acordo com Lootens et al. (2009) e Ivanova et al. (2022). As curvas de evolução no tempo da tensão de penetração das argamassas de CGP (que tem relação com a tensão de cedência do material) apresentam-se na Figura 8, onde se compara o efeito da adição dos 3 agentes retardadores, tendo como referência a argamassa sem adição de retardador.

Como pode verificar-se, os três agentes retardadores testados reduzem a taxa de aumento da tensão de penetração em relação à argamassa sem incorporação de retardador, ou seja, produzem o efeito desejado de atrasar o endurecimento das argamassas. É também evidente que para o nível de incorporação testado (3 %m/m) o retardador com efeito mais pronunciado é o sulfato de zinco, razão pela qual foi selecionado no estudo subsequente.

3.1.3 Ajuste final da consistência

A incorporação de agente retardador, tendo produzido o efeito desejado de atrasar o endurecimento da argamassa e, portanto, aumentar o tempo em aberto da argamassa de CGP, teve também influência na consistência inicial da argamassa, tornando-a mais fluida.

Assim, revelou-se necessário voltar a ajustar a consistência inicial da argamassa para contrabalançar este efeito do agente retardador. Para tal, foi testada a influência do amido de milho como agente modificador de consistência (o amido tem sido descrito na literatura para este efeito, ver por exemplo Sun et al. (2020)). Através do ensaio de penetração descrito anteriormente concluiu-se que a incorporação de amido de milho a 3 %m/m da mistura de precursores produz um efeito pronunciado na consistência inicial, tal como se mostra no Quadro 5.

Quadro 5 - Efeito da incorporação de agente modificador de consistência.

Incorporação de agente modificador de consistência (%)	Tensão de penetração aos 45 min (kPa)
0,0	2,1
3,0	105,9

O nível de incorporação de agente modificador de consistência e de retardador foram então ajustados em simultâneo, por forma a obter-se um equilíbrio adequado entre consistência inicial e tempo em aberto e alcançar o objetivo de fazer a impressão 3D com qualidade desde os 45 min até aos 105 min.

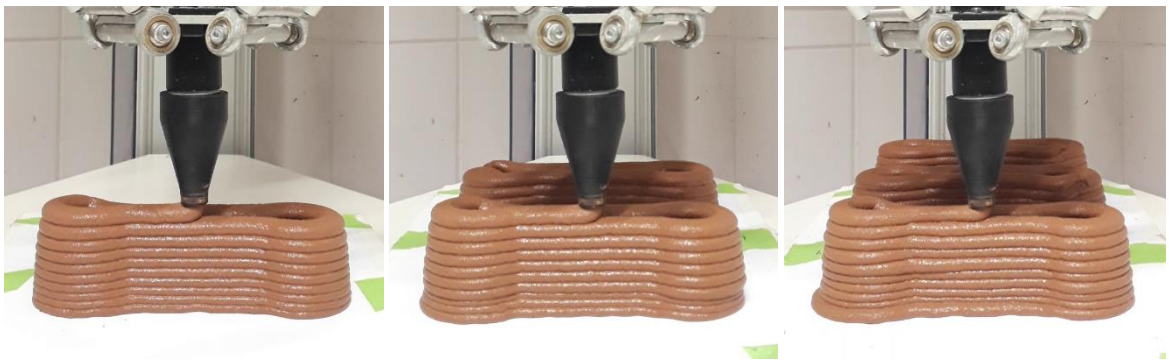


Figura 9 – Testes de impressão 3D com a argamassa de CGP desenvolvida, a diferentes tempos após mistura. À esquerda: 45 min; ao centro: 75 min; à direita: 105 min.

Um bom ponto de equilíbrio foi atingido incorporando sulfato de zinco e amido de milho a 2,5 e 1,5 %m/m da mistura de precursores, respetivamente. Na Figura 9 apresentam-se as fotografias do ensaio de impressão com a argamassa modificada com 35 %m/m de pó de calcário na mistura de agregados, e 2,5 %m/m de sulfato de zinco e 1,5 %m/m de amido de milho (em relação à mistura de precursores). O ensaio foi bem-sucedido aos 45, 75 e 105 min.

4 CONCLUSÕES

O principal foco deste trabalho de investigação foi a adaptação de uma formulação de argamassa de CGP ao processo de impressão 3D. As principais conclusões do estudo são as que se seguem.

- A formulação inicial de argamassa de CGP, desenvolvida em investigação anterior e com foco unicamente no desempenho mecânico e estabilidade química, não está adaptada ao processo de impressão 3D no equipamento e condições utilizadas. A argamassa é demasiado fluida e não apresenta capacidade para construção camada após camada.
- A substituição parcial de areia por pó de calcário, na mistura de agregados finos, reduziu a fluidez das argamassas de CGP e melhorou a sua capacidade de construção no processo 3D.
- A introdução de um agente retardador revelou-se essencial para aumentar o tempo em aberto das argamassas de CGP e permitir fazer impressão 3D num intervalo de pelo menos 1 hora. De entre os 3 agentes testados, concluiu-se que o sulfato de zinco é o que apresenta maior efeito retardador nas condições de ensaio.
- A incorporação de um agente modificador de consistência permitiu fazer um ajuste fino da consistência inicial das argamassas de CGP e melhorar a sua capacidade de construção no processo 3D. Concluiu-se que o amido de milho produziu o efeito desejado quando utilizado em pequenas proporções.

Com base nesta investigação inicial de impressão 3D com argamassa de CGP, trabalhos futuros deverão focar-se:

- na otimização sistemática e simultânea das percentagens de incorporação de pó de calcário, agente retardador e agente modificador de consistência.
- no estudo e determinação das propriedades reológicas das argamassas e sua correlação com o desempenho do material no processo de impressão 3D.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio ao CERENA (Projeto Estratégico FCT-UIDB/04028/2020), pelo apoio ao CDRSP (Projetos Estratégicos UIDB/04044/2020 e UIDP/04044/2020; e Laboratório Associado ARISE LA/P/0112/2020), e pela Bolsa de Doutoramento 2020.04531.BD. Este trabalho de investigação foi também financiado pelo projeto “3DFiber.concrete” (CENTRO-01-0247-FEDER-072643) através do Portugal2020 (Centro2020).

REFERÊNCIAS

Ahmed, G. H. (2023). A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, *66*, 105863. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.105863

Al-Tamimi, A. K., Alqamish, H. H., Khaldoune, A., Alhaidary, H., & Shirvanimoghaddam, K. (2023). Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges. *Buildings 2023, Vol. 13, Page 827*, *13*(3), 827. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13030827

Archer de Carvalho, T., Gaspar, F., Marques, A. C., & Mateus, A. (2023). Evaluation of the Potential of Metakaolin, Electric Arc Furnace Slag, and Biomass Fly Ash for Geopolymer Cement Compositions. *Materials*, *16*(7), 2741. https://doi.org/10.3390/ma16072741

Archer de Carvalho, T., Gaspar, F., Marques, A. C., & Mateus, A. (2024). Optimization of formulation ratios of geopolymer mortar based on metakaolin and biomass fly ash. *Construction and Building Materials*, *412*, 134846. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134846

Bhushan Jindal, B., & Jangra, P. (2023). 3D Printed Concrete: A comprehensive review of raw material's properties, synthesis, performance, and potential field applications. *Construction and Building Materials*, *387*, 131614. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131614

Chamssine, F., Gasparotto, L. H. S., Souza, M. A. F., Khalifeh, M., & de Oliveira Freitas, J. C. (2022). Retarding mechanism of Zn2+ species in geopolymer material using Raman spectroscopy and DFT calculations. *Scientific Reports*, *12*(1). https://doi.org/10.1038/S41598-022-25552-0

Cong, X., Zhou, W., Geng, X., & Elchalakani, M. (2019). Low field NMR relaxation as a probe to study the effect of activators and retarders on the alkali-activated GGBFS setting process. *Cement and Concrete Composites*, *104*, 103399. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103399

Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry & Applications* (J. Davidovits, Ed.; 5th Ed). Institut Géopolymère.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 2917–2933. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z

Guamán-Rivera, R., Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Muñoz-Sanguinetti, C., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2022). Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings 2022, Vol. 12, Page 229*, *12*(2), 229. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020229

Ivanova, I., Ivaniuk, E., Bisetti, S., Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2022). Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, *156*, 106764. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106764

Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, *20*(14), 1261–1277. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011

Lee, N. K., Kim, E. M., & Lee, H. K. (2016). Mechanical properties and setting characteristics of geopolymer mortar using styrene-butadiene (SB) latex. *Construction and Building Materials*, *113*, 264–272. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.055

Liu, H., Sanjayan, J. G., & Bu, Y. (2017). The application of sodium hydroxide and anhydrous borax as composite activator of class F fly ash for extending setting time. *Fuel*, *206*, 534–540. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.049

Lootens, D., Jousset, P., Martinie, L., Roussel, N., & Flatt, R. J. (2009). Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and Concrete Research*, *39*(5), 401–408. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2009.01.012

Novais, R. M., Carvalheiras, J., Capela, M. N., Seabra, M. P., Pullar, R. C., & Labrincha, J. A. (2018). Incorporation of glass fibre fabrics waste into geopolymer matrices: An eco-friendly solution for off-cuts coming from wind turbine blade production. *Construction and Building Materials*, *187*, 876–883. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.004

Oderji, S. Y., Chen, B., Shakya, C., Ahmad, M. R., & Shah, S. F. A. (2019). Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature. *Construction and Building Materials*, *229*, 116891. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116891

Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2018). Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *113*(April 2017), 108–116. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.051

Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *47*(1–2), 11–25. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5

Puzatova, A., Shakor, P., Laghi, V., & Dmitrieva, M. (2022). Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings 2022, Vol. 12, Page 2023*, *12*(11), 2023. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12112023

Qaidi, S., Yahia, A., Tayeh, B. A., Unis, H., Faraj, R., & Mohammed, A. (2022). 3D printed geopolymer composites: A review. *Materials Today Sustainability*, *20*, 100240. https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2022.100240

Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2008). The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *318*(1–3), 97–105. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.12.019

Sasaki, K., Kurumisawa, K., & Ibayashi, K. (2019). Effect of retarders on flow and strength development of alkali-activated fly ash/blast furnace slag composite. *Construction and Building Materials*, *216*, 337–346. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.022

Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, *237*, article 117455. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455

Sun, C., Xiang, J., Xu, M., He, Y., Tong, Z., & Cui, X. (2020). 3D extrusion free forming of geopolymer composites: Materials modification and processing optimization. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120986. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120986

Yan, X., Jiang, L., Guo, M., Chen, Y., Zhu, P., Jin, W., & Zha, J. (2020). Using EDTA-2Na to inhibit sulfate attack in slag cement mortar under steam curing. *Construction and Building Materials*, *265*, 120324. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120324

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REATIVIDADE DE RESÍDUOS: UMA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA UTILIZANDO MÉTODOS INDIRETOS

Flávia Müller Grigoleto[a]; Pedro Valle Salles[b]; Luis Felipe dos Santos Lara[a]; Augusto Cesar da Silva Bezerra[a]

[a] Federal Center for Technological Education of Minas Gerais - Av. Amazonas 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brazil CEP: 30.421-169 grigoletoflavia@cefetmg.br; luislaraenge@gmail.com; augustobezerra@cefetmg.br ;

[b] State University of Minas Gerais - Av. Brasília, 1304 - Bau - João Monlevade – Minas Gerais - Brazil CEP: 35.930-314; pedrovallesalles025@gmail.com

RESUMO

Este estudo analisou a atividade pozolânica de potenciais materiais cimentícios suplementares, sendo dois resíduos da construção civil (pó reciclado de tijolos - PRT e pó reciclado cimentício - PRC) além de metacaulim (MK) e escória granulada de alto forno (EGAF) através de índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, índice de desempenho (IC) com cimento, e o Método da Condutividade Elétrica. A caracterização foi realizada por difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), termogravimetria (TG) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). O PRT atendeu aos requisitos para pozolanas, no que se refere à composição química, umidade, perda ao fogo, IAP com cal e IC com cimento. O PRC atendeu os parâmetros da NBR 12653 de teor de óxido de enxofre, de álcalis disponíveis, de umidade e de perda ao fogo. Para o MK, todos os requisitos químicos foram atendidos. Para a EGAF não foi atendida a somatória mínima dos óxidos, indicando não ser um material silicoso ou sílico-aluminoso, mas atendeu os valores de resistência mínima. A análise através do Método da Condutividade Elétrica, indicam o PRT classificado como moderadamente pozolânico, o MK classificado como pozolânico, e o PRC e a EGAF como não pozolânicos.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição, metacaulim, escória de alto forno, atividade pozolânica, reatividade.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) podem ser incorporados ao cimento Portland durante o processo de produção ou ainda como adição durante a dosagem de concretos e argamassas (Juenger; Snellings; Bernal, 2019). Além de interferir na microestrutura da matriz hidratada, a incorporação dos MCS soma vantagens ambientais e econômicas, principalmente na redução da produção de clínquer e na adequada destinação de resíduos industriais diversos (Bauer, 2015; Oliveira et al., 2017). Segundo Mehta e Monteiro (2014), dependendo de quais propriedades se deseja obter, quantidades relativamente elevadas de MCS podem ser acrescentadas entre 20 e 70% da massa do material cimentício total. No Brasil, os MCS reativos normalmente adicionadas à composição do cimento Portland são a argila calcinada, a cinza volante e a escória granulada de alto forno e como MCS inerte normalmente tem-se o filer calcário.

As atividades de construção e demolição geram grande parte do volume dos resíduos sólidos gerados em áreas urbanas (majoritariamente formados por resíduos cimentícios e cerâmicas vermelhas), onde dados expressivos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2023) apontam cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos da construção civil (RCC) gerados no ano de 2022. O uso de RCC é normalmente mais eficaz do que o uso de agregados naturais porque o resíduo não atua apenas como agregado, mas também como um material amorfo que está disponível para reagir com o ambiente alcalino (Cristelo, 2018; Fernández-Jiménez et al., 2003). Por outro lado, a geração de pós é algo comum na fabricação de agregados de RCC. Com isso, torna-se essencial o estudo de destinações para essa fração pulverulenta do material.

O metacaulim provém de argila rica em sílica e alumina na forma de caulinita, que quando calcinada e moída fornece um material com alta superfície específica e alta reatividade pozolânica. A calcinação ocorrida entre 600 e 900°C tem como objetivo a destruição da estrutura cristalina presente nos argilominerais e a formação de estrutura amorfa (Vieira, 2013).

A escória de alto forno é um material cuja formação se dá na produção do ferro gusa, onde se a escória é resfriada lentamente ao ar, os componentes químicos do material apresentam geometria cristalina, que não reagem com a água a temperatura ambiente e será fracamente cimentícia e pozolânica. No entanto, quando a escória líquida é rapidamente resfriada, a maior parte da cal, magnésia, sílica e alumina são mantidas em estado não cristalino (ou vítreo), sendo assim reativa de maneira análoga às pozolanas e sendo chamada de escória granulada de alto forno (Mehta; Monteiro, 2014).

Finamente fragmentadas e moídas, pozolanas são materiais silicosos ou aliminosilicosos que, na presença de água e de hidróxido de cálcio, reagem formando silicatos de cálcio hidratados (ASTM 618, 2014). Diferentemente dos produtos cimentantes, pozolanas não são capazes de endurecer apenas com água e, geralmente, necessitam de produtos de hidratação do cimento para reagirem. As pozolanas apresentam reações mais lentas, onde as taxas de liberação de calor e desenvolvimento de resistência mecânica são consequentemente mais lentas. Nas reações pozolânicas consome-se hidróxido de cálcio em vez de produzi-lo, o que tem grande relevância com relação a durabilidade da pasta hidratada em ambientes ácidos (Skibsted; Snellings, 2019).

O CP V tem a composição em massa de 90 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio além de permitir a uma adição de 0 a 10% de fíler (ABNT, 2018). O cimento Portland de cinzas volantes, possui duas subclasses de acordo com a norma europeia BS EM 197-1:2000, a Classe II/A-V, com teor de cinza volante entre 6 e 20%, e a Classe II/B-V com teor variando entre 21 e 35%. Semelhante ao cimento de alto-forno, o cimento pozolânico tem baixa resistência aos sete dias (mínimo 12MPa) e aos 28 dias

(mínimo de 22,5MPa). Tem como vantagem a baixa liberação de calor, o que torna o cimento pozolânico um cimento com baixo calor de hidratação.

No Brasil, o cimento Portland pozolânico pela NBR 16697 (ABNT, 2018) tem estabelecida sua classe de resistência em 25, 32 e 40 MPa, composição em massa de 45 a 85% de clínquer e sulfatos de cálcio, material pozolânico entre 15 e 50% e fíler entre 0 e 10%. Os requisitos químicos e físicos que os materiais devem atender para que possam ser classificados como pozolana são apresentados pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Nos requisitos físicos dos materiais pozolânicos, esta norma estabelece que a massa retida acumulada na peneira de 45 µm deve ser de no máximo 20% para que possa ser considerado pozolanicamente ativo. A classificação e a caracterização das adições minerais reativas do tipo pozolana baseiam-se em métodos indiretos de mensuração do potencial reativo através da determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias e do índice de desenvolvimento com cimento Portland aos 28 dias, seguindo as normas NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014).

A atividade pozolânica é influenciada por vários fatores, dentre os quais podem ser citados o pH do meio, a relação portlandita/pozolanas, o teor da fase não cristalina contido no MCS e a composição da matriz amorfa (Brekailo et al.,2019). Analisando pós cerâmicos, Ge et al. (2015), indicam que quanto menor a granulometria, mais reativo o pó. Liu et al. (2016) classificam tanto o pó cerâmico quanto o pó cimentício, bem como a mistura de ambos, como reativos, essa reatividade novamente estaria ligada ao tamanho das partículas. Os autores indicam que quanto maior a quantidade de RCC cerâmico na mistura, melhor o desempenho do pó reciclado. Mesmo não havendo consenso nos resultados apresentados na literatura para a pozolanicidade avaliada por diferentes métodos indiretos, as normas fundamentam a classificação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) na resistência à compressão da argamassa ou na fixação de cal em um intervalo pré-estabelecido.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos utilizados, cujas amostras estão representadas na Figura 1, são o pó reciclado de tijolos (PRT), o pó reciclado de resíduo cinza (PRC), o metacaulim (MK) e a escória granulada de alto forno (EGAF). Todos os materiais foram secos em estufa a 100 ^{o}C ± 5°C por 24h e acondicionados em bombonas plásticas com tampa roscada até o momento da utilização.

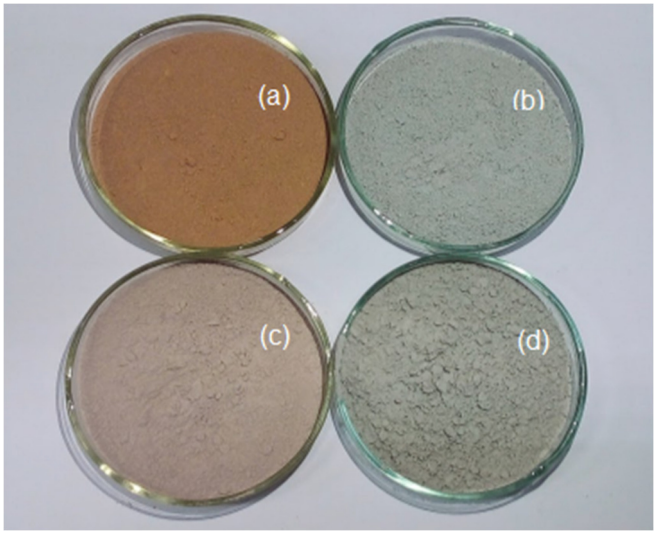


Figura 1: Amostras dos resíduos PRT (a); PRC (b); MK (c) e EGAF (d)

A fim de se obter pós com granulometria uniforme e livre de partículas contaminantes, utilizou-se PRT e PRC produzidos em laboratório objetivando evitar uma possível variação química e mineralógica não planejada na composição destes resíduos

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os tijolos cerâmicos passaram em um britador de mandíbulas e após essa britagem inicial, os particulados obtidos foram secos e colocados em moinho de bolas metálicas com câmara de moagem em aço 1020, em um toral de dez horas de moagem a 90rpm para garantir que a granulometria do material estivesse na mesma casa de grandeza de aglomerante. O PRC foi fabricado a partir de pasta cimentícia de cimento Portland de alta resistência inicial com fator A/C igual a 0,45. Após 28 dias de cura submersa os CP 50x100mm foram rompidos e os fragmentos secos foram britados em um triturador de mandíbulas. O material resultante da britagem teve o mesmo procedimento realizado com o PRT, sendo colocado em um moinho de bolas metálicas com câmara de moagem em aço 1020, a 90rpm para que o material atingisse granulometria próxima a aglomerante comercial. Os pós foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura, picnometria, análise de área superficial por BET, análise química por espectrometria de fluorescência de raios X, difração de raios X e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier.

2.3 ANÁLISE DO ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO (IC) COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS

Realizou-se a análise do IC com cimento (utilizando CP II F32), conforme prescrito na NBR 5752 (ABNT, 2014) por meio da moldagem de 06 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm, de referência (sem adição), compostos por cimento Portland, areia normal e água. Além destes, moldaram-se 06 corpos de prova de argamassa onde 25% da massa do cimento Portland foi substituído por cada um dos diferentes pós estudados - totalizando 24 CPs para estas substituições.

2.4 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL AOS 07 DIAS

A determinação do índice de atividade pozolânica com cal foi por meio de argamassa contendo uma quantidade de adição mineral que corresponda ao dobro do volume do reagente grau analítico (hidróxido de cálcio). Para análise do IAP com cal seguiu-se a NBR 5751 (ABNT, 2015) moldando 04 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm para cada adição mineral estudada, compostos por hidróxido de cálcio, agregado miúdo, adição mineral e água, para então determinar a resistência à compressão aos 7 dias. A resistência à compressão mínima para a classificação da adição mineral como pozolana é de 6,0MPa. Além disso, a argamassa deve apresentar no estado fresco, um índice de consistência pré-estabelecido (225mm ± 5mm), o que leva a diferentes volumes de água de mistura em função das características físico-químicas das adições minerais avaliadas.

2.5 MÉTODO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Além dos requisitos da normativa NBR 12653, foram executados os ensaios de difração de raios X e o Método da Condutividade Elétrica proposto por Luxán, Madruga e Saavedra em 1989, que se baseia na avaliação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio a 40 ºC antes e depois da adição dos materiais a serem avaliados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de área superficial pelo método BET indicou um resultado de 14,39m²/g para o PRT e 11,35m²/g para PRC. Os resultados de massa específica, umidade, perda ao fogo e área superficial dos materiais estudados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Massa específica, umidade e área superficial dos materiais estudados

MATERIAIS	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)	UMIDADE (%)	PERDA AO FOGO (%)	ÁREA SUPERFICIAL (m²/g)
CPV	3,040	-	4,07	4,651
CPII F32	3,070	-	7,41	3,770
PRT	2,670	0,10	2,50	14,390
PRC	2,378	0,20	14,00	11,350
MK	2,637	0,15	2,44	17,204
EGAF	3,693	0,17	0.18	18,100

Para o CPV e o CPII F32, os dados da caracterização são provenientes dos laudos dos próprios fabricantes. Os resultados da análise granulométrica indicam para o PRT e o PRC, sendo que a NBR 12653 (ABNT, 2015) exige que menos de 20% do material seja retido na peneira de 45 µm, requisito atendido para ambos. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 2 e o Quadro 2 transcreve a distribuição do tamanho das partículas dos quatro resíduos estudados. No Quadro 3 são apresentados os resultados de composição química.

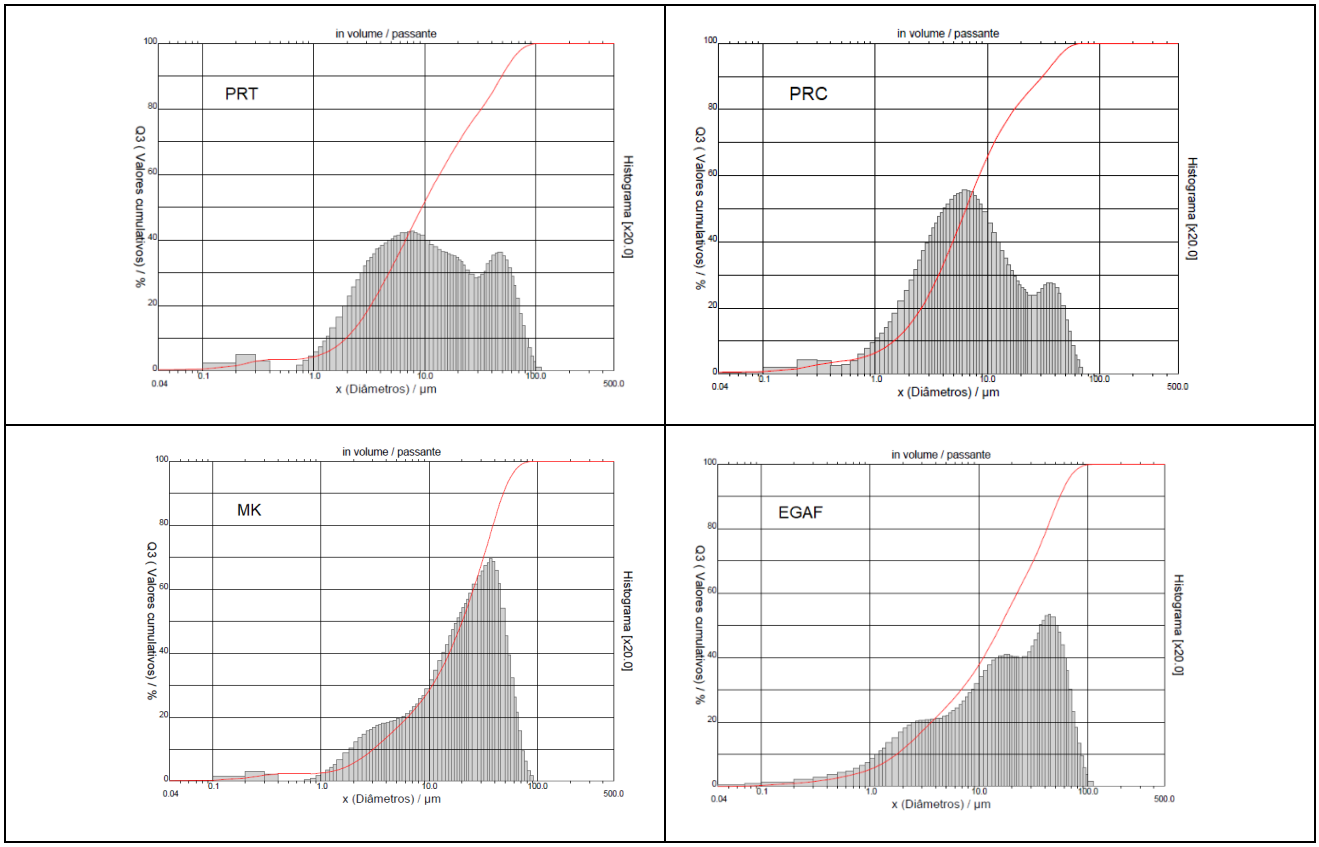


Figura 2: Granulometria dos resíduos PRT, PRC, MK e EGAF

Quadro 2: Tamanho das partículas dos resíduos (µm).

MATERIAIS	Dm	D10	D50	D90
PRT	17,91	1,95	9,42	49,22
PRC	11,33	1,46	6,45	31,17
MK	23,27	3,01	20,09	48,20
EGAF	22,92	1,75	15,78	55,10

Quadro 3 – Composição química dos materiais utilizados

MATERIAL	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	Na_2O	SO_3	MgO	Outros Óxidos
CPV ARI	23,29	1,65	4,99	55,92	6,45	-	2,50	-	1,66	2,51	1,03
CPII F32	18,40	-	2,86	60,72	4,14	-	-	-	2,68	2,71	8,49
PRT	65,90	2,54	7,19	0,28	21,86	0,11	0,57	0,66	0,13	0,64	0,12
PRC	12,67	-	4,42	75,67	2,55	-	0,34	-	2,63	-	1,72
MK	62,00	0,49	2,51	0,02	30,55	0,01	1,45	0,10	-	0,25	2,62
EGAF	32,05	0,17	1,27	39,46	14,33	0,01	0,53	0,96	1,43	8,77	1,02

Os resultados obtidos na análise de FTIR para os resíduos estão apresentados nos espectros na Figura 3 com a identificação dos principais picos.

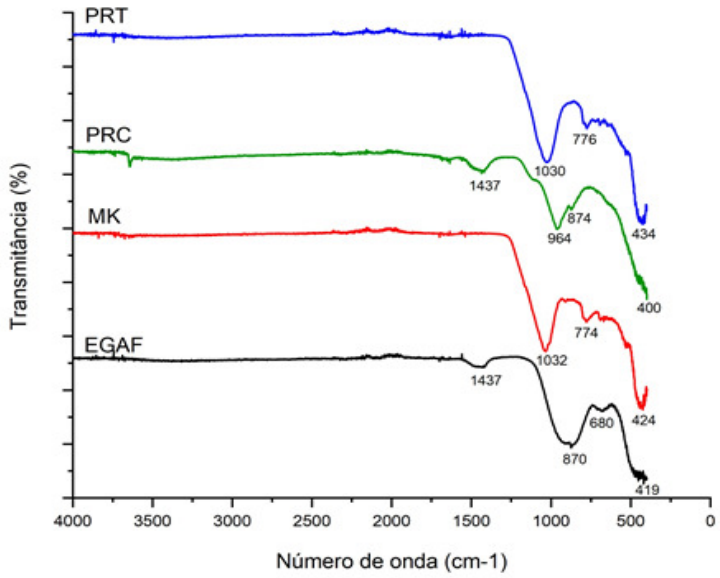


Figura 3 : Espectros de FTIR dos resíduos

Os difratogramas estão representados na Figura 4. Presente em todos os difratogramas, o halo caracteriza a existência de estruturas não cristalinas, passível de atividade pozolânica. O PRC apresentou halo amorfo, atribuído ao C-S-H da pasta de cimento hidratada.

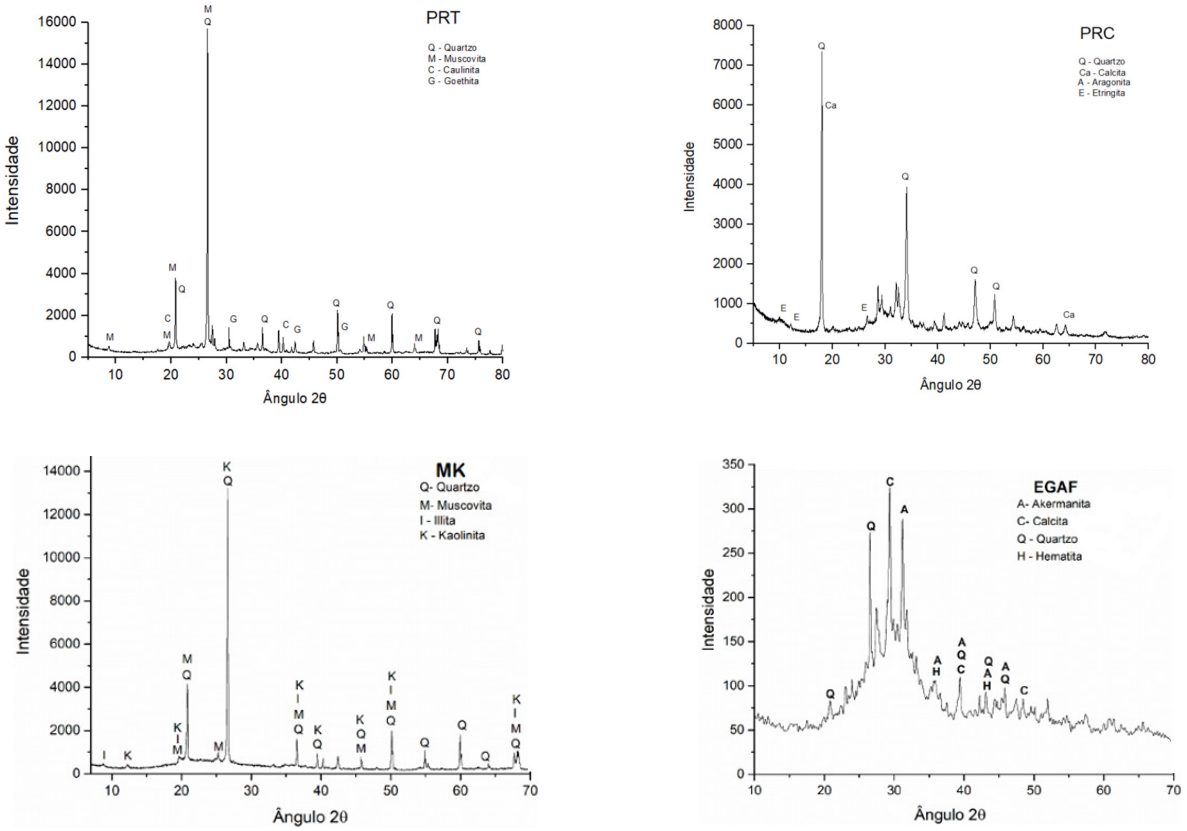


Figura 4: Difração de raios X de uma amostra de cada resíduo (PRT, PRC, MK e EGAF)

Na Figura 5 são mostradas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras dos pós dos resíduos estudados. As partículas do PRT (Figura 3.a) se apresentaram como pequenas partículas não uniformes. Essa não uniformidade pode estar ligada ao processo de moagem promovido. As partículas apresentaram tamanho micrométrico, assim como evidenciado na análise granulométrica (Quadro 2). A imagem referente ao metacaulim (Figura 3.b) demonstrou que as partículas do material se apresentaram mais homogêneas, na forma de aglomerados, e com dimensões micrométricas, o que comprovou os dados obtidos na análise granulométrica.

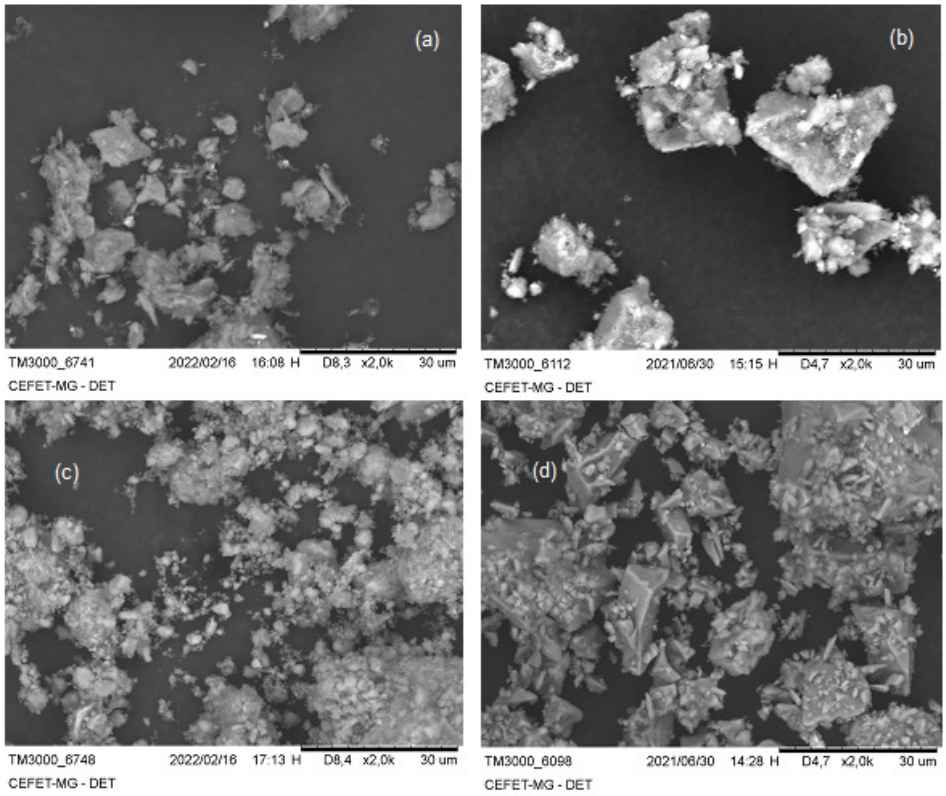


Figura 5: Micrografias obtidas por MEV de PRT (a), MK (b), PRC (c) e EGAF (d)

Avaliando os resultados da análise termogravimétrica (TGA/DTG) da Figura 6, a principal perda de massa ocorreu entre as temperaturas de 0 e 250 °C, seguido de perda progressiva até a temperatura de 1000 °C. A TGA mostrou que as perdas de massa total dos resíduos PRT, PRC, MK e EGAF foram de 0,94; 18,71; 1,94 e 0,29%, respectivamente. Liang; Zhu; Zhang; Wu (2019b) pontuam que a menor perda de massa está relacionada a microestruturas mais densas, uma vez que partículas mais frouxas permitem que as águas livres e ligadas quimicamente sejam liberadas com maior facilidade, elevando a perda de massa. Percebe-se que em todos os resíduos o pico principal situa-se na região de 850-1100cm-1, região associada às vibrações de alongamento assimétricas Si-O-T (T sendo Si ou Al tetraédricos) (Criado; Fernández-Jiménez; Palomo, 2007).

Analisando os resultados de caracterização físico-química do MK e da EGAF, nota-se uma forte semelhança ao PRT e ao PRC respectivamente. Para o MK, já com vasta confirmação na literatura de ser uma adição pozolânica, todos os requisitos químicos especificados pela NBR 12653 foram atendidos. Para a EGAF não foi atendida a somatória mínima dos óxidos, indicando não ser também um material silicoso ou sílico-aluminoso (sua composição química atendeu somente ao teor de SO3 e álcalis totais). Apresentou baixa umidade e perda ao fogo inferior à máxima permitida para todas as classes de material pozolânico. A escória também atendeu o percentual de material retido na peneira 45µm.

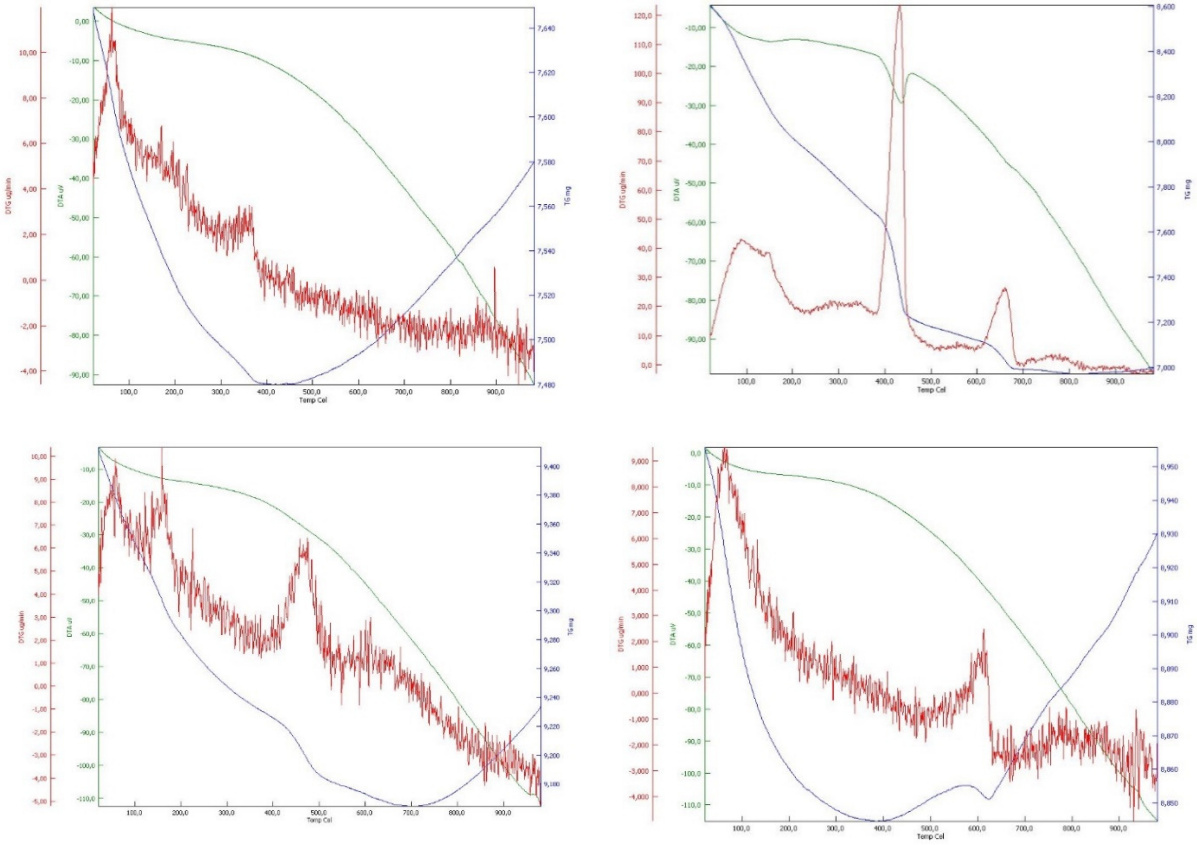


Figura 6: Espectros de TGA dos resíduos estudados (PRT, PRC, MK e EGAF)

Quadro 5: Caracterização das adições e exigências da NBR 12653 para pozolanas e os parâmetros encontrados

ITENS	Limites da NBR 12653 Pozolana Classe N	Limites da NBR 12653 Pozolana Classe C	Limites da NBR 12653 Pozolana Classe E	PRT	PRC	MK	EGAF
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	≥ 70%	≥ 70%	≥ 70%	94,95	19,64	95,06	47,65
SO_3	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%	0,13	2,63	-	1,43
Teor de umidade	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%	0,10	0,20	0,15	0,17
Perda ao fogo	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%	2.50	15,00	2,44	0,18
Álcalis disponíveis em Na_2O	≤ 1,5%	≤ 1,5%	≤ 1,5%	0,66	-	0,10	0,96
Material retido # 45µm	≤ 20%	≤ 20%	≤ 20%	12,28	3,40	12,72	17,32

Os resultados de resistência à compressão das argamassas obtidos no ensaio de Ic com cimento constam no Quadro 6. De acordo com a análise da resistência obtida pela argamassa com adição de resíduo de tijolos, que atingiu 87% da resistência da referência, pode-se afirmar que ela não atingiu ainda o limite mínimo). Já a argamassa com adição de resíduo reciclado cimentícios obteve 66% da resistência à compressão em relação à referência. Ambas as argamassas, que tiveram resistência à compressão média mais distantes da argamassa de referência, apresentaram resultados inferiores ao limite mínimo.

Quadro 6: Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa) conforme NBR 5752

Argamassa B Material	**CP1**	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**CP5**	**CP6**	**Média**	**Desvio Padrão**	**IC %**
PRT	26,38	26,35	26,26	27,69	26,67	26,37	26,69	0,16	87
PRC	20,20	19,12	17,79	23,36	20,12	19,66	20,49	1,66	66
MK	39,61	40,61	38,04	38,65	39,23	39,13	39,45	0,74	128
EGAF	30,62	27,21	29,75	35,05	30,66	30,19	31,25	2,15	101
Argamassa A Referência	30,04	32,43	31,45	29,40	29,67	30,60	30,84	1,30	100

O Quadro 7 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de IAP com cal para as argamassas com as diferentes adições minerais estudadas. Somente o PRC apresentou resultado muito abaixo do limite de 6,0 MPa determinado pela NBR 12653, desclassificando-o também por este ensaio como adição mineral pozolânica. De acordo com a NBR 12653, para ser considerada pozolana, a argamassa com 25% de adição deve apresentar 90% da resistência obtida pela argamassa de referência, que correspondeu a 27,80 MPa.

Quadro 7: Resistência à Compressão Axial 07 dias (MPa) conforme NBR 5751

Material Pozolânico	**CP1**	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**Média**	**Desvio Padrão**
PRT	5,82	5,71	5,67	5,73	5,73	0,05
PRC	0,64	0,72	0,68	0,68	0,68	0,03
MK	12,18	12,23	12,12	11,92	12,11	0,12
EGAF	6,49	6,86	6,14	6,69	6,55	0,27
Referência	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	0,00

A Figura 7 e o Quadro 8 indicam o grau de pozolanicidade para as adições minerais analisadas através do Método da Condutividade Elétrica proposto por Luxán, Madruga e Saavedra, confirmando a classificação já mencionada pelos índices físicos e químicos. Tanto o PRT quanto o MK classificam-se como pozolânicos, sendo essa pozolanicidade moderada do PRT confirmada por diversos autores (Garcia et al., 2015; Salles; Filho, 2014). O PRC e a EGAF classificam-se como não pozolânicos.

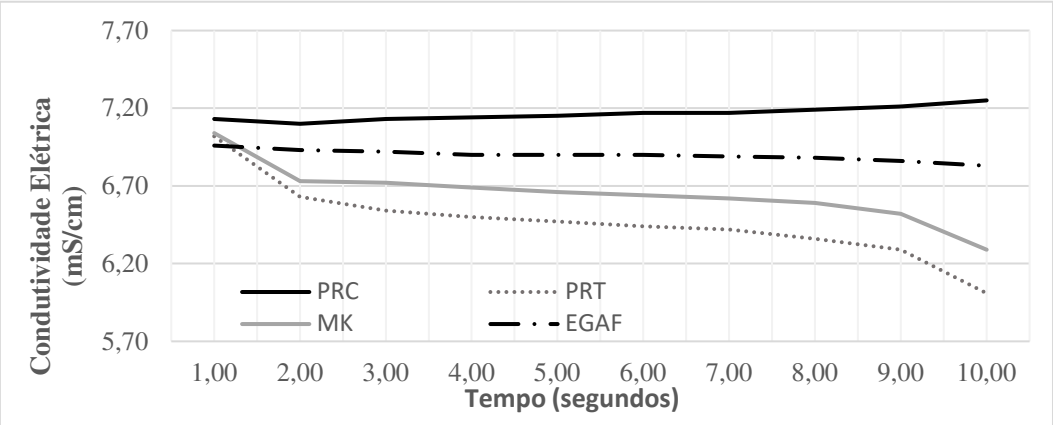


Figura 7: Variação da condutividade elétrica das soluções ao longo de 10 minutos

Quadro 8: Variação de condutividade elétrica e classificação dos resíduos

Condutividade (mS/cm)	PRT	PRC	MK	EGAF
Condutividade Inicial	7,02	7,13	7,04	6,96
Condutividade aos 120 s	6,42	7,17	6,62	6,89
Variação de Condutividade	0,60	0,04	0,42	0,07
Classificação	Moderadamente Pozolânico	Não Pozolânico	Moderadamente Pozolânico	Não Pozolânico

4 CONCLUSÕES

Ao avaliar a reatividade dos resíduos da construção civil através da atividade pozolânica por métodos indiretos, o PRT atendeu aos requisitos apresentados pela NBR 12653 para pozolanas, no que se refere à composição química, umidade, perda ao fogo, índice de atividade pozolânica (IAP) com cal e índice de desempenho (IC) com cimento. O PRC atendeu somente os parâmetros requisitados pela NBR 12653 de teor de óxido de enxofre, de álcalis disponíveis, de umidade e de perda ao fogo. Este resíduo apresentou porcentagens abaixo do limite mínimo para óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro e ainda apresentou valores de resistência bem abaixo às mínimas nos ensaios de IAP com cal aos 7 dias e IC com cimento aos 28 dias determinado pela NBR 12653, desclassificando-o também por este ensaio como adição mineral pozolânica. Para o MK, já com vasta confirmação na literatura de ser uma adição pozolânica, todos os requisitos químicos especificados pela NBR 12653 foram atendidos. Para a EGAF não foi atendida a somatória mínima dos óxidos, indicando não ser também um material silicoso ou sílico-aluminoso (sua composição química atendeu somente ao teor de SO_3 e álcalis totais) mas atendeu o percentual de material retido na peneira 45µm e apresentou baixa umidade e perda ao fogo inferior à permitida para todas as classes de material pozolânico. O grau de pozolanicidade para as adições minerais analisadas através do Método da Condutividade Elétrica, indicam o PRT e o MK classificando-se como pozolânicos, sendo essa pozolanicidade moderada do PRT, e o PRC e a EGAF classificam-se como não pozolânicos. Analisando ainda os resultados de caracterização físico-química do MK e da EGAF, há forte semelhança ao PRT e ao PRC respectivamente, e com os resultados obtidos a indicação é que o PRT e o MK apresentam potencial pozolânico e desclassificam o PRC e a EGAF como tal.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2022. Disponível em: http://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/.

ASTM C618 − 12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2014.

BAUER, LA.F. Materiais de Construção. 5ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2015.

BS EM 197-1: Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. [S.l.]: Institution, British Standards, 2000.

BREKAILO et al. Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. Cerâmica. v 65, 2019.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO2/Na2O ratio. Part I: FTIR study. Microporous and Mesoporous Materials, v. 106, n. 1–3, p. 180–191, 1 nov. 2007.

CRISTELO, N. et al. Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines contente using alkali activated fly ash. Construction and Building Materials, v. 170, 2018.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PUERTAS, F. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements. Advances in Cement Research, v. 15, n. 3, p. 129–136, 2003.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M., QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. Cerâmica. v 61, 2015.

GE, Z. et al. Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. Construction and Building Materials, v. 98, p. 128–136, 2015.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. Cement and Concrete Research, v. 122, n. May, p. 257–273, 2019.

LIANG, C. et al. The utilization of active recycled powder from various construction wastes in preparing ductile fiber-reinforced cementitious composites: A case study. Case Studies in Construction Materials, v. 15, p. e00650, dez. 2021.

LIU, Y. et al. A facile method for preparation of floatable and permeable fly ash-based geopolymer block. Materials Letters, v. 185, p. 370–373, 15 dez. 2016.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. Cement and Concrete Research. Volume 19, Issue 1, Pages 63-68, jan 1989.

METHA, P.M.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, 2ª. ed., 2014, 751p.

OLIVEIRA, A.M.W et al. Verificação da Resistência à Compressão em Concreto com Adição de Filer Calcário. Recife, Conferência Nacional de Patologias e Recuperação de Estruturas. Pag 9, 2017.

SALLES, P.V. et al. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. Ambiente Construído. v. 21 Jul-Set 2021.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cement and Concrete Research, v. 124, n. May, p. 105799, 2019.

VIEIRA, A. R. Estudo sobre as reações pozolânicas de argilas calcinadas: contributo para o desenvolvimento de geomateriais. 177 f. Universidade de Coimbra, 2013.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO USO DO RESÍDUO DE PET COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

Fabíola Luana Maia Rocha[a]; Aline Figueiredo da Nóbrega [b]; Raphaele Lira Meireles de Castro Malheiro [c] , Letícia Sabrina de Melo Souza [d], Diego de Paiva Bezerra[e],

[a] (Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil) / flmr2@academico.ufpb.br

b (Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprigio Veloso 882, 58429-140, Campina Grande, Brasil), alinefnobrega@hotmail.com

c (Universidade do Minho, Azurém, Guimarães, Portugal), raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

d (Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil), leticiassabrina@hotmail.com

e (Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria, PB, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil), diegop.bezerra@hotmail.com

RESUMO

O cenário atual evidencia a busca por obras mais eficientes, as quais propiciem menores custos, assim como impactos ambientais. Nesse sentido, destaca-se a possibilidade de utilização de materiais alternativos, que proporcionem economia e conforto às edificações. Paralelamente, na construção civil, tem-se adotado com frequência a utilização de argamassas que facilitem e agilizem a execução de obras, em especial pisos, com aplicação das argamassas autonivelantes (AAN), que possuem elevada fluidez, permitindo o seu adensamento a partir da ação da gravidade, o que reduz a mão de obra. Mediante a isso, o presente trabalho buscou utilizar um material alternativo, o PET (Politereftalato de Etileno) triturado como substituto parcial dos agregados da AAN, com intuito de analisar as suas propriedades no estado fresco. Para isso foram desenvolvidas misturas com a substituição de 10%, 20% e 30% da areia pelo PET, donde procedeu-se com análises do estado fresco por intermédio dos ensaios de mini funil-V, mini-slump e massa específica aparente. Através das análises buscou-se analisar, principalmente a capacidade de fluxo das argamassas, assim como a viscosidade e capacidade de espalhamento, resultados que foram positivos e ficaram dentro dos limites estabelecidos pela EFNARC (2002), tanto no tempo do funil-V, como no espalhamento. Assim, no tocante às verificações em geral, denota-se que o PET pode ser definido como uma alternativa viável a ser utilizada na AAN, tendo em vista os benefícios estabelecidos, relacionados às propriedades reológicas, leveza e reaproveitamento do material, principalmente por não necessitar de grande quantidade de aditivo superplastificante, assim como por possibilitar reduções na densidade de massa.

Palavras-chave: Propriedades no estado fresco, viscosidade, contrapiso, materiais alternativos, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção está passando por um período de inovações, com uma crescente busca por materiais mais eficientes, sustentáveis e benéficos para o processo construtivo. Nesse

contexto, um exemplo notável é a utilização de argamassas autonivelantes, que estão ganhando popularidade em obras brasileiras de diversos portes.

Devido à sua alta fluidez e capacidade de auto nivelamento sem a necessidade de esforços externos, o uso de argamassa autonivelante torna o processo de execução de pisos e contrapisos simples e eficaz. Esse material pode ser transportado até o local da obra por caminhão betoneira e aplicado na laje por bombeamento (LOPES DA SILVA, 2016).

Com o aumento da conscientização da população pela preservação do meio ambiente e saúde pública, estudos tem verificado a potencialidade de utilização de materiais alternativos na construção civil. Nesse sentido, destaca-se a existência de materiais alternativos leves, os quais propiciam menor massa específica a argamassas e concretos, com consequentemente menores solicitações de peso próprio nas estruturas.

No tocante referente aos tipos de agregados alternativos, destaca-se a possibilidade de utilização de materiais que vão desde pneus inservíveis (Kurz et al, 2018), pó de borracha da indústria calçadista (Shakare et al, 2020), molibdênio (Zhang et al, 2019), resíduos da construção civil (Lin et al, 2020) até resíduos de corte de mármores e granitos (MENDES, 2019).

Outrossim, denota-se que é de grande valia analisar a possibilidade de utilização de agregados alternativos, tendo em vista a maior eficiência às argamassas autonivelantes, nos aspectos referentes aos custos, preservação ambiental e leveza. Mediante a tais concepções, o enfoque desse estudo foi avaliar as propriedades destas com a substituição dos agregados naturais por PET triturado, nas proporções de 10, 20 e 30%, com ensaios no estado fresco, sendo eles: mini funil-V, mini-slump e densidasde aparente.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O conhecimento acerca das definições das argamassas autonivelantes é essencial para a realização desse trabalho, assim como as concepções básicas sobre argamassas leves e materiais alternativos na construção civil.

2.1. ARGAMASSA AUTONIVELANTE

A construção civil tem avançado incessantemente nas últimas décadas, abrangendo inúmeros setores, entre os quais o piso é uma etapa crucial para a conclusão da obra. Nesse contexto, o método tradicional de execução de contrapisos com argamassa seca continua a ser um tipo de trabalho muito desgastante para o trabalhador, exigindo posições abaixadas e colunas muito curvadas. Portanto, alternativas para a industrialização da construção civil alinham-se com as tendências de produção enxuta e ergonomia no trabalho (SOUZA, 2013).

Nesse contexto, a argamassa autonivelante surge como uma solução para otimizar os processos construtivos. Martins (2009) corrobora essa ideia, afirmando que sua aplicação é realizada por meio de processos rápidos, permitindo a redução da mão de obra. Isso ocorre porque a argamassa é lançada sobre a superfície com o auxílio de uma mangueira, espalhando-se automaticamente em fôrmas, moldes ou lonas, sem necessidade de esforço manual para o espalhamento.

Além disso, Martins (2009) destaca que a argamassa autonivelante é derivada da argamassa autoadensável, devendo obrigatoriamente apresentar uma superfície lisa e regular, com um desnível máximo de 1 mm a cada 4 metros de comprimento do elemento estrutural. Recentemente introduzida na construção civil, essa argamassa se destaca por sua elevada fluidez, resultando em pisos mais homogêneos e até menos espessos (LOPES DA SILVA, 2016).

2.2. ARGAMASSA LEVE

Segundo Nascimento et al (2021) as argamassas leves são caracterizadas por possuirem grãos porosos, obtidos através da incoporação de ar, a partir de aditivos, ou proveniente da utilização de agregados leves que podem ser naturais, sintéticos ou subprodutos industriais. Além disso o uso de argamassa leve contribui para diminuição de peso nas estruturas de uma edificação, consequentemente alívio das solicitações estruturais, influenciando ainda no conforto termoacústico.

Paralelamente, na argamassa de revestimento a adição do pó de borracha de pneus na argamassa contribuiu com aumento no teor de ar incorporado, proporcionou uma ligeira redução na quantidade de água de amassamento, melhorou a trabalhabilidade, diminuiu a massa específica e mostrou uma tendência de queda na retenção de água a partir de 10% de adição (CANOVA, 2015). O referido resultado é significante para a aplicação em argamassas autonivelante, pois proporcionaria trabalhabilidade, melhor adensabilidade e agilidade na execução.

Em outro estudo, Rocha et al. (2013), que utiliza EVA (Etileno Acetato de Vinila), aponta uma redução de massa de aproximadamente 63% obtida com o uso do concreto leve em relação ao concreto convencional, todavia, eles trabalham com grandes substituições, chegando a utilizar 80% de EVA. Já no concreto autoadensável, no tocante à densidade, os valores que variam entre 2.055 e 2.130 kg/m3 são alcançados, os concretos produzidos com pós de borracha de pneu têm seus pesos reduzidos em cerca de 20% quando comparados com os convencionais (ANGELIN et al., 2020).

Com a necessidade cada vez maior de se agregar agilidade de aplicação e qualidade às argamassas de contrapiso, o uso do tipo autonivelante tem ganhado mais espaço no mercado da construção. Sendo assim, um dos desafios é conseguir uma argamassa autonivelante para piso que seja leve podendo contribuir principalmente para um melhor isolamento acústico em edificações de múltiplos pavimentos.

2.3. MATERIAIS ALTERNATIVOS NAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

Segundo (Souza, 2013) a busca do processo produtivo sustentável - que significa a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, o gerenciamento da energia, do lixo e do transporte - continua sendo uma preocupação no meio técnico, visto que, estão sendo muitos os investimentos em novas tecnologias para a redução dos impactos ambientais. Nesse ínterim, ressalta-se que muitos materiais vêm sendo comumente reaproveitados na construção civil, sendo utilizados como substituição ou adição à composição.

Outrossim, ressalta-se que estudos de argamassas com alguns tipos de materiais alternativos já foram desenvolvidos, como os pneus inservíveis, propiciando economia, leveza, minimização de fissuras e conforto termoacústico [Cintra (2013), (SHAKARE et al, 2020)., Canova (2015), Kurz et al (2018)]. Comumente foi utilizado o pó de borracha da indústria calçadista com foco em blocos ou tijolos intertravados, demonstrando boa eficiência [Shakare et al (2020), Canova (2015), Rocha et al (2013), Aslani e Kelin (2018)].

Modro et al. (2009) fizeram uso de PET em flocos e triturado no concreto, que foi utilizado como adição e substituto parcial do agregado miúdo, respectivamente. Os ensaios foram feitos utilizando as duas formas de PET simultaneamente, e foi visto que houve uma queda tanto na resistência a compressão, quanto na resistência à tração.

Meneses (2011), por sua vez, utilizou a fibra do Polietileno Tereftalato (PET) em composições de concreto submetidas a altas temperaturas, e percebeu que entre 395 ºC e 480 ºC houve uma

degradação acentuada da massa do PET, onde o polímero derretido incorporou-se aos espaços vazios do concreto e reduziu a poropressão, aumentando sua resistência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se obter os objetivos pretendidos foram feitas análises para caracterização, assim como procedeu-se com metodologias específicas, ambas denotadas a seguir.

3.1 Materiais

O traço referência (REF) utilizou apenas cimento, fíler calcário, areia, aditivo superplastificante e água; paralelamente, nos demais traços substitui-se o agregado miúdo pelo PET em 10%, 20% e 30% (10%PET, 20%PET e 30%PET respectivamente). Ressalta-se que o traço referência foi adotado de acordo com Araújo et al (2015), sendo definido como 1:2:3 (Cimento:Fíler calcário: Areia), com a/c= 0,905 e teor de aditivo superplastificante variando para cada traço de AAN. De forma mais específica, os materiais utilizados nessa pesquisa foram os seguintes:

3.1.1 Cimento

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V – ARI, tendo em vista sua rápida hidratação inicial, assim como sua obtenção de elevada resistência em menor tempo, quando comparado aos demais. Ressalta-se que o referido cimento foi obtido no comércio local de João Pessoa-PB, sendo ele da marca Nacional.

3.1.2 Areia

Foi utilizado um único tipo de areia natural quartzoza, sendo esta obtida no mercado local de João pessoa – PB.

3.1.3 Fíler calcário

Os fílers são materiais usualmente inertes com aproximadamente a mesma finura do Cimento Portland, com ação predominantemente física (NEVILLE; BROOKS, 2013). Nesse sentido, utilizou-se o filer calcário calcítico como parte dos finos, sendo este material proveniente da empresa Mibra Minérios.

3.1.4 Aditivo

Utilizou-se o aditivo redutor de água tipo 2 – RA2 (superplastificante PCE de pega normal) de alto desempenho baseado na nova tecnologia de polímeros MC, principalmente indicado para grandes reduções na quantidade de água, da marca MC Bauchemie.

3.1.5 Água

Fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), sendo esta destinada para o consumo humano. Ressalta-se que ela foi utilizada em temperatura ambiente.

3.1.6 Polietileno tereftalato – PET

O polímero utilizado advém de coleta em aterro sanitário e trituração em moinho de facas, para obtenção de granulometria adequada. O mesmo pode ser verificado na figura 1, a seguir:

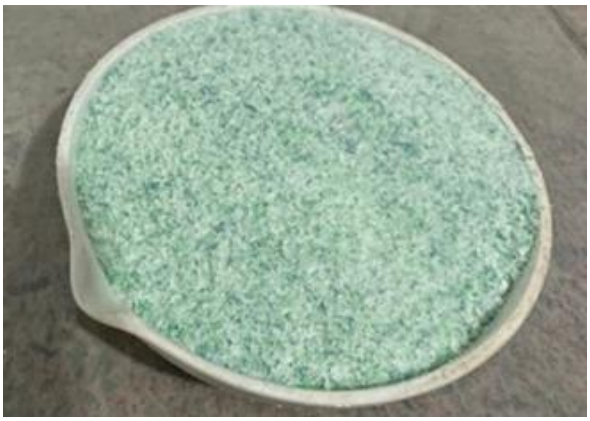


Figura 1 – PET triturado

Denota-se que o referido PET tem granulometria fina, sendo utilizado como substituto parcial da areia.

3.2 Métodos

Com os traços definidos, foram realizados ensaios das argamassas autonivelantes em seu estado fresco, incluindo os seguintes testes: mini funil-v (EFNARC, 2002), mini-slump (EFNARC, 2002) e densidade aparente (ABNT NBR 13278). De acordo com as normas mencionadas, foram obtidos os resultados sobre as propriedades em estado fresco dos quatro traços de argamassas autonivelantes, cuja metodologia é discutida na seção subsequente.

3.2.1 Mini funil-V

O teste de escoamento no Funil em V é realizado para mensurar o tempo que uma amostra de material necessita para fluir completamente em uma caixa em forma de V. Esse teste é utilizado para medir a capacidade de escoamento do CAA, proporcionando informações valiosas sobre sua fluidez e trabalhabilidade (SAFIUDDIN et al., 2011).O ensaio consiste em medir o tempo que a argamassa leva para escoar pelo funil resistindo à segregação. Conforme EFNARC (2002) o tempo médio de queda é compreendido entre 7 e 11 segundos.

3.2.2 Mini-slump

A EFNARC (2002) estabelece que a consistência ideal para pastas autonivelantes é caracterizada por uma tensão de escoamento com um diâmetro de espalhamento entre 24 cm e 26 cm. Além disso, o ensaio permite analisar a capacidade da argamassa de escoar unicamente pela ação do seu próprio peso, bem como sua habilidade de preenchimento.

O espalhamento é avaliado pela capacidade de escoamento da argamassa sobre uma placa de vidro, após o preenchimento e a remoção de um troco de cone, seguidos da medição dos dois diâmetros ortogonais (CARVALHO, 2022).

3.2.3 Densidade aparente

A densidade de massa, também denominada como massa específica, é a relação entre a massa do material e seu volume. Essa grandeza pode ser avaliada de duas maneiras: densidade de massa absoluta, que não considera os vazios presentes no material, e densidade de massa relativa, que leva

em conta os vazios existentes no material (MELO, 2012). A determinação da densidade de massa foi realizada conforme o procedimento especificado na NBR 13278 (ABNT, 2005).

Conforme indicado nas especificações normativas, foram obtidos os resultados sobre as propriedades em estado fresco dos quatro traços de argamassas autonivelantes, discutidos na seção a posteriori.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante as concepções metodológicas especificadas foram obtidos resultados acerca dos ensaios de mini funil-V, mini slump e densidade de massa; os referidos resultados são evidenciados na forma de dados e gráficos, na seção a posteriori.

4.1 MINI FUNIL-V

A EFNARC (2002) infere que para resultados eficientes o tempo de escoamento no funil-V deve estar entre 7 e 11 segundos, logo, verificou-se o referido tempo para cada amostra. Os resultados obtidos são expostos na Figura 2.

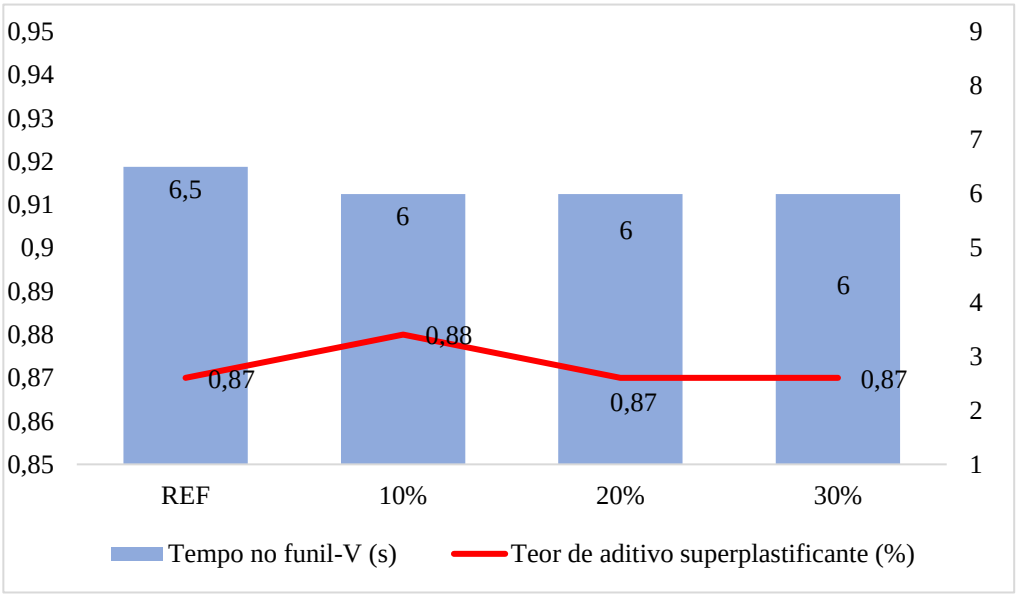


Figura 2 – Resultado do tempo no funil-V

De acordo com os valores auferidos, percebeu-se que todos os traços com substituições tiveram resultados similares, donde ambos estiveram próximos do limite estabelecido pela EFNARC, todavia inferiores.

Ressalta-se que um tempo de escoamento mais curto sugere viscosidade mais baixa, enquanto escoamento prolongado indica a susceptibilidade de bloqueio da mistura (SAFIUDDIN ET AL, 2011). Nesse ínterim, denota-se que a inserção de 10% e 20% de PET propicia valores pertinentes com os definidos como aceitáveis pela EFNARC, todavia, a substituição de 30% de PET proporcionou baixa fluidez.

4.2 MINI-SLUMP

Conforme a EFNARC (2002) a consistência ideal para argamassas autonivelantes deve apresentar um espalhamento compreendido entre 24 cm e 26 cm, logo, analisou-se os diâmetros obtidos para as amostras analisadas, assim como o aspecto do espalhamento.

Mediante as imagens, percebe-se que a argamassa de traço referência apresentou menor fluidez, assim como as argamassas com substituição de PET apresentaram maior coesão e menor segregação. Em termos quantitativos temos os resultados detalhados na Tabela 01.

Tabela 1 – Resultados de espalhamento para os traços analisados

Traço	Teor de superplastificante (%)	Espalhamento (cm)
Referência	0,87	26
10%PET	0,88	25,9
20%PET	0,87	25,3
30%PET	0,87	24,5

Conforme valores apresentados, percebe-se que as argamassas com utilização do PET possibilitaram bons resultados de espalhamento, obedecendo os valores especificados pela EFNARC (2002), donde todos os valores obtidos estiveram dentro do limte de 24cm a 26cm, com quantidades de aditivos bem similares.

4.3 DENSIDADE APARENTE

Sabe-se que o PET possui baixa massa específica, logo, analisou-se a densidade aparente dos quatro traços de AAN, com resultados evidenciados na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Resultados de densidade aparente

Traço	Densidade aparente (kg/m³)
Referência	2179,35
10%PET	2166,59
20%PET	2148,07
30%PET	2112,47

A tabela 2 evidencia o decréscimo da densidade aparente para maiores quantidades de PET. Outrossim, o resultado pode ser melhor identificado na figura 3, a seguir.

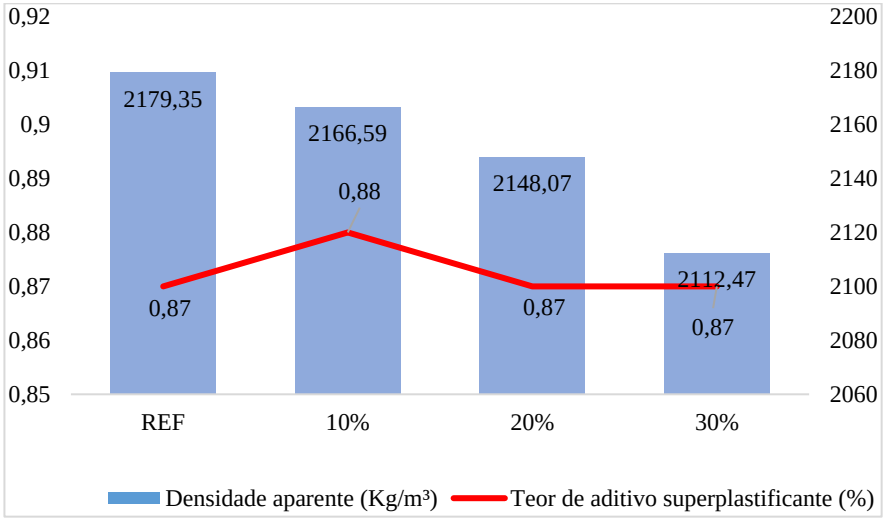


Figura 3 – Resultado de densidade aparente

A figura 3 confirma que o PET reduz a densidade aparente da ANN, diminuindo proporcionalmente à medida que a quantidade de PET no traço aumenta. Nesse contexto, o uso de PET proporciona menor peso próprio aos pisos que utilizam ANN, sendo este um fator significativo para a redução dos esforços nas estruturas, todavia, a redução não foi muito significativa, com a possibilidade de ser maior quando houver maiores teores de substituição de areia por PET.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise das propriedades em estado fresco da utilização de PET como substituto parcial da areia em argamassas autonivelantes, nas proporções de 10, 20 e 30%. Além disso, o estudo avaliou as propriedades das argamassas no estado fresco, constatando bom escoamento para pequenas frações de PET e bom espalhamento para todas as proporções. Paralelamente, a adição de PET resultou em melhores resultados para a densidade aparente, em pequena escala.

Ademais, ressalta-se que como trabalhos futuros sugere-se a realização de análises com substituições com maiores teores de substituição, tendo em vista que as susbtituições com até 30% se mostraram viáveis e com bons resultados. Além disso, denota-se que houve pouca utilização de aditivo, assim como diminuição da densidade aparente, o que pode ser melhorado com inclusão de mais PET na mistura. Outrossim, sugere-se ainda a realização de análises das argamassas no estado endurecido, verificando as propriedades mecânicas das mesmas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILERA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 13278.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.

ARAÚJO, Tomaz Rodrigues de; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; MARTINELLI, Antonio Eduardo; FARIAS, Evilane Cássia de; SILVA,; Camila Renata Ferreira da; GOMES, Valtencir Lúcio de Lima. efeitos

da incorporação do fíler calcário e do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar em argamassas autonivelantes. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, Porto Alegre, 2015.

ASLANI, Farhad; KELIN, Jack. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. **Journal Of Cleaner Production**, Austrália, v. 200, p. 1009-1025, 02 ago. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.323.

CARVALHO, Henrique Duarte Sales. **Contribuição ao estudo de argamassas autonivelantes produzidas com diferentes composições de aglomerantes e adição de cinza pesada e lama vermelha**. 2022. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022

CANOVA, José Aparecido *et al*. Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Maringá, v. 10, n. 3, p. 41-53, 11 nov. 2015. Universidade Federal de Goias. http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i3.32980.

CINTRA, Cynthia Leonis Dias. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. 2013. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** Report from EFNARC, [s. l.], v. 44, n. February, 2002.

KURZ, Mônica Navarini et al. **A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas**. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2018, v. 23, n. 3 [Acessado 30 de Agosto de 2022], e12154. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0488>. Epub 18 Out 2018. ISSN 1517-7076.

LOPES DA SILVA, S. H. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2016.

MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante.** Dissertação de Mestrado em Construção Civil –Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MELO, L. L. F. **Dosagem** de argamassa autonivelante para contrapiso. 2015. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de Resíduos do corte de Mármores e Graníticos (RCMG): Análise das propriedades físicas e mecânicas**. Dissertação, Joinville – Santa Catarina, 2019. 126 p.

MODRO, N.L.R. MODRO, N.R. MODRO, N.R. OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, maio 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª Edição. 2013.

OKAMURA, H.; OUCHI. **Self-Compacting Concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. n. 1, 2003.

ROCHA, F. M. D.; MELO, A. B. de; SILVA, E. P.; TORRES, S. M. Pré-moldado (bloco EVAi) para alvenaria intertravada: projeto, produção, desempenho e simulação de uso em habitação social. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 47- 60, 2013.

SAFIUDDIN, M.D.; SALAM, M.A.; JUMAAT, M.Z. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering** v. XI, p. 1023-1041, 2011.

SHAKARE, Akshay Anil; SIDDIQUE, Salman; SARODE, Shrikant N.; DEEWAN, Roshni; GUPTA, Vivek; GUPTA, Sanchit; CHAUDHARY, Sandeep. A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. **Construction And Building Materials**, Índia, v. 262, p. 1-14, 20 set. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745.

ZHANG, J.; ZHANG, Y.; LIU, J.; MIAO, Y. **Study on the Properties of Gypsum-based Self-leveling Mortar using Molybdenum Tailings.** In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 4., 2019, [...]. Institute of Physics Publishing, 2019.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM EXPERIMENTAL PARA SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL APLICADO EM PAREDES MONOLÍTICAS

Ana Paula da Silva Milani[a]; Bruna Ramos de Souza Cruz[ab]

[a]FAENG, UFMS-Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande-MS, Brasil, ana.milani@ufms.br

[b] b.ramosdesouza@gmail.com

RESUMO

O solo-cimento autoadensável (SCAA) apresenta-se como uma tecnologia promissora diante da necessidade de desenvolvimento de sistemas construtivos que atendam aos requisitos de segurança, durabilidade, conforto e descarbonização. Para que se tenha um bom desempenho do produto SCAA, o seu estudo de dosagem é imprescindível, pois o SCAA consiste na mistura de solo, cimento, água e aditivo químico superplastificante, podendo conter fibras ou outras adições minerais, e deve ter sua consistência fluida a fim de se moldar sem a necessidade de adensamento mecânico (vibração, prensagem ou compactação), bem como não pode apresentar segregação ou exsudação na mistura para correta aplicação e desempenho em elementos construtivos. Portanto, o objetivo desse trabalho foi propor um método de dosagem experimental do SCAA para atender a aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações. Para tanto, foi realizado estudo de dosagem e estabelecidas as correlações entre os fatores tipo de solo, teor de cimento, de água e de aditivo químico, e as propriedades físico-mecânicas do SCAA. Os resultados culminaram no entendimento do comportamento físico-mecânico do SCAA, corroborando para a relação cimento:solo ser o fator que influencia significativamente o desempenho das misturas de SCAA. Este, por sua vez, direcionou para uma proposta de metodologia de dosagem experimental focada na otimização da composição do SCAA versus desempenho mecânico requerido do material, cujos limites de aplicação são misturas autoadensáveis com caraterísticas de solos tropicais arenosa estabilizadas com cimento para construção de paredes monolíticas de edificações.

Palavras-chave: parede monolítica, caracterização físico-mecânica, fluidez, aditivo superplastificante

1 INTRODUÇÃO

O solo-cimento autoadensável (SCAA) consiste na mistura de solo, cimento, água e aditivo químico superplastificante, podendo conter fibras ou outras adições minerais. De acordo com Berté e Alcântara (2013), tal material deve ter sua consistência fluida a fim de se moldar sem a necessidade de adensamento mecânico (vibração, prensagem ou compactação) e não deve apresentar segregação ou exsudação na mistura para correta aplicação e desempenho em elementos construtivos.

Alguns pesquisadores estudaram as características físico-mecânicas do SCAA para a execução de paredes monolíticas. Milani e Barboza (2016) obtiveram potencialidade de aplicação do SCAA na dosagem de 1:8 (cimento: solo arenoso, em massa) com 0,8% aditivo superplastificante e relação água/cimento igual a 2, alcançando uma média de resistência à compressão simples aos 7 dias de 1,7 MPa e capacidade de absorção de água máxima de 18%. Para Ouellet-Plamondon e Habert (2016) o teor de aditivo superplastificante entre 0,5% e 2,0% e o cimento de sulfoaluminato de cálcio para estabilização de um solo cuja composição foi 55% de finos (silte + argila) e 45% de areia, refletiram em bons resultados de autoadensabilidade no estado fresco do SCAA, como também o alcance de resistência axial variando de 1,5 a 6,0 MPa.

Já Simioni *et al.* (2020) analisaram a influência da incorporação de areia de reciclagem de resíduos de construção civil (RCC) nas misturas de SCAA, sendo o traço de 70% de latossolo vermelho + 30% de areia reciclada estabilizado com 20% de cimento e adicionado 27% de água e 1,2% de aditivo químico recomendado como a mistura com melhor homogeneidade e maior espalhamento visual sem segregação e/ou exsudação. Ainda estes autores obtiveram o teor de ar incorporado próximo a 17%; capacidade de absorção de água igual a 18,6%; índice de vazios de 24,4% e resistência mecânica aos 7 dias igual a 2,8 MPa, assim atendendo os requisitos mínimos exigidos para paredes monolíticas de solo-cimento compactado no Brasil.

Ressalta-se uma variabilidade nos resultados obtidos nesses estudos, o que se explica primeiramente pela influência do teor de argila nas propriedades do SCAA, pois segundo Helson *et al.* (2017) quanto maior a quantidade de argila, mais elevada a área superficial específica e, consequentemente, o aumento da quantidade de água para obter uma mesma consistência da mistura. Ainda observaram que características como a densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico desses compósitos diminuíram com o aumento do teor de argila.

Para Milani e Silva (2019) o alcance do autoadensamento do sistema solo-cimento está intimamente ligado aos limites de consistência do solo, visto que a redução da água dentro do SCAA será limitada pela quantidade de argilominerais presentes no solo, ou seja, pelo limite de liquidez do solo. No entanto, o uso de superplastificante no SCAA contribui na dispersão das partículas no estado fresco da mistura e na interação físico-química entre estabilizante e aditivo no processo inicial de hidratação do cimento, o que melhora o efeito fluidificante e a estabilidade diante a segregação ou a exsudação do sistema.

Diante das constatações que a morfologia e a composição granulométrica do solo; e a relação água e aditivo são fatores que influenciam diretamente nas características do SCAA, a proposta do estudo dirigido de dosagem é determinante para que se tenha um bom desempenho do produto final.

Dessa forma, faz-se necessário o estabelecimento das correlações entre os fatores tipo de solo, teor de cimento, de água e de aditivo, e as suas propriedades físico-mecânicas para previsibilidade do comportamento do SCAA; e assim alcançar o objetivo do presente estudo em propor um método de dosagem experimental do SCAA para atender a aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram empregados dois tipos de solos de classe textural distinta, ambos extraídos de jazidas da cidade de Campo Grande - Brasil. O solo arenoso foi classificado como A-2-4 segundo critérios da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), distribuição granulométrica de 83% de areia e 17% de finos (argila + silte), não líquido (NL) e não plástico (NP). Já o solo argiloso foi classificado como A-7-5, e distribuição granulométrica de 14% de areia e 86% de finos (argila + silte), limite de liquidez 45,54%, limite de plasticidade 30,73% e índice de plasticidade 14,81.

Foi utilizado cimento CP V ARI – alta resistência inicial – da marca Cauê. A escolha foi feita para garantir que quando o SCAA for usado na execução de paredes monolíticas, alcance resistência adequada para a desforma com máximo 2 dias. Além disso, o cimento CP V ARI não contém adições (máximo 5% de material carbonático), assim mitigando a ocorrência de interferências nas reações de interação química cimento-argilominerais-superplastificante.

O aditivo químico utilizado foi o MasterGlenium ACE 400 do fabricante BASF S.A, cuja composição química é a base de policarboxilato. Este superplastificante foi adotado por atuar como dispersante do material aglomerante, possibilitando a redução da água incorporada. Já a água utilizada foi de abastecimento urbano.

2.2 ESTUDO DE DOSAGEM

Considerando adaptar os existentes métodos experimentais de dosagem da ABCP (1986) do solo-cimento compactado, e de Tutikian (2007) e Domone (2009) do concreto autoadensável, foi realizado estudo de dosagem com diferentes solos tropicais por meio de ensaios físicos-mecânicos aplicados em ampla gama de misturas de solo+cimento+água+superplastificante.

Para a composição das diferentes misturas de SCAA, foram utilizados quatro teores de cimento para cada tipo de solo baseado nos resultados de Alcântara *et al.* (2017), Carsana e Bertolini (2012); pois com o teor inicial de 12,5% de cimento (em massa de solo) foi alcançada a resistência mínima de 1,0 MPa aos 7 dias exigida para paredes monolíticas. Os demais teores foram de 16,6%; 20% e 25%; sendo que acima de 30% de cimento adicionado ao solo passa a comprometer a sustentabilidade ambiental e econômica do produto final.

Quanto a adição de água na mistura, foi definida de acordo com o método para determinação da autoadensabilidade do SCAA proposto por Milani e Ferreira (2022), de modo que o valor de abertura de espalhamento das misturas no ensaio de *Slump Flow* estivesse compreendido entre 320 e 460 mm. Dessa forma, para misturas de SCAA com solo arenoso, as porcentagens de água adicionadas foram de 27% e 28% e para o solo argiloso de 47% e 48%; valores próximos ao limite de liquidez de cada solo. Já para o aditivo químico foram assumidas as dosagens de 0,8% e 1,2% de superplastificante em relação à massa de cimento.

Após a definição da carta dos traços composta por 32 misturas de SCAA (Quadro 1) foi realizada a caracterização no estado fresco por meio da adaptação do ensaio *Slump Flow* aplicado no concreto autoadensável, a qual consistiu em colocar a placa-base (dimensões 500mm x 500mm) em superfície plana, acima dela posicionar o cone de Abrams adaptado para as dimensões de diâmetro menor=50mm, diâmetro maior=100mm e altura=150mm e preenchê-lo com o SCAA de forma contínua e uniforme, sem adensamento. A abertura de espalhamento foi a média de duas medidas perpendiculares entre si do diâmetro de espalhamento (Figura 1). Este ensaio foi realizado sempre que

finalizado o processo de mistura de um traço de SCAA para verificar a fluidez do material final e se este parâmetro se encontrava dentro do limite de autoadensabilidade adotado.

Figura 1 - Execução do ensaio de *Slump Flow*

Quadro 1 – Carta de traços das misturas de SCAA

Solo arenoso	***Are 1 (1:8)**	**Are 2 (1:8)**	**Are 3 (1:8)**	**Are 4 (1:8)**	**Are 5 (1:6)**	**Are 6 (1:6)**	**Are 7 (1:6)**	**Are 8 (1:6)**	**Are 9 (1:5)**	**Are 10 (1:5)**	**Are 11 (1:5)**	**Are 12 (1:5)**	**Are 13 (1:4)**	**Are 14 (1:4)**	**Are 15 (1:4)**	**Are 16 (1:4)**
Teor de cimento (%)	12,5	12,5	12,5	12,5	16,6	16,6	16,6	16,6	20,0	20,0	20,0	20,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Teor de água (%)	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0	27,0	28,0
Teor de aditivo químico (%)	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2
***Slump* (mm)**	320	325	340	345	350	360	365	375	360	380	395	415	360	380	395	410
Solo argiloso	**Arg 1 (1:8)**	**Arg 2 (1:8)**	**Arg 3 (1:8)**	**Arg 4 (1:8)**	**Arg 5 (1:6)**	**Arg 6 (1:6)**	**Arg 7 (1:6)**	**Arg 8 (1:6)**	**Arg 9 (1:5)**	**Arg 10 (1:5)**	**Arg 11 (1:5)**	**Arg 12 (1:5)**	**Arg 13 (1:4)**	**Arg 14 (1:4)**	**Arg 15 (1:4)**	**Arg 16 (1:4)**
Teor de cimento (%)	12,5	12,5	12,5	12,5	16,6	16,6	16,6	16,6	20,0	20,0	20,0	20,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Teor de água (%)	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0	47,0	48,0
Teor de aditivo químico (%)	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2
***Slump* (mm)**	350	360	375	390	370	375	380	400	360	365	375	385	340	360	390	405

*Traço 1:x (cimento:solo, em massa)

Já a caraterização no estado endurecido, para cada mistura de SCAA, tipo de ensaio e idade foram moldados 3 corpos de prova com dimensões iguais a 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O ensaio físico aplicado foi de capacidade de absorção de água conforme procedimentos da NBR 13555 (ABNT, 2012d), nas idades de 7 e 28 dias. O ensaio mecânico de compressão simples seguiu as diretrizes da

NBR 12025 (ABNT, 2012b) nas idades de 7 e 28 dias para analisar o ganho de resistência do SCAA ao longo do tempo. Estes ensaios foram selecionados devido a representatividade de parâmetros para aplicação em elementos construtivos de solo-cimento compactado contido na NBR 13553 (2012c) e NBR 8491 (2012a).

Diante dos resultados destes ensaios, foi realizada análise estatística por ANOVA, a qual foi construído com as variáveis independentes cimento, água e aditivo e incluíram apenas os efeitos isolados desses fatores no SCAA. Testes ANOVA estatisticamente significativos foram seguidos pelo teste *post-hoc* de Tukey para investigar quais grupos apresentavam médias que diferiam estatisticamente entre si, verificando o valor p. Foi calculado o tamanho de efeito ômega-quadrado (ω^2), que pode ser classificado como: pequeno ($\omega2 \geq 0,01$), médio ($\omega2 \geq 0,06$) ou grande ($\omega2 > 0,14$) (Field, 2013). Todas as análises foram conduzidas no *software R* versão 4.1.0 e consideraram um nível de significância (α) de 5%.

Com a carta de traços de SCAA caracterizada e definidas as variáveis de dosagem que mais influenciaram estatisticamente em cada ensaio, foram determinadas as linhas de tendência, que correlacionaram as propriedades das misturas no estado fresco e no estado endurecido (abertura de espalhamento, resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água) com suas variáveis de dosagem (cimento, água e aditivo).

Assim, o conhecimento adquirido sobre o comportamento do SCAA e a inferência estatística das variáveis solo, cimento, água e aditivo nas propriedades físico-mecânicas do SCAA foram utilizados para elaborar o fluxograma de metodologia de dosagem do SCAA, de forma a estabelecer limites e critérios do sistema SCAA e direcionar as etapas da proposta metodológica de dosagem na otimização da composição do produto final para aplicação em paredes monolíticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SCAA

Para o estado fresco do SCAA, nota-se no Quadro 1 que tanto para as misturas com solo arenoso, quanto com solo argiloso, o teor de água e o teor de aditivo influenciam a abertura de espalhamento do SCAA. Isto é, amostras com teores maiores de água e de aditivo apresentam médias estatisticamente superiores às amostras com teores menores de água e aditivo. Contudo, a ANOVA mostrou que o superplastificante exerce mais influência no ensaio de *Slump flow* do que a água. Isto ocorreu porque a incorporação de maior quantidade de aditivo proporcionou melhor dispersão do cimento, e o melhoramento da floculação e mobilidade da mistura.

O aditivo à base de policarboxilato atua nas partículas de cimento por mecanismos de repulsão eletrostática e estérica, onde as moléculas do superplastificante adsorvem nas superfícies das partículas de cimento, e devido às longas cadeias laterais das moléculas do policarboxilato, impedem a aproximação das suas partículas (PUERTAS et al., 2005; HARTMANN e HELENE, 2003). Assim, a ação do aditivo nas partículas de cimento é muito mais eficiente do que a ação da água, que apenas acarreta a dispersão eletrostática. Por isso, a quantidade de aditivo exerce maior influência na trabalhabilidade do SCAA do que a quantidade de água. Contudo, é importante ressaltar que há limites para os teores de água e aditivo, pois ambos em excesso podem acarretar em segregação do material.

O Quadro 1 também mostra que as misturas de SCAA com solo arenoso e argiloso não tiveram o mesmo comportamento nos valores de abertura de espalhamento frente à influência do teor de cimento. Para o solo arenoso, o cimento é o fator mais relevante no ensaio de *Slump flow*, isto é, a

influência do teor de cimento supera as variáveis água e aditivo. Para o solo argiloso, não há efeito do cimento sobre o espalhamento do SCAA, pois o valor $\omega^2 \geq 0{,}01$ indica um efeito irrelevante e o teste de Tukey confirma que as médias de espalhamento em relação ao cimento são estatisticamente iguais.

Este fenômeno deve-se pelo fato que o SCAA com solo argiloso por conter maior quantidade de silte+argila requer mais água para obter a mesma fluidez do SCAA com solo arenoso, o que acarreta na maior ocorrência da redução da tensão de superfície da água pelo aditivo, e consequente dispersão das partículas sólidas do solo argiloso, do que as reações de adsorção do superplastificante pelo cimento (Plank e Hirsch, 2007; Rojas e Cincotto, 2013).

Quadro 2 – Resultados do ensaio de absorção de água das misturas de SCAA

Amostra - Solo Arenoso		**Are 1**	**Are 2**	**Are 3**	**Are 4**	**Are 5**	**Are 6**	**Are 7**	**Are 8**	**Are 9**	**Are 10**	**Are 11**	**Are 12**	**Are 13**	**Are 14**	**Are 15**	**Are 16**
7 dias (%)	Média	23,4	21,1	21,0	20,9	22,8	22,6	22,7	22,6	22,2	20,7	20,6	19,9	20,5	20,1	20,5	20,4
	DP*	0,23	0,63	0,00	0,03	0,48	0,38	0,21	0,83	1,22	0,67	0,32	0,32	1,00	0,03	0,46	0,65
28 dias (%)	Média	21,9	19,7	20,9	20,7	20,6	19,9	20,4	19,9	19,7	19,7	19,8	19,2	20,4	19,7	19,6	19,4
	DP	0,59	0,23	1,05	0,3	0,08	0,38	0,49	0,54	0,51	0,84	0,03	1	0,33	0,09	0,14	0,28
Amostra - Solo Argiloso		**Arg 1**	**Arg 2**	**Arg 3**	**Arg 4**	**Arg 5**	**Arg 6**	**Arg 7**	**Arg 8**	**Arg 9**	**Arg 10**	**Arg 11**	**Arg 12**	**Arg 13**	**Arg 14**	**Arg 15**	**Arg 16**
7 dias (%)	Média	42,4	40,9	44,6	40,8	44,0	42,9	51,9	51,1	52,9	52,7	51,9	50,9	52,7	50,0	48,2	43,8
	DP	0,11	0,40	0,95	0,13	0,01	1,74	0,48	0,01	0,19	0,16	0,88	0,16	0,25	0,08	0,46	0,39
28 dias (%)	Média	44,9	44,7	45,8	42,5	46,9	42,2	44,5	55,5	39,9	41,4	40,0	40,9	38,6	38,9	44,5	42,7
	DP	0,98	1,21	0,78	1,11	0,16	0,52	0,07	0,46	0,24	0,28	0,28	0,15	0,04	0,07	0,64	0,39

* DP =Desvio Padrão (%)

Quadro 3 – Resultados do ensaio de compressão simples das misturas de SCAA

Amostra - Solo arenoso		**Are 1**	**Are 2**	**Are 3**	**Are 4**	**Are 5**	**Are 6**	**Are 7**	**Are 8**	**Are 9**	**Are 10**	**Are 11**	**Are 12**	**Are 13**	**Are 14**	**Are 15**	**Are 16**
7 dias	Média (MPa)	1,84	1,54	1,55	1,29	3,20	2,79	2,49	2,00	3,49	3,25	3,23	2,99	5,29	4,26	3,91	3,18
	DP	0,01	0,03	0,11	0,16	0,25	0,05	0,24	0,88	0,66	0,26	0,33	0,20	0,23	0,02	0,45	0,31
28 dias	Média (MPa)	2,78	2,05	3,18	2,88	3,92	3,70	4,32	3,20	5,41	4,59	5,47	4,70	7,58	6,15	8,84	8,19
	DP	0,09	0,01	0,21	0,15	0,11	0,19	0,02	0,08	0,30	0,30	0,33	0,64	0,31	0,27	1,17	0,45
Amostra - Solo argiloso		**Arg 1**	**Arg 2**	**Arg 3**	**Arg 4**	**Arg 5**	**Arg 6**	**Arg 7**	**Arg 8**	**Arg 9**	**Arg 10**	**Arg 11**	**Arg 12**	**Arg 13**	**Arg 14**	**Arg 15**	**Arg 16**
7 dias	Média (MPa)	0,66	0,62	0,61	0,48	1,22	1,02	0,83	0,73	1,37	1,33	1,29	1,28	1,48	1,41	1,38	1,36
	DP	0,03	0,04	0,02	0,08	0,04	0,05	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,08	0,23	0,23	0,10	0,12
28 dias	Média (MPa)	1,02	0,86	1,10	0,87	1,89	1,15	1,32	0,99	1,51	1,42	1,78	1,59	3,04	2,33	3,36	3,07
	DP	0,09	0,07	0,07	0,08	0,31	0,03	0,12	0,08	0,19	0,1	0,14	0,08	0,48	0,25	0,35	0,15

* DP =Desvio Padrão (MPa)

Em relação ao comportamento do SCAA no estado endurecido, o Quadro 2 mostra que para as misturas com solo arenoso, as três variáveis avaliadas influenciam nos resultados de capacidade de absorção de água aos 7 e 28 dias, sendo o cimento o que exerce maior influência, seguido da água e do aditivo. Tanto quanto maior for a concentração cimentícia, as médias de capacidade de absorção de água são estatisticamente inferiores às amostras com menores teores de cimento.

Para o SCAA com solo argiloso aos 7 dias, os traços apresentam médias de absorção de água estatisticamente superiores nas misturas com mais cimento. Nas primeiras idades do solo estabilizado, enquanto acontece as reações iniciais de hidratação do cimento, ainda está ocorrendo a instabilidade volumétrica dos argilominerais presentes no solo, expandindo-se na presença de água conforme a capacidade de trocas iônicas entre os íons adsorvidos. Logo, quanto maior presença de finos do solo argiloso, maior dificuldade de estabilização e promissora reações pozolânicas ao longo do tempo (Bahmani *et al.* 2014).

Destaca-se que a diminuição na capacidade de absorção de água aos 28 dias com o aumento do consumo de cimento é válida para os dois tipos de solo, mas ao analisar os valores médios alcançados de absorção de água do SCAA com solo argiloso, estes foram significativamente maiores em relação ao SCAA com solo arenoso. Este desempenho físico decorre porque as partículas finas do solo argiloso apresentam o formato lamelar ou alongada, o alto grau de plasticidade e a atividade química, dificultando a estabilização deste tipo de solo. Já partículas de quartzo, devido ao seu formato ser arredondado, interagem melhor com a pasta cimentícia, preenchendo os vazios da mistura e unindo as partículas de areia adjacentes do solo arenoso (Coelho *et al.,* 2007; Williamson e Cortes, 2014).

Quanto ao ensaio de compressão simples, para ambos os tipos de solo e independente da idade, as amostras de SCAA com concentrações maiores de cimento apresentam médias de resistência à compressão axial estatisticamente superiores às amostras com concentrações menores (Quadro 3). Já amostras de SCAA com maior teor de água e de aditivo apresentam médias de resistência à compressão estatisticamente inferiores. Também se evidencia que o cimento é o componente que exerce maior influência sobre esse ensaio, seguido do teor de aditivo para 7 dias, e do teor de água para 28 dias.

Sobre a água e o aditivo é importante ressaltar que o aumento dos teores desses componentes nas misturas de SCAA resulta em uma matriz cimentícea mais fluida no estado fresco, mas com características físico-mecânicas afetadas no estado endurecido. Isto é, o aumento desses componentes faz aumentar o espalhamento e diminuir a resistência à compressão axial. Segundo Ferrari *et al.* (2010) descrevem que nas pastas cimentícias aditivadas existem regiões onde o superplastificante depositado são compostas principalmente por potássio e enxofre, observando que o superplastificante interage com estas espécies iónicas em solução. A forte interação entre superplastificante e sulfato reduz a quantidade real de íons disponíveis na solução dos poros da pasta cimentícia, retardando a formação inicial de etringita nas primeiras idades. De forma análoga, o SCAA com o maior teor de aditivo pode ter apresentado maior interação química na mistura, diminuindo os produtos das reações de hidratação do cimento na fase inicial do SCAA no estado endurecido.

Ainda sobre a influencia da água e do aditivo no comportamento mecânico do SCAA, há o efeito do superplastificante sobre a resistência a compressão aos 28 dias em misturas com solo arenoso, sendo que quanto maior o teor de aditivo, maior a resistência a compressão; no entanto este comportamento não foi identificado para o SCAA com solo argiloso. Isto pode ser explicado por Milani e Silva (2019), na qual constataram que a interação físico-química entre os argilominerais presentes no solo e o superplastificante não influencia na microestrutura final do SCAA. Ou seja, as reações químicas entre

os íons de Ca2+ da hidratação do cimento e os carboxilatos do aditivo são mais significativas no processo de estabilização do SCAA ao longo do tempo.

Ressalta-se que, independente do tipo de solo, há um aumento significativo de resistência mecânica do SCAA ao longo do tempo. Isso porque as reações de hidratação do cimento continuam, bem como possíveis reações pozolânicas advindas da dissolução de sílica e alumina presente no argilomineral; o que reduz o volume de poros pelo preenchimento por silicatos e aluminatos hidratados, e por consequência o aumento da resistência axial. Porém, o desempenho mecânico do SCAA com solo arenoso é mais relevante que o SCAA com solo argiloso, corroborando a maior potencialidade de estabilização química-mecânica dos solos de característica granular.

3.2 CORRELAÇÕES DAS PROPRIEDADES DO SCAA

A análise estatística mostrou que, independente do tipo de solo, os fatores que mais influenciam nas características físico-mecânicas do SCAA são o cimento e a água. Portanto, foram geradas linhas de tendência e o coeficiente de determinação R^2, correlacionando esses componentes de dosagem com as propriedades resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água. O teste de normalidade mostrou resultado positivo nas equações com a variável dependente resistência mecânica e servem sobretudo como parâmetro de tendência do comportamento mecânico e previsibilidade de confiança baseadas na suposição de normalidade.

Foi encontrado forte correlação entre os fatores cimento e a resistência à compressão (R^2 na faixa de 0,7258 – 0,8873), sendo que para os menores teores de cimento adicionados no SCAA, o ganho de resistência de 7 para 28 dias é irrelevante em ambos os solos. Contudo, para teores a partir 20% de cimento como estabilizante; os ganhos de resistência mecânica com o decorrer do tempo passam a ser mais significativos, principalmente para o SCAA com solo arenoso.

Isso corrobora os estudos em torno das dosagens das misturas e adições no SCAA, pois para alcançar desempenho físico-mecânico compatível para aplicação como material de construção convencional é necessário o consumo mais elevado de cimento em comparação aos sistemas construtivos que usam o solo-cimento compactado. Segundo Milani e Silva (2019) mesmo que a adição do aditivo consiga diminuir a água do sistema para a mistura de SCAA alcançar boa fluidez sem segregação, para a ocorrência de cisalhamento entre as partículas de solo tem-se o limite mínimo de água necessário para a fluidificação dos siltes e das argilas; e esse limite encontra-se dentro dos conceitos de limite de liquidez do solo (LL), sendo o LL a água necessária para que o material fino do solo se comporte como líquido viscoso. A partir deste comportamento, entende-se que o SCAA tem a maior demanda de estabilizante cimentício para compensar as perdas da falta de estabilização mecânica por compactação e pela influência negativa da alta quantidade de água para atingir a autoadensabilidade do SCAA.

No entanto, verificou-se fraca correlação entre os fatores cimento, água e a capacidade de absorção de água (R^2 na faixa de 0,0815 – 0,3532), ou seja, o alto consumo de cimento e o baixo teor de água no SCAA não garante o alcance de valores de absorção de água apropriados para uso como elemento construtivo. Isto indica a importância de realização deste ensaio físico em um estudo de dosagem do SCAA, assim assegurando adequabilidade do arranjo granulométrico do solo para o desempenho do material final frente a exposição as intempéries ou presença da água no ambiente construído.

Desta forma, as correlações encontradas mostraram a significância da construção experimental do diagrama de dosagem do SCAA para a estimação do seu desempenho mecânico por meio da definição da relação cimento/solo.

3.3 PROPOSTA DO MÉTODO DE DOSAGEM DO SCAA

O conhecimento adquirido sobre o comportamento do SCAA permitiu construir o fluxograma da proposta preliminar de metodologia de dosagem do SCAA, conforme mostra a Figura 2.

A elaboração deste método de dosagem experimental partiu do princípio que a mistura de SCAA será aplicada na execução de paredes monolíticas, sendo necessário alcançar os requisitos elencados na Etapa A da Figura 2 para obter adequada adensabilidade no estado fresco e desempenho mínimo para vedação de uma edificação.

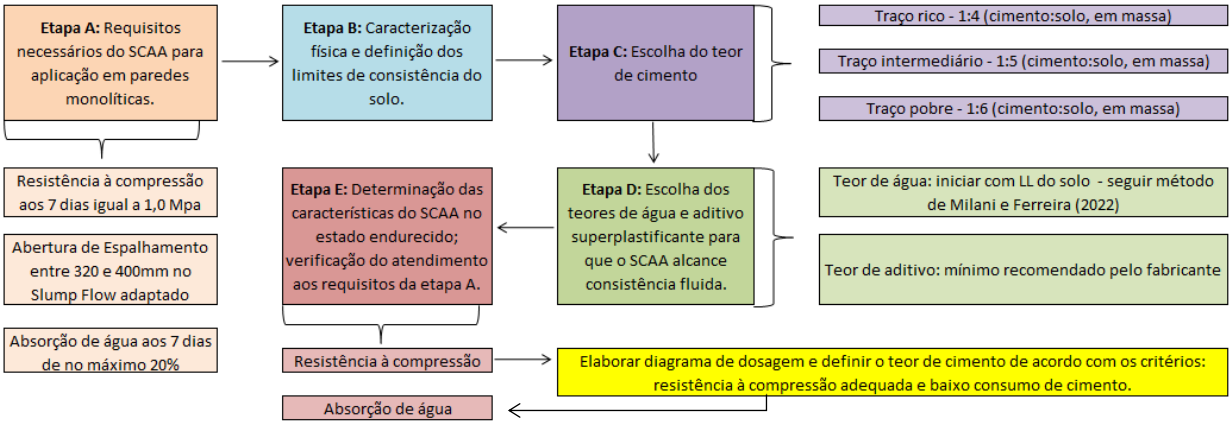


Figura 2 - Método de dosagem experimental do SCAA

Na Etapa C da Figura 2 era necessário estabelecer o intervalo entre as dosagens para definição dos traços rico, intermediário e pobre. Dada a inviabilidade do uso de baixo consumo de cimento no SCAA para aplicação em paredes monolíticas, restaram os traços 1:6, 1:5 e 1:4 (cimento:solo, em massa), os quais foram adotados, respectivamente, como traço pobre, traço intermediário e traço rico, sendo o ponto de partida para a dosagem de cimento na proposta metodológica. Ressalta-se que maiores teores de cimento (acima de 25%), o SCAA torna-se impraticável sob o aspecto ambiental.

Na etapa D da Figura 2 era necessário estabelecer limites mínimos das relações água:solo, água:cimento, e cimento:aditivo para obter abertura de espalhamento entre 320 e 460 mm do SCAA. Foi constatado que os fatores água e aditivo, quando comparados ao cimento, pouco influenciam nas características físico-mecânicas do SCAA. Assim, a relação água:cimento não precisa de especificação, bem como o teor de aditivo a ser utilizado na dosagem inicial pode ser o mínimo recomendado pelo fabricante. Já para a relação água:solo deve ser mantida a metodologia de Milani e Ferreira (2022), a qual usa o Limite de Liquidez do solo como entrada para a determinação da quantidade de água na dosagem inicial.

Na etapa E da Figura 2 era necessário estabelecer quais ensaios são necessários para corroborar o estudo de dosagem do SCAA. Foi visto que, por mais que os traços tenham alcançado os requisitos mínimos no que diz respeito à abertura de espalhamento e resistência à compressão, a capacidade de absorção de água com valor máximo de 20% exigido pela NBR 13553 (2012) não foi garantida para o solo argiloso, mesmo havendo melhora nos valores de absorção de 7 para 28 dias. Por isso, o ensaio de capacidade de absorção de água aos 7 dias com valor máximo de 20% deve ser considerado no estudo de dosagem, pois este parâmetro esta diretamente ligado à durabilidade do material final.

Diante do exposto, a proposta do método experimental de dosagem do SCAA se resume em:

- caracterizar fisicamente o solo para encontrar o Limite de Liquidez e consequente adotar como o teor de água inicial para atingir a autoadensabilidade; definir dosagem de cimento considerando traços rico, intermediário e pobre; e incorporar aditivo superplastificante em teor mínimo indicado pelo fabricante;
- após definições dos teores desses materiais, eles devem ser preparados a fim de garantir uma correta homogeneização do SCAA, sendo o processo adequado de mistura dos componentes do SCAA o uso de misturador mecânico - primeiro os materiais secos (solo e cimento) por 30 segundos. Em seguida adicionar aos poucos, porém ininterruptamente, cerca de 80% da água total estabelecida para o traço. Assim, a mistura seca passará rapidamente para a fase plástica, evitando a formação de torrões e o travamento do misturador. Posterior, acrescentar o aditivo e o restante da água e misturar por mais 30 segundos;
- com o processo de mistura estabelecido, para a caracterização do SCAA no estado fresco, deve ser realizado o ensaio de *Slump Flow* assim que o processo de mistura for concluído. Na sequência, deve-se realizar a moldagem de corpos de prova representativos do SCAA para aplicação dos ensaios de caracterização no estado endurecido;
- a partir dos resultados experimentais do ensaio de compressão simples, elabora-se o diagrama de dosagem, a qual correlaciona matematicamente o teor de cimento e a resistência à compressão simples na idade experimentada. Por sua vez, esta equação permite estimar a resistência mecânica do SCAA variando a porcentagem de cimento incorporada na mistura. Assim, fica viabilizado o ajuste do traço de SCAA para que alcance a resistência desejada no projeto com o menor consumo de cimento possível;
- de forma análoga a etapa anterior, realizar a mistura e a moldagem de corpos de prova do SCAA, porém com o teor de cimento escolhido no diagrama de dosagem experimental e o teor de água inicial adotado. Aplicar o ensaio de absorção de água aos 7 dias, tendo como requisito a absorção máxima de 20%. Caso não esteja dentro deste limite, pode-se ajustar o traço, aumentando o teor de aditivo e diminuindo a quantidade de água, sem perder a fluidez adequada da mistura de SCAA no estado fresco, ou seja, considerar a abertura de espalhamento entre 320 a 460 mm no ensaio de *Slump Flow*.

4 CONCLUSÃO

A compreensão do comportamento do solo-cimento autoadensável (SCAA) foi importante para a definição dos parâmetros de relevância no processo de estudo de dosagem. No estado fresco das misturas de SCAA, o teor de água e o teor de aditivo químico interferem na fluidez do SCAA para ambos os tipos de solo. No entanto, o cimento exerce maior influência sobre o solo arenoso, corroborando que nos solos granulares ocorrem com mais eficiência os mecanismos de repulsão eletrostática e estérica provocados pela ação do aditivo químico tanto quanto maior o teor de cimento na mistura.

O cimento continua sendo o fator que exerceu maior influência no sistema SCAA no estado endurecido, proporcionando aumento significativo de resistência mecânica ao longo do tempo, principalmente pelo SCAA com solo arenoso, na qual apresentou melhor desempenho mecânico frente ao SCAA com solo argiloso, ratificando a eficiência da estabilização de solos tropicais arenosos (granulares) por matrizes cimentícias.

As características das misturas de SCAA mantiveram semelhante comportamento físico-mecânico, porém com alcance de desempenho distinto, o que reforça a necessidade do agrupamento dos solos por tipo de classificação granular e índices físicos para proposição da % de água na dosagem do SCAA.

Independente do tipo de solo e da idade, foi comprovada a significância da correlação entre a adição de cimento no SCAA e a resistência à compressão simples, o que possibilitou a previsão do seu comportamento. Assim, a construção experimental do diagrama de dosagem relacionando cimento e resistência é uma ferramenta essencial na composição do SCAA, já que otimiza o teor de cimento para alcance de características físico-mecânicas desejadas.

Vale salientar que solos caracterizados como argilosos pela considerável presença de partículas finas necessitam de elevada quantidade de água para ocorrência da fluidez da mistura, e mesmo tratados com relevantes teores de aditivo químico e de cimento, ainda são insuficientes para a estabilização do SCAA com solo argiloso, o que torna limitante o uso deste tipo solo para a prática na construção civil sob os aspectos de baixa resistência à compressão simples com alta capacidade de absorção de água.

Foi possível propor um método de estudo de dosagem experimental do SCAA para atender a aplicação no sistema construtivo de parede monolítica de edificações, sendo destacado o potencial do solo arenoso nas misturas de SCAA, alcançando aos 7 dias de idade os limites de resistência axial mínima de 1 MPa e de absorção de água máxima de 20%. Como recomendações para trabalhos futuros deve-se ajustar a dosagem com relação ao teor de água:aditivo químico para melhoramento do desempenho físico do SCAA, como também verificar critérios de desempenho para outros elementos construtivos a fim de complementar ou expandir esta proposta de dosagem experimental do SCAA.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Cimento Portland – ABCP. (1986). ET-35: Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, 51p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2012a). NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2012b). NBR 12025: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2012c). NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2012d). NBR 13555: Solo-cimento — Determinação da absorção de água – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

Bahmani, S. H.; Huat, B. B. K.; Asadi, A.; Farzadnia, N. (2014). Stabilization of residual soil using SIO2 nanoparticles and cement. Construction and Building Materials, v. 64, p. 350–359. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086

Berté, S. D. D.; Alcantara, M. A. M. (2013). Estudo do Comportamento do solo-cimento autoadensável. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 7, n. 2, p. 37-52. https://doi.org/10.5216/reec.v7i2.24560

Carsana, M.; Bertolini, L. (2012). Fluidized soil– cement mixes for backfilling of flooded cavities. Materials and Structures, Rilem, v. 45, n. 1-2, p. 53-65. http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9748-3

Coelho, A. C; Santos, P S.; Santos H. S. (2007). Special clays: what they are, characterization and properties. Química Nova, v.30, n.1, p. 146-152, 2007.

Domone, P. (2009). Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method.

Ferrari, L.; Kaufmann, J.; Winnefeld, F.; Plank, J. (2010). Interaction of Cement Model Systems with Superplasticizers Investigated by Atomic Force Microscopy, Zeta Potential, and Adsorption Measurements. J. Colloid Interface Sci., 347, 15–24. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.03.005

Field, A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS statistics. Thousand Oaks, CA: Sage.

Hartmann, C. T., Helene, P. R. L. (2003). Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland. Boletim Técnico da EPUSP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo-SP. 22 p.

Helson, O.; Beaucour, A.; Eslami, J.; Noumowe, A.; Gotteland, P. (2017). Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures: Soil clay content and formulation parameters. Construction and Building Materials, v. 131, p. 775-783. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.021

Milani, A. P. S.; Barboza, C. S. (2016). Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas. Ambiente Construído, v. 16, p. 143-153. https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000400110

Milani, A. P. S.; Ferreira, A. P. F. (2022). Criteria to assess the flow of cement-stabilised self-compacting earth. Acta Scientiarum. Technology, v.44, p.e58796-e58796. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v44i1.58796

Milani, A. P. S.; Silva, C. I. (2019). Influence of superplasticiser on cement-stabilised selfcompacting Earth. Ground Improvement, v. 172, p. 85-95. https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00025

Ouellet-Plamondon, C. M.; Habert, G. (2016). Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept. Journal of Cleaner Production, v. 117, p. 160-168. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.048

Plank, J.; Hirsch, C. (2007). Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. Cement and Concrete Research., v.37, p.537–542. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.007

Puertas, F.; Santos, H.; Palacios, M.; Martinez-Ramirez, S. (2005). Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. Advances in Cement Research, v. 17, n. 2, p. 77-89. https://doi.org/10.1680/adcr.2005.17.2.77

Rojas, C. M.; Cincotto, M. (2013). Influence of polycarboxylate molecular structure on Portland cement hydration. Ambiente Construído, v. 13(3), p. 267-283. https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000300016

Simioni, F. C.; Callejas, I. J. A.; Durante, L. C.; Souza, B. G. de. (2020). Solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduos de construção civil para aplicação em sistema de vedação vertical. Ambiente Construído, v. 20(4), p. 281–296. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400472

Tutikian, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Williamson, S.; Cortes, D. D. (2014). Dimensional analysis of soil–cement mixture performance. Géotechnique Letters, v. 4, p. 33–38. https://doi.org/10.1680/geolett.13.00082

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA NANODUREZA EM MISTURAS 3DCP NA ZONA INTERFACIAL DE CAMADAS IMPRESSAS

Marcos Alyssandro Soares dos Anjos[a,b], Fernanda Karolline de Medeiros[b,c], Eduardo da Cruz Teixeira[a], Leonardo de Souza Dias[b], José Vinícius Rodrigues Maia[a], Emanuel Pereira do Nascimento[c]

a Federal Institute of Paraiba – IFPB, Avenida Primeiro de Maio, 720. Paraíba, Brazil. CEP: 58015-435

b Federal University of Paraiba – PPGECAM e PPCEM - UFPB, Cidade Universitária, João Pessoa, Brazil. 58051-900

c Federal University of Campina Grande – UFCG, Rua Jairo Vieira Feitosa, nº 1770 Paraíba, Brazil. CEP: 58840-000nan

RESUMO

A interface entre camadas depositadas em misturas 3D *concrete printing* (3DCP) surge como uma zona de transição que tem características diferentes da matriz de argamassa. O presente trabalho visa contribuir com a análise da ligação interfacial entre camadas impressas através da análise de nanodureza em diferentes alturas de deposição de camadas. Para tanto foram impressas peças utilizando a impressora 3DCP, que imprime de forma automatizada nos três eixos. Em seguida foi analisada a aderência entre camadas impressas a nível macroestrutural, além de uma avalição da nanodureza da zona interfacial, comparando com a nanodureza da zona interfacial entre camadas com a nanodureza da matriz em diferentes alturas de impressão. Os resultados demostram que a altura de impressão e o tipo de matriz cimentícia são fundamentais para caracterização da aderência entre camadas e que a nanodureza e módulo de elasticidade da zona interfacial *interlayer* é maior nas camadas inferiores e com maiores teores de cimento. Porém destaca-se a necessidade de avaliar estas zonas *interlayers* tão resistentes, com altos módulos de elasticidade, com altos teores de cimento, uma vez que matrizes com menores teores de cimento podem ter comportamento semelhante e adequado a maioria dos usos pretendido, que são as alvenarias.

Palavras-chave: 3DCP, nanodureza, misturas ternárias, filer calcário, metacaulim.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, vem ganhando espaço e se tornando uma ferramenta intensificadora nos avanços da automação da indústria da construção civil. Essa tecnologia está baseada na junção de materiais para o desenvolvimento de uma estrutura tridimensional a partir de um modelo digital projetado. Especialmente na construção civil, existem diversas vantagens que favorecem a aplicação da impressão 3D com concreto (3DCP) tais como: o aumento da complexidade arquitetônica que o sistema proporciona, redução de custos, entre eles os relacionados ao uso de fôrmas e do tempo de produção; condições ligadas à segurança dos trabalhadores; além de fatores de sustentabilidade como a diminuição de desperdícios (De Schutter *et al*. 2018; He *et al*. 2020).

Apesar de promissora a tecnologia de impressão 3D de misturas cimentícias para a construção ainda apresenta muitos desafios no nível técnico e de processamento (De Schutter *et al*. 2018; Salet *et al*., 2018), pois ainda não estão disponíveis normas ou procedimentos para testar misturas e novos materiais, ou para analisar as propriedades estruturais do material cimentício utilizado para a impressão 3D (Kazemian *et al*. 2017; Salet *et al*. 2018).

A avaliação da nanodureza em misturas cimentícias para impressão 3D (3DCP) na zona interfacial entre camadas impressas desponta como um tema crucial na engenharia. Com o avanço da tecnologia de impressão 3D, a construção de estruturas de concreto por meio dessa técnica está se tornando cada vez mais comum e objeto de estudo constante. Entretanto, a qualidade e a resistência dessas estruturas estão ligadas à aderência entre as diferentes camadas de concreto, tornando imperativa a análise dessa região específica (Mechtcherine *et al*. 2020).

A nanodureza, que mensura o comportamento de um material à deformação plástica sob uma carga extremamente pequena aplicada, desempenha um papel essencial na caracterização das propriedades mecânicas de materiais compósitos como o concreto. Ao avaliar a nanodureza na zona interfacial de camadas impressas de concreto, é possível aprimorar a compreensão sobre o comportamento microestrutural e a integridade mecânica dessas estruturas. Tais informações oferecem valiosas contribuições para otimizar o processo de impressão 3D e aperfeiçoar a qualidade das peças produzidas.

Estudos anteriores já destacaram a importância da microestrutura na avaliação da aderência entre camadas em materiais compósitos, como o concreto reforçado com fibras (Parmentier *et al*. 2013). No entanto, ainda há uma lacuna significativa de pesquisa quanto à aplicação específica dessa técnica em misturas de cimentícias utilizadas na impressão 3D. Portanto, é crucial realizar investigações mais aprofundadas nesse campo para expandir o conhecimento sobre os fatores que influenciam a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto fabricadas por impressão 3D. O teste de indentação instrumentada, também conhecida por indentação de profundidade, é uma forma de obter-se as características mecânicas de um dado material. Ao logo da última década, a nanoindentação foi desenvolvida para caracterizar mecanicamente filmes finos, revestimentos e camadas de superfície.

Segundo Pelisser *et al*. (2001), a técnica da nanoindentação consiste em fazer penetrar uma ponta de diamante no material, controlando e registrando a carga e a profundidade de penetração. A carga máxima é mantida constante por alguns segundos e, então, retirada. O tempo, em segundos, é controlado em três estágios: no carregamento, em carga máxima e no descarregamento. Os dados produzidos são colocados num diagrama carga-deslocamento (P-h), o qual descreve uma curva

denominada carga-descarga. O processo de análise das medidas, ou seja, da curva P-h, permite caracterizar as amostras, obtendo resultados de módulo de elasticidade (E) e dureza (H).

As propriedades das peças construidas por manufatura aditiva em materiais cimentícios dependem muito do tipo de sistema de impressão disponível, pois a velocidade e taxa de extrusão, tamanho, forma e altura que o bico de impressão deposita a camada interferem nas propriedades. Além disso a composição da mistura utilizada para atender a capacidade de construção, utilizando um dado sistema de impessão também interfere nas propriedades mecânicas das peças impressas. Desta forma, verifica-se que há uma necessidade de uma análise de diversas propriedades de misturas 3DCP, pois ainda não há sistema normativo vigente, e por isso muitas questões são levantadas a cerca das propriedades dessas misturas 3DCP, sobretudo em relação a seu elo mais frágil, que é a aderência entre camadas depositadas, assim o presente trabalho visa contribuir na análise da aderência entre camadas sobrepostas por impressão 3D e sua relação com a nanodureza da zona interfacial entre essas camadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS E PROCESSO DE IMPRESSÃO

Para realizar a análise da microdureza da zona interfacial de misturas cimentícias para a construção de elementos por impressão 3D, foi utilizado o Cimento Portland CPV (CP), Metacaulim (MK), Filer Calcário (FC), com massas específicas de 3,04 g/cm³, 2,49 g/cm³ e 2,71 g/cm³, respectivamente, e a areia natural de rio, com massa específica de 2,61 g/cm³, com diâmetro máximo e módulo de finura de 2,2 mm e 1,42, respectivamente. As composições das misturas empregadas para a produção das peça 3D são descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição das misturas 3DCP analisadas (kg/m³)

Mistura	CP	MK	FC	AREIA	ÁGUA	Sp*	HPMC*
REF	706,60	-	-	1413,20	226,12	6,25	1,06
FCMK	406,90	69,17	203,45	1354,98	244,14	4,88	0,61

*Sp = Superplastificante a base de policarboxilatos, HPMC = Hidroxipropilmeteilcelulose

As misturas cimentícias forma impressas utilizando uma impressora tipo pórtico com capacidade de impressão de peças com até 1,0 m³. A impressora consiste em um equipamento de base cartesiana com movimentação mecanizada em seus eixos, possuindo um bico extrusor de deposição do material cimentício. A velocidade de impressão com relação aos eixos foi mantida constante em 2500 mm/min e a taxa de extrusão foi de 82 rpm, sendo o bico de impressão circular com diâmetro de 25 mm, resultando em espessura e largura média de camada depositada de 1,5 mm e 2,5 mm, respectivamente. Foram impressas peças em forma de bloco cúbico vazado, conforme Fig. 1, buscando retratar a impressão de um elemento representativo de uma parede, em escala reduzida, que tem o tamanho semelhante a um meio bloco de alvenaria estrutural, com dimensões de 14 cm x 14 cm de seção transversal e altura de 19 mm, e assim avaliar a influência da altura de deposição na microdurezas das camadas impressas e de sua interface entre camadas, utilizando neste caso, uma geometria de largura e altura de camada, e tempo de deposição, semelhantes ao que seria utilizado na construção de uma alvenaria.

2.2 MÉTODO DE ANÁLISE DA ZONA INTERFACIAL ENTRE FILAMENTOS POR NANOINDENTAÇÃO

Para realização da nanoindentação instrumentada, inicialmente, foram extraídas amostras dos filamentos (inferior e superior) das misturas cimentícias confeccionadas com impressora 3D, conforme Figura 1.

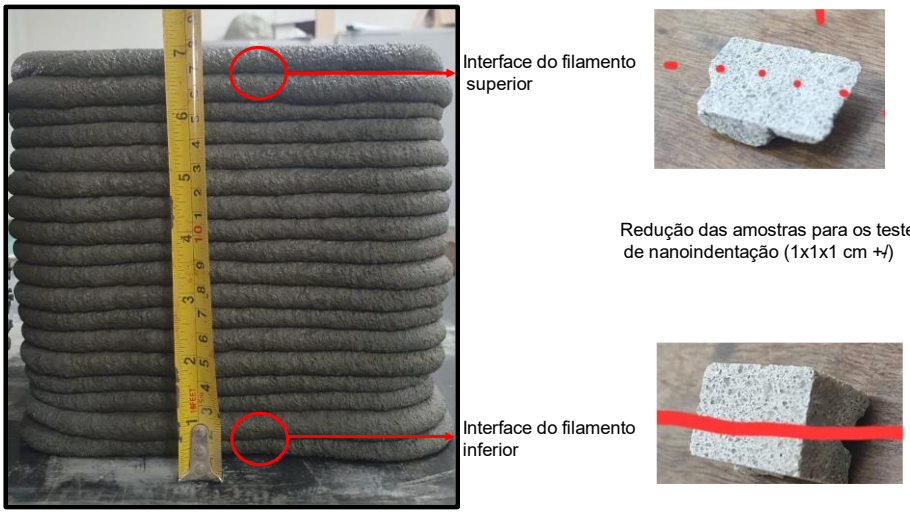


Figura 1 – Bloco vazado impresso e identificação da amostra para medição da nanoidentação

Foram preparadas duas amostras de cada mistura em análise para avaliação de duas camadas adjacentes e sua interface, localizadas nos filamentos inferiores, na base do bloco, e filamentos superiores, no topo do bloco, com distância entre as amostras de aproximada de 18 cm de altura. As amostras foram reduzidas para tamanho aproximado de 1,0 x 1,0 x 1,0 cm, e analisadas a microdureza após 52 dias de hidratação.

Para execução dos ensaios, foi utilizado o Nanodurômetro fabricado pelo ZwickRoell, grupo alemão de referência internacional na área de máquinas e equipamentos de testes de dureza, modelo ZHN - Sistema Universal de Testes Nanomecânicos. Trata-se de um equipamento usado para caracterização mecânica abrangente de camadas finas ou pequenas áreas de superfície com a força necessária e resolução de deslocamento. Isso inclui medir a dureza de recuo, o módulo de indentação e a dureza de Martens conforme ISO 14577 (teste de indentação instrumentada), com as seguintes características técnicas, Quadro 2. O ZHN funciona como uma dureza de profundidade testador na faixa de micro, com uma força máxima de 2 N. Também pode ser usado na faixa nano para indentação profundidades inferiores a 200 nm. Os ensaios foram realizados no LabNano - Laboratório de Propriedades Nanomecânicas de Superfícies da UFPR, Departamento de Física, do campus I – Curitiba-PR.

Quadro 2 - Especificações técnicas do Nanodurômetro

Descrição	Dados
Força máxima	2 N
Profundidade mínima	< 200 nm
Resolução de Deslocamento	< 0,01nm
Lente de aumento	1000x /3350x
Resolução das imagens	254 nm / 76 nm
Campo de visão	324 x 259 µm / 96 x 77 µm

Para análise mais precisa da nanodureza e módulo de elasticidade das misturas 3DCP, na região da zona interfacial, foram usados 7 perfis verticais em cada amostra, num comprimento total de 120 µm e espaçados em 20 µm, ou seja, padronizou-se uma análise com uma matriz de pontos, 7 na horizontal espaçados em 20 µm e 7 na vertical espaçados em 20 µm, conforme Figura 2, totalizando 49 indentações por amostra.

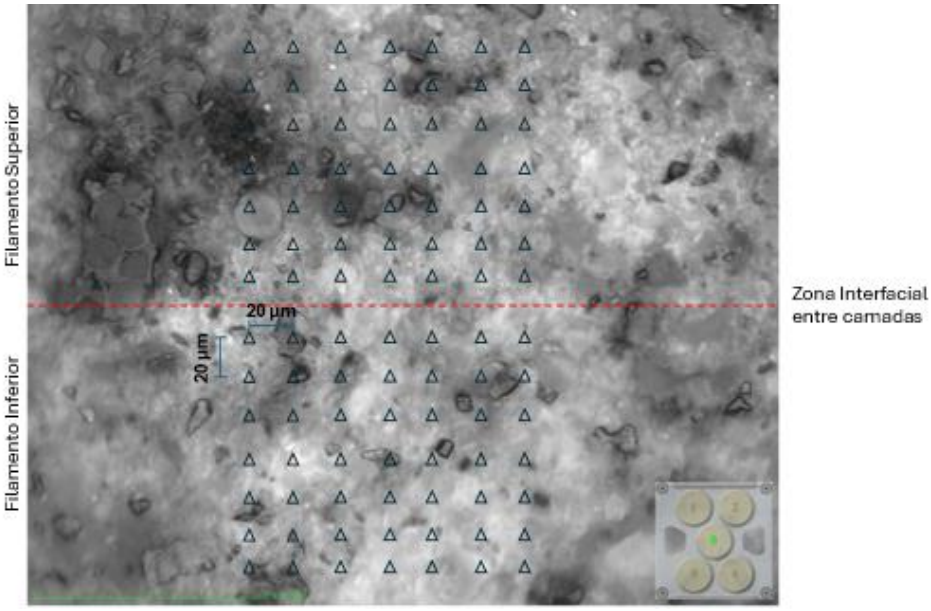


Figura 2 – Malha de indentações por amostra

O número de indentações são compatíveis com os procedimentos metodológicos dos trabalhos de Xu, *et al*. (2017), Rossignolo *et al*. (2017), Hu (2014), Wang *et al.* (2009) e Mondal (2008). Utilizando amostras reservas, foram feitos testes para que a profundidade máxima das indentações ficassem entre 250 e 600 nm, considerada uma profundidade adequada e compatível com as análises dos compostos cimentícios hidratados (Hu 2014; Wang *et al.* 2009 e Mondal 2008). A carga máxima compatível com profundidade máxima desejada foi de 5 mN ou 5000 µN, a ponta utilizada foi Berkovich (raio de 0,6 mm, ângulo de 142,3º). Todas as análises mantiveram uma programação de ensaio, o indentador assim que entra em contato com a superfície da amostra aplica uma carga com taxa constante de 166,7 mN/s. Os tempos de carregamento e descarregamento foram de 10 segundos cada.

2.3 ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS

A aderência entre as camadas foi determinada, após 28 dias de hidratação, utilizando amostras retiradas do centro do bloco vazado, Figura 1. A aderência foi realizada com base no ensaio de resistência a tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011), com a configuração mostrada na Figura 3, que é comumente adotada na literatura (Ting *et al,* 2019; Barbosa *et al,* 2022). A execução do ensaio se deu em três amostras cortadas do filamento inicial por disco diamantado após sete dias de cura submersa. Para execução foram utilizados dois filamentos de madeira mole, colocados na região da junção interfacial para garantir a correta posição do carregamento, sendo essa exercido a uma velocidade de 2,5mm/min.

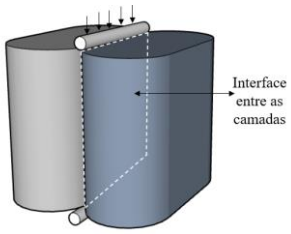


Figura 3 – Esquema da execução do ensaio de aderência entre as camadas.

O cálculo da resistência de aderência entre as camadas em função do tempo foi realizado através da Equação 2:

$$R_{ad} = \frac{2F}{\pi A} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Em que: R_{ad} (MPa) é a resistência de aderência entre as camadas; F (N) a carga última aplicada e A (mm²) a área de interface aderida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A técnica da nanoindentação possibilitou a investigação nanomecânica na zona interfacial entre as camadas de impressão 3D das misturas cimentícias REF e FCMK, do filamento inferior (altura de 1 cm) e do filamento superior (altura de 18 cm). A Fig. 4 e 5 apresentam os resultados de dureza (GPa) das indentações, das misturas REF e FCMK, respectivamente, mantendo os critérios estabelecidos na metodologia.

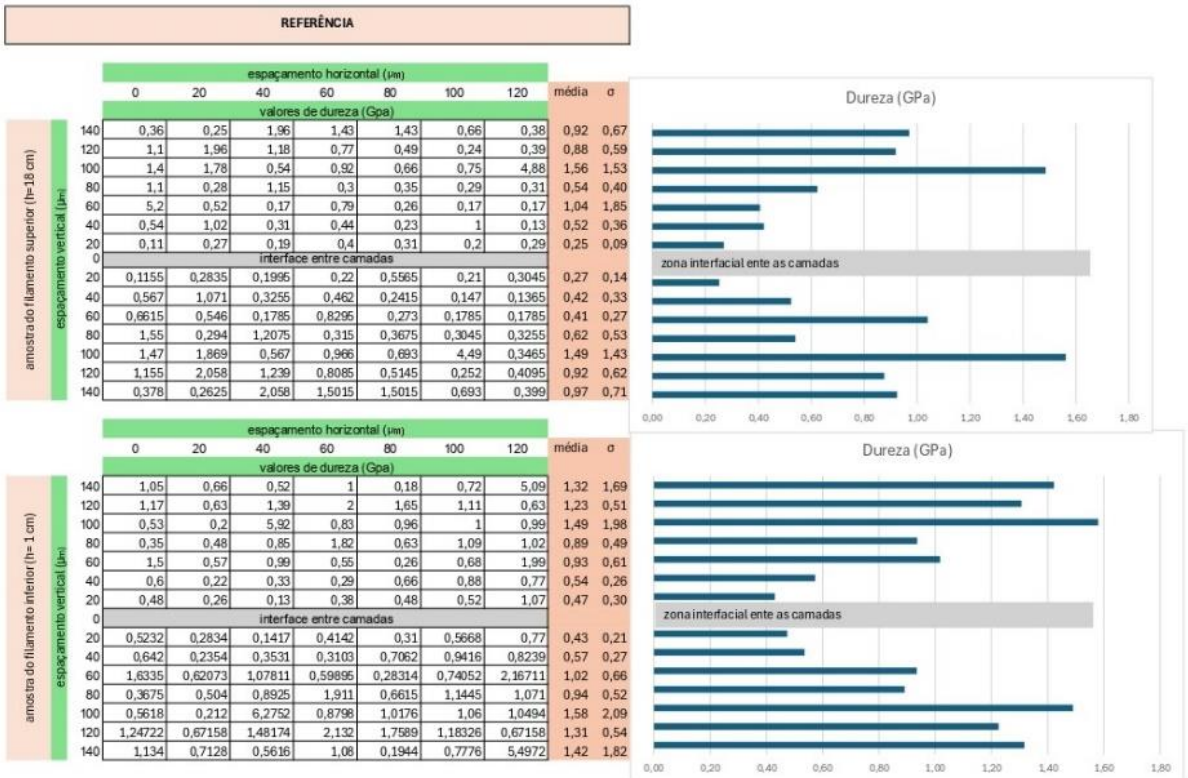


Figura 4 – Nanomecânica da zona interfacial da mistura REF

A mistura de Referência, preparada apenas com Cimento Portland, foi possível identificar uma zona interfacial entre as camadas dos filamentos com o comportamento nanomecânico distinto do restante da região, a instabilidade dos resultados de dureza mostra esse comportamento, onde mais próximo da zona interfacial entre camadas (ZI), os valores médios são da ordem de 0,25 GPa e 0,45 GPa, a 20 µm da ZI superior e interior, respectivamente, indicando que há uma influência na nessa propriedade de acordo com a altura de deposição das camadas. Já em regiões a 100 µm da ZI superior e interior a dureza apresentou média de 1,53 GPa e 1,53 GPa, o que indica que nesse ponto está sendo medida a nanodureza da pasta sem influência da aderência entre as ZI.

Os valores das indentações, no intervalo de 0,47 GPa a 1,25 GPa estão associados ao C-S-H (silicato de cálcio hidratado e de 1,50 GPa a 1,77 GPa estão associados a hidróxido de cálcio, já medições da ordem de 0,23 a 0,31 GPa estão relacionadas a medições de zonas com maior porosidade (Xu *et al*. 2017), desta forma as indentações da região estudada ZI superior aprensenta menor dureza que está relacionada a mior porosidade devido a menor esforço de adensamento entre camadas.

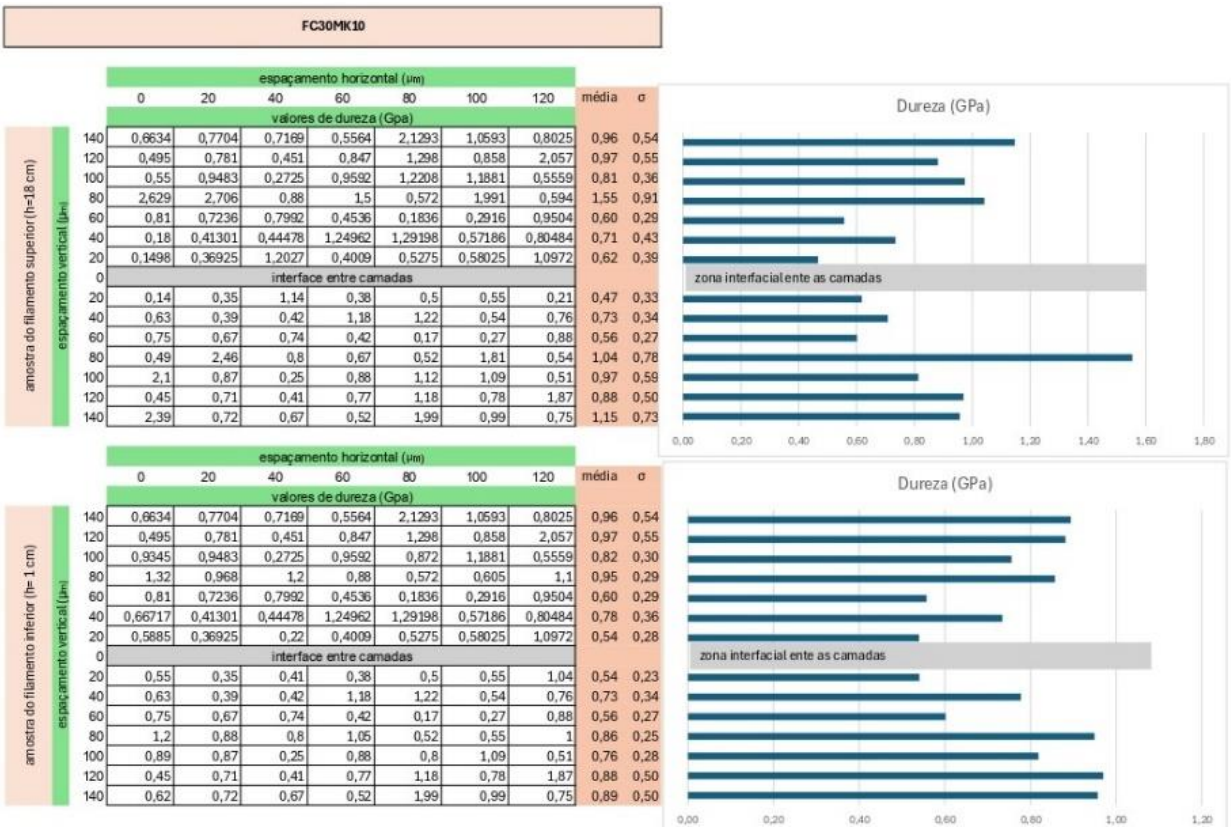


Figura 5 – Nanomecânica da zona interfacial mistura FCMK

A mistura FCMK, preparada com um teor menor de Cimento Portland, apresenta comportamento semelhante a mistura REF, com uma tendência de menor dureza na zona próxima da região interfacial entre as camadas dos filamentos. Porém, os valores de dureza da mistura FCMK na zona interfacial (ZI) a 20 µm foram de 0,55 e 0,54 GPa nas camadas superiores inferiores, respectivamente, já na mistura REF os valores na ZI a 20 µm foram de 0,26 e 0,45 GPa, o que demonstra uma maior resistência interfacial da mistura FCMK, devido as reações pozolânicas e de preenchimento de poros proporcionados pelo MK e FC. As nanodurezas a 100 µm da ZI apresentaram valores de 0,89 GPa e

0,77 GPa, nas regiões superior e interior, respectivamente, são menores que aquelas observadas na mistura REF.

A Figura 6 apresenta os resultados de ensaios de resistência de aderência, determinados por compressão diametral, e as médias de todos os resultados da nanodureza da zona intersticial (H-ZI) das misturas em análises, onde verifica-se que a mistura FCMK apresentou uma redução de cerca de 28% na aderência em relação a REF, já a nanodureza da ZI reduziu de 8%. A nanodureza da ZI da mistura FCMK apresenta um menor redução em relação a REF, quando comparada com a redução da aderência, pois H-ZI é um medida relacionada com a microestrutura da ZI e uma vez que a mistura FCMK apresenta adições pozolânicas na sua composição, ocorre a formação de C-S-H adicional, que compensa o menor teor de cimento da mistura e faz com que haja equivalência nessa propriedade que não pode ser refletida na aderência.

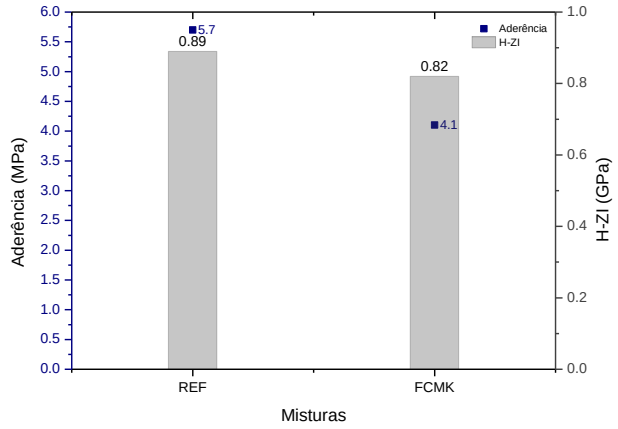


Figura 6 – Resultados de resistência de aderência entre camadas e média das nanodurezas

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados é possível apresentar as seguintes conclusões:

- A altura de deposição das camadas influencia a microdureza da zona interfacial (ZI), sendo maior os valores medidos na base das peças impressas, quando há mais 16 camadas compactado a duas últimas camadas impressas, em comparação com as medidas no topo da impressão;
- A microdureza média da ZI (H-ZI) é menor quanto mais próximo da linha limite de interligação entre camadas (20 µm) e maior quanto mais distante (100 µm);
- A mistura FCMK, com menor teor de cimento, apresenta maior microdureza média que a mistura REF, quando medida na linha limite de interligação a 20 µm;
- A mistura REF apresenta maior microdureza média da ZI que a mistura FCMK a uma distância de 100 µm da linha limite de interligação;
- A maior microdureza média da ZI a 20 µm verificada na mistura FCMK não refletiu em maior aderência entre camadas.

Destaca-se que os resultados apresentados são iniciais e mais dados com análises em diferentes misturas, com diferentes tempos e alturas de deposição estão sendo realizadas e podem trazer dados

mais elucidativos a cerca da influência da nanodureza e módulo de elasticidade da zona interfacial entre camadas.

AGADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES, IFPB (PRPIPG e DIPPED/JP) e FAPESQ pelo apoio financeiro concedido aos pesquisadores e a projetos envolvidos com esta publicação.

REFERÊNCIAS

Barati, K., Shen, X. (2016). Operational level emissions modelling of on-road construction equipment through field data analysis. Automation in Construction, 72(3):338-346. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.010

Barbosa, MS, dos Anjos, MAS, Cabral, KC, & Dias, LS (2022). Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo limitado de cimento. Construção e Materiais de Construção, Volume 341, 25 de julho de 2022, 127775.

Barbosa, MS, dos Anjos, MAS, Cabral, KC, & Dias, LS (2022). Desenvolvimento de compostos para impressão 3D com consumo limitado de cimento. Construção e Materiais de Construção, Volume 341, 25 de julho de 2022, 127775.

Benitez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J.E., Huerta-Guevara, O.F., García-León, A.M., Rueda-Avellaneda, J.F. (2021) Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context. Journal of the Air & Waste Management Association, 71(11):1415-1427. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040

Constantinides, G., Ulm, F. J., Vliet, K. V. (2003). On the use of nanoindentation for cementitious materials. Mater. Struct. 36(3), 191–196.

De Schutter, G. et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research, v. 112, n. June, p. 25–36, 2018.

He, Y. et al. Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. Energy and Buildings, v. 222, 2020.

He, Z., Qian, C., Du, S., Huang, M., Xia, M. (2017). Nanoindentation characteristics of cement paste and interfacial transition zone in mortar with rice husk ash. J. Wuhan Univ. Technol. 32, 417–421.

He, Z., Qian, C., Zhang, Y., Zhao, F., Hu, Y. (2013). Nanoindentation characteristics of cement with different mineral admixtures. Sci. China Technol. Sci. 56, 1119–1123.

Hu, C., Li, Z. (2014). Micromechanical investigation of Portland cement paste. Constr Build Mater. 71, 44–52.

Kazemian, A. et al. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. Construction and Building Materials, v. 145, p. 639–647, ago. 2017.

Mechtcherine, V.; Nerella, F.; Grafe, J. 3D printing concrete: Opportunities, challenges and applications. Cement and Concrete Research, v. 132, 106037, 2020.

Mondal, P., Shah, S.P., Marks, L.D. (2008). Nanoscale characterization of cementitious materials. ACI Mater vol. 105, 174–179.

Parmentier, P.; Wille, K.; Mechtcherine, V. Effect of fiber type and matrix composition on the microstructure and properties of fiber-reinforced concrete. Cement and Concrete Research, v. 45, p. 1-13, 2013.

Pelisser, F., Gleize, J.P.P., Mikowski, A. (2009). Propriedades Nanomêcanicas do Silicato de Cálcio Hidratado de Síntese. REVISTA AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 129-139. (In Portuguese).

Rossignolo, J. A., Rodrigues, M. S., Frias, M., Santos, S., Savastiano Jr, H. (2017). Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash. Cement and Concrete Composites vol. 80, 157–167.

Salet, T. A. M. et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing*. Virtual and Physical Prototyping, v. 13, n. 3, p. 222–236, 2018.

Silva, A., Dias, J.L., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013a). Statistical models applied to service life prediction of rendered façades. Automation in Construction, 30:151–160. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.028

Silva, A., Gaspar, P.L., De Brito, J. (2013b). Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding directly adhered to the substrate. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2):227–235. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000588

Silva, A., Neves, R., De Brito, J. (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 50:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

Ting, G. H. A.; TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. Journal of Material Cycles and Waste Management, 21(4), p.994-1003, 2019

Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Song, Q., Zhang, Z. (2017). Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly ultra-high performance concrete incorporating recycled coral based materials. J. Clean. Prod. 165, 70–80.

Xiao, J., Wengui, L., Sun, Z., Lange, D. A., Shah, S. P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. Cement & Concrete Composites, 37, 276–292.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DOSAGEM DE CONCRETO COM AREIA DE MINERAÇÃO

Luciano dos Reis Bento[1]; Silvio Xavier Santos[2]; Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco[3] ; Mariana Menezes[1] ; Wender Matosinho[1] ; Claudiele Alves[1] ; Pamella Figueiredo[1]

[1]Agera

Orozimbo Nonato, 215, 14º andar, Vale do Sereno, CEP 34006-049, Nova Lima, MG.

luciano.bento@agera.co; mariana.menezes@agera.co; wender.matosinho@agera.co; claudiele.alves@agera.co; pamella.figueiredo@agera.co

[2]S. Xavier Engenharia e Participações Ltda

Rua Comendador Antônio Alves, 1791, Centro, CEP 33600-000, Pedro Leopoldo, MG.

Silvio.xavier@sxavier.com.br

[3]Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Civil

Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG

luizmelg@gmail.com

RESUMO

Atualmente a areia de quartzo proveniente do beneficiamento do resíduo do tratamento do minério de ferro, tem sido utilizada como um material alternativo na construção civil no Brasil. Ela está sendo utilizada nas formulações de concreto, artefatos, pré-moldados, pré-fabricados, cimento, revestimento decorativos, argamassas industrializadas, dentre outras. Para o produto concreto, o uso da areia melhora o empacotamento dos agregados com o cimento, promove a diminuição de água na mistura garantindo coesão e plasticidade do composto em suas aplicações e, consequentemente, redução do consumo de cimento e custo do traço. Assim, este trabalho visa avaliar a aplicação de areia de mineração em concreto comparando-a com areia de natural, areia gnaisse e pó de pedra.Foram executados 40 concretos e ajustadas curvas de abrams dos conjuntos de dados. Os resultados mostraram que os concretos mais eficientes foram as misturas de Areia Gnaisse com Areia de Mineração. Essa mistura reduziu em até 25% o consumo de cimento no concreto, em comparação com as outras misturas de areia. A proporção mais eficiente entre estas areias para concretos até 25MPa foi 70% Areia Gnaisse e 30% Areia de Mineração, já a partir de 30 MPa, a mescla com melhor desempenho passou a ser 50% / 50%.

Palavras-chave: Areia de mineração; concreto; resíduo de minério de ferro; destinação de rejeitos; sustentabilidade; Areia de quartzo beneficiada.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um segmento fundamental para o desenvolvimento socioeconômico, e o minério de ferro corresponde a uma parte substancial da produção mineral brasileira, contudo potencializa a necessidade de capacidade de armazenamento de rejeitos, que representa um forte impacto ambiental. Segundo o boletim da Agencia Nacional de Mineração (ANM) atualmente o Brasil possui 88 barragens em situação de alerta ou emergência declarada. As políticas públicas estão focadas em buscar alternativas e transformações para modificar o cenário de disposição de rejeitos no Brasil, em fevereiro de 2019, em Minas Gerais foi sancionada uma lei estadual (Lei nº 23.291) que instituiu uma nova Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB), que proíbe a concessão de licenças para alteamento de barragens e estabelece prazos para descaracterização. Essa circunstância reforça a necessidade de estratégias para destinação dos rejeitos (Oliveira *et al*., 2020; Carmignano et al., 2023; ANM, 2024).

Nesse contexto, o beneficiamento do minério de ferro, que consiste na moagem, e concentração, principalmente por flotação ou separação magnética, gera um rejeito arenoso. No Brasil, são utilizados aproximadamente 500 milhões de toneladas de agregados, principalmente na construção civil (ANEPAC, 2020). Por outro lado, somente no estado de Minas Gerais, 290 milhões de toneladas de rejeitos e estéreis são gerados pela atividade de mineração (FEAM, 2018). A utilização desses rejeitos como agregados pode aumentar a circularidade dos concretos e argamassas locais, conforme a recomendação do *United Nations Environment Programme* (UNEP), de buscar a diversidade de materiais e focar em soluções locais no âmbito da areia (UNEP,2022; Golev *et al.*, 2022).

A areia é uma matéria-prima fundamental para construção, pavimentação, aterros e outras aplicações, por essa razão, a UNEP recomenda que a areia seja reconhecida como um recurso estratégico. A sua extração, especialmente em corpos de areia ativos como rios e deltas, quando ultrapassa o abastecimento natural, provoca uma erosão que se estende para além do depósito até às comunidades a jusante do sistema fluvial, impactando no uso da terra, poluição do ar, salinização, pesca e biodiversidade (UNEP, 2022; Golev *et al*., 2022; Hackney *et al*., 2021). Devido a esses impactos ambientais, o processo de obtenção de licenciamento ambiental para extração de areia procedente de rio tem se tornado mais restritivo.

A areia da mineração possui em sua composição basicamente 88% de sílica e 12 % de hematita, é considerada fina em relação aos agregados utilizados em concreto, mas devido a sua baixa absorção de água e grãos arredondados, proporciona ao concreto boa plasticidade e redução de água, proporcionando otimização no traço com a redução do consumo de cimento (Faria e Menezes, 2022; Kuranchie *et al.*, 201; Protasio *et al.*, 2021; Shettima *et al.*, 2016).

Para contrapor os modelos econômicos atuais, a economia circular propõe mudanças comportamentais a fim de unir sustentabilidade ambiental e crescimento econômico, desta forma, esse trabalho tem o objetivo de estudar a areia proveniente do beneficiamento do minério de ferro como uma opção de agregado miúdo para concretos na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Objetiva-se entender o desempenho dos concretos utilizando em sua composição distintas mesclas (30/70%, 50/50% e 70/30%), com diferentes tipos de areia (areia da mineração, areia gnaisse, areia natural e pó de pedra) para uma ampla faixa de famílias de concreto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais foram coletados antecipadamente de uma única vez e caracterizados nos ensaios de massa específica, absorção de água, granulometria e material pulverulento.

2.1 MATERIAIS

Os traços de concreto estudados foram produzidos com cimento Portland CPV ARI RS CSN da fábrica de Pedro Leopoldo MG (aglomerante), agregados miúdos como areia natural, areia de mineração, areia gnaisse e pó de pedra, aditivo polifuncional, conforme os quantitativos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados e quantidades para o estudo.

Materiais	Unidade	Quantidade
Cimento CPV ARI RS	Kg	500
Areia da Mineração (A1BR)	Kg	300
Areia Natural	Kg	300
Areia Gnaisse	Kg	300
Pó de Pedra	Kg	300
Brita 0	Kg	400
Brita 1	Kg	800
Aditivo Polifuncional	Litros	3,00

2.1.1 Água

A água utilizada para confecção das argamassas foi procedente da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

2.1.2 Aglomerante

O cimento Portland utilizado foi o CPV ARI RS que é normatizado pela NBR 16697 (ABNT 2018). A tabela 2 apresenta propriedades do aglomerante utilizado, bem como os respectivos limites estabelecidos pela norma.

Tabela 2 – Caracterização física do cimento CPV ARI RS utilizado nos testes.

Características e propriedades		Resultados	Limites NBR 16697
Finura – Métodos Blaine (cm²/g)		4770	
Ínicio de Pega (min.)		165	≥ 60,0
Fim de Pega (min.)		225	≥ 600,0
Resistência à Compressão (MPa)	1 dias	21,3	≥ 14,0
	3 dias	34,5	≥ 24,0
	7 dias	41,5	≥ 34,0

Fonte: Especificação do fabricante (CSN, 2023)

2.1.3 Agregados

Utilizou-se areia natural média, areia gnaisse, pó de pedra calcário procedentes de fornecedores da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. A areia de quartzo beneficiada (A1BR) é procedente da Mina da Vale de Brucutu, São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. As características físicas das areias encontram-se na tabela 3. Através da análise granulométrica, é possível notar que a areia da mineração

se mostra mais fina que as demais, característica que proporciona um bom empacotamento de partículas quando mesclada com as demais areias.

Tabela 3 – Análise granulométrica dos agregados miúdos.

Peneiras (mm)	Porcentagem retida e acumulada (%)					
	Areia de quartzo beneficiada	Areia Natural	Areia Gnaisse	Pó de Pedra	Brita 1	Brita 0
25						
19					2,8	
12,5					63	0,5
9,5					90,9	14,8
6,3					98,9	61,7
4,8				0,7	99,2	85,0
2,4		0,4	13,4	21,3	99,2	98,7
1,2	0,4	11,3	29,0	41,8	99,2	98,7
0,6	2,2	52,9	43,2	55,3	99,2	98,7
0,3	6,0	88,9	58,4	63,5	99,2	98,7
0,15	29,1	99,3	71,8	68,5	99,2	98,7
0,075	74,6	99,7	84,7	76,8	99,8	98,9
Fundo	100	100	100	100	100	100
Dimensão máxima característica (mm)	0,6	2,4	4,8	4,8	19	12,5
Módulo de finura	0,38	2,53	2,2	2,51	6,89	5,93
Mat. Pulverulentos (%)	26,0	1,5	16,10	27,78	0,23	1,14
Massa específica (kg/dm³)	2,76	2,62	2,65	2,71	2,67	2,66
Massa unitária (kg/dm³)	1,45	1,43	1,52	1,35	1,44	1,48

A Figura 1 ilustra os materiais que foram usados no estudo de dosagem.

Areia de quartzo beneficiada (A1BR) | Areia Gnaisse | Areia Natural

Brita 0 Gnaisse | Brita 1 Gnaisse | Cimento CPV ARI RS

Figura 1 – Materiais utilizados nas dosagens

2.2 PLANO EXPERIMENTAL

Para realização dos estudos, foram projetados para cada mescla de agregado miúdo quatro traços com relação água/cimento diferentes e foram moldados corpos de provas para ensaios de resistência a compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias (Tabela 4). Os traços escolhidos para os estudos foram baseados nos concretos mais comercializados na região metropolitana de Belo Horizonte que são os convencionais com slump-test de 10 ± 2 cm e os bombeaives com slump-test de 12 ± 2 cm. Para este estudo foram focados os concretos com slump-test 12 ± 2 cm.

Para a mistura dos traços foram utilizados uma betoneira com capacidade de 120 litros, molhou-se a betoneira, colocou-se todo o agregado graúdo e parte da água de amassamento, em seguida adicionou o cimento, os agregados miúdos e o restante da água juntamente com o aditivo plastificante polifuncional. O volume de concreto misturado na betoneira foi de 25 litros.

A plasticidade do concreto foi medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump-test – NBR NM 67) e para esse estudo foi especificado um abatimento de 12 ± 1 cm.

Os corpos de provas foram moldados segundo as especificações estabelecidas na NBR 5738 (ABNT, 2015) e após a desforma ficaram em câmara úmida com umidade e temperatura controlada em processo de cura durante a data do ensaio de resistência à compressão axial.

Nas figuras 2, 3 e 4 são apresentadas as fotografias do estudo de dosagens.

Figura 2 – Ensaio de *Slump test* concreto mescla 70% Areia Natural/30% areia de quartzo beneficiada.

Figura 3 – Indicação do teor de argamassa do concreto mescla 70% Areia Natural/30% areia de quartzo beneficiada

Figura 4 – Corpos de provas moldados durante a realização do estudo de dosagem.

Tabela 4 - Traços projetados para o estudo comparativo entre as areias.

Mesclas	a/c	Cimento	Areia Gnaisse	Areia Natural	Areia de quartzo beneficiada	Pó de Pedra	Brita 0	Brita 1	Aditivo	Água
		Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	ml	litros
70% Areia natural 30% A1BR	0,45	433	-	515	232	-	309	719	3464	195
	0,60	325	-	583	262	-	307	716	2600	195
	0,75	260	-	626	281	-	306	713	2080	195
	0,90	217	-	655	294	-	305	710	1736	195
70% Gnaisse 30% Areia Natural	0,45	456	537	229	-	-	286	665	3648	205
	0,60	342	610	260	-	-	284	662	2736	205
	0,75	273	655	280	-	-	283	660	2184	205
	0,90	228	685	292	-	-	282	657	1824	205
70% Gnaisse 30% Areia A1BR	0,45	433	500	-	225	-	315	734	3897	195
	0,60	325	569	-	256	-	314	731	2925	195
	0,75	260	611	-	275	-	313	728	2340	195
	0,90	217	640	-	288	-	311	725	1953	195
70% Gnaisse 30% Pó de Pedra	0,45	467	524	-	-	235	284	661	3736	210
	0,60	350	597	-	-	269	283	658	2800	210
	0,75	280	643	-	-	289	281	656	2240	210
	0,90	233	674	-	-	303	280	653	1864	210
70% Areia Natural 30% Gnaisse	0,45	444	236	548	-	-	287	669	3552	200
	0,60	333	266	618	-	-	286	667	2664	200
	0,75	267	284	661	-	-	285	664	2136	200
	0,90	222	297	691	-	-	284	661	1776	200
50% Areia Natural 50% A1BR	0,45	436	-	355	373	-	315	733	3488	195
	0,60	325	-	406	426	-	314	731	2600	195
	0,75	260	-	436	458	-	313	728	2080	195
	0,90	217	-	457	480	-	311	725	1736	195
50% Gnaisse 50% Areia Natural	0,45	444	393	391	-	-	287	669	3552	200
	0,60	333	443	441	-	-	286	667	2664	200
	0,75	267	474	472	-	-	285	664	2136	200
	0,90	222	496	494	-	-	284	661	1776	200
50% Gnaisse 50% Areia A1BR	0,45	422	344	-	361	-	330	769	3376	190
	0,60	317	392	-	411	-	329	766	2536	190
	0,75	253	421	-	442	-	328	763	2024	190
	0,90	211	442	-	463	-	326	760	1688	190
50% Areia Natural 50% Pó de Pedra	0,45	444	-	391	-	411	287	669	3552	200
	0,60	333	-	441	-	463	286	667	2664	200
	0,75	267	-	472	-	495	285	664	2136	200
	0,90	222	-	494	-	518	284	661	1776	200
70% Gnaisse 30% Pó de Pedra	0,45	467	405	-	-	425	265	617	3736	210
	0,60	350	458	-	-	481	264	614	2800	210
	0,75	280	490	-	-	515	262	611	2240	210
	0,90	233	513	-	-	538	261	608	1864	210

2.2.1 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios de compressão axial foram realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram preparados para a realização do ensaio conforme as determinações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 5, são apresentados os resultados dos concretos no estado fresco e endurecido.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

Mesclas	a/c	Cimento	Água Inicial	Água Final	a/c obtido	Slump	Resistência à compressão Axial (MPa)		
		Kg/m³	litros	litros	kg	cm	3 dias	7 dias	28 dias
70% Areia natural 30% A1BR	0,45	431	195	198	0,459	12,5	36,8	53,7	64,2
	0,60	318	195	198	0,623	12,0	21,5	37,6	43,0
	0,75	256	195	200	0,781	11,5	15,9	22,4	29,9
	0,90	211	195	201	0,953	11,0	8,7	15,4	21,1
70% Gnaisse 30% Areia Natural	0,45	455	205	204	0,448	11,0	29,0	43,2	52,6
	0,60	341	205	196	0,575	12,0	30,6	40,1	49,9
	0,75	270	205	203	0,752	12,0	22,2	28,0	35,0
	0,90	227	205	204	0,899	12,0	15,5	20,4	25,5
70% Gnaisse 30% Areia A1BR	0,45	420	195	213	0,507	11,0	36,9	46,7	58,5
	0,60	318	195	201	0,632	12,5	23,9	36,8	49,8
	0,75	255	195	196	0,769	12,5	16,7	22,6	37,5
	0,90	214	195	193	0,902	11,5	13,3	18,6	27,9
70% Gnaisse 30% Pó de Pedra	0,45	467	210	207	0,443	12,0	24,7	35,7	52,1
	0,60	355	210	196	0,552	12,0	23,2	33,7	45,6
	0,75	282	210	196	0,695	13,0	19,4	26,7	41,6
	0,90	237	210	196	0,827	13,5	14,2	22,9	25,4
70% Areia Natural 30% Gnaisse	0,45	467	200	207	0,443	12,0	24,7	35,7	52,1
	0,60	355	200	196	0,552	12,0	23,2	33,7	45,6
	0,75	282	200	196	0,695	13,0	19,4	26,7	41,6
	0,90	237	200	196	0,827	13,5	14,2	22,9	25,4
50% Areia Natural 50% A1BR	0,45	446	200	196	0,439	12,0	39,8	59,3	69,2
	0,60	336	200	192	0,571	12,0	24,7	39,3	50,9
	0,75	267	200	200	0,749	12,0	16,7	29,4	37,4
	0,90	222	200	200	0,901	12,5	11,2	19,9	26,8
50% Gnaisse 50% Areia Natural	0,45	438	196	192	0,438	12,0	32,6	51,2	65,7
	0,60	327	195	189	0,578	12,0	20,3	32,1	46,0
	0,75	257	195	205	0,798	11,5	12,0	20,2	31,2
	0,90	215	195	201	0,935	12,5	7,5	14,6	22,6
50% Gnaisse 50% Areia A1BR	0,45	421	190	192	0,456	12,0	36,3	63,6	68,3
	0,60	317	190	190	0,600	12,5	29,6	44,9	58,2
	0,75	254	190	186	0,732	12,0	19,4	32,3	41,0
	0,90	211	190	190	0,900	13,0	13,3	22,8	29,1
50% Areia Natural 50% Pó de Pedra	0,45	444	200	200	0,450	12,0	3,9	38,4	52,2
	0,60	333	200	200	0,600	11,5	12,2	35,9	47,4
	0,75	267	200	200	0,750	12,0	12,1	29,6	39,6
	0,90	222	200	200	0,900	12,0	8,5	21,0	31,3

Baseado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, foram traçadas as curvas de Abrams das mesclas 70/30, 30/70 e 50/50 como ilustrado nos gráficos das figuras 5 e 7. As curvas de Abrams foram ajustadas por mínimos quadrados a partir das resistências obtidas nos ensaios e as respectivas relações água/cimento. Vale destacar que os ajustes das curvas foram bons, uma vez que todos os R^2 estão acima de 0,87.

A partir da curva de Abrams foram calculados os consumos de cimento dos concretos de 10 a 45 MPa para cada mescla de areia. As figuras 6 e apresentam as analises referente as mesclas 70%/30% e as figuras 7 e 8 as mesclas 50%/50%.

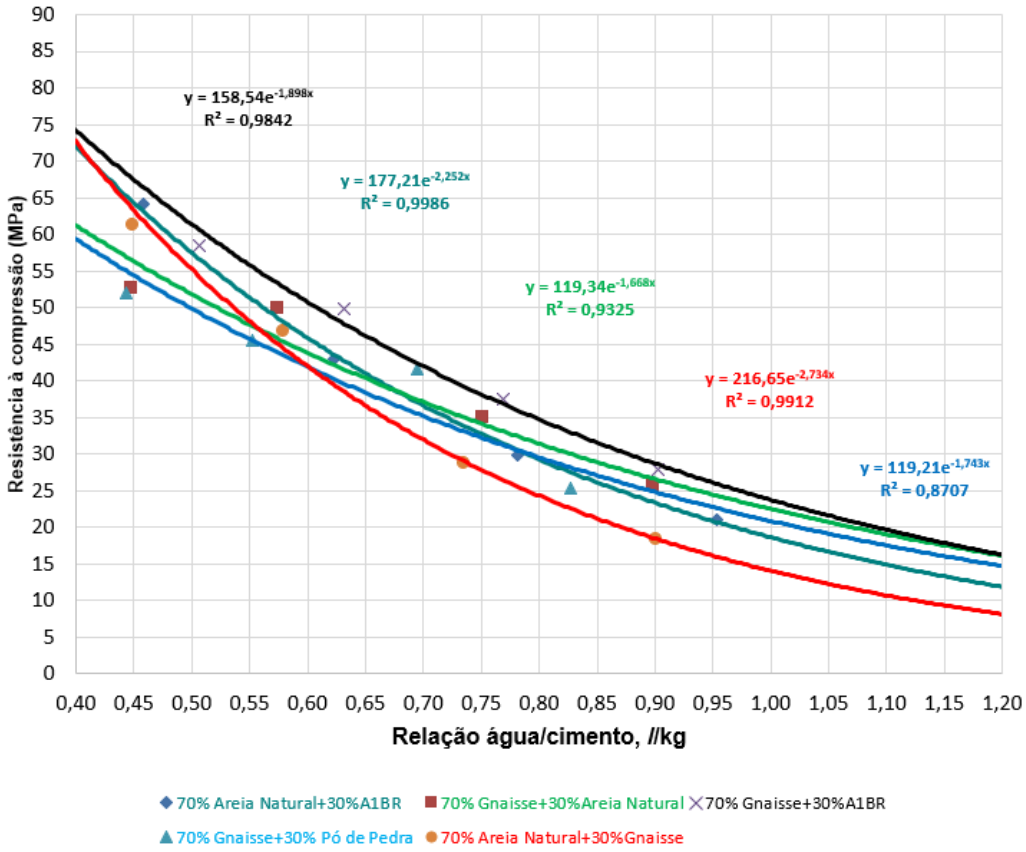
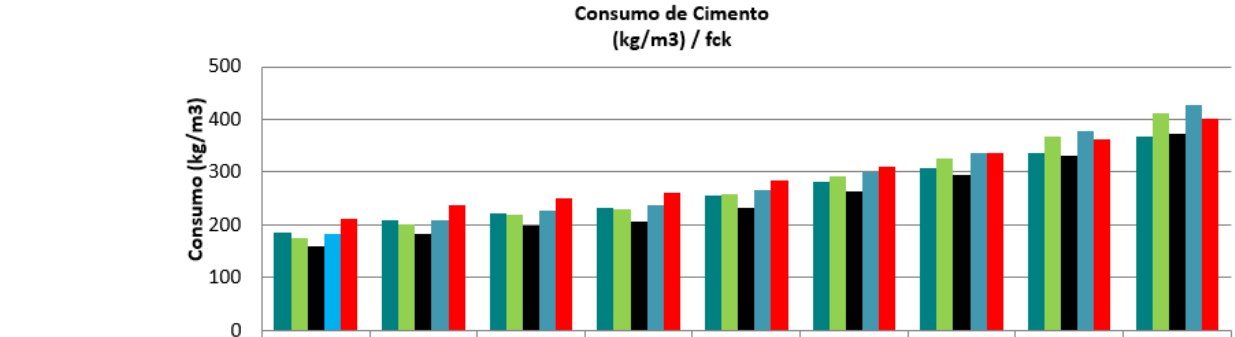


Figura 5 – Curvas de Abrams na idade de 28 dias para as mesclas 70 % / 30% obtidas em estudo de dosagem de concretos.

Comparando as séries para cada mescla na figura 1, a mescla 70% Areia Gnaisse + 30% areia de quartzo beneficiada é a que apresenta a maior resistência à compressão em toda a faixa de relação água/cimento. Além desta série, a 70% Areia Natural + 30% areia de quartzo beneficiada é a segunda melhor mistura na faixa de relação a/c de 0,40 a 0,70 e na relação a/c mais alta a 70% Areia Gnaisse + 30% Areia Natural é a segunda melhor escolha.



	10	15	18	20	25	30	35	40	45
70% Areia Natural+30%A1BR	186	209	222	232	255	281	308	336	368
70% Gnaisse+30%Areia Natural	176	202	218	229	258	291	327	367	413
70% Gnaisse+30%A1BR	159	183	197	207	233	263	295	331	372
70% Gnaisse+30% Pó de Pedra	183	209	226	237	266	300	337	379	426
70% Areia Natural+30%Gnaisse	212	236	250	260	283	309	336	363	401

Figura 6 – Consumo de cimento/m³ de concreto com as mesclas 70% / 30% utilizando areia de quartzo beneficiada (A1BR) vs Areia de Mercado.

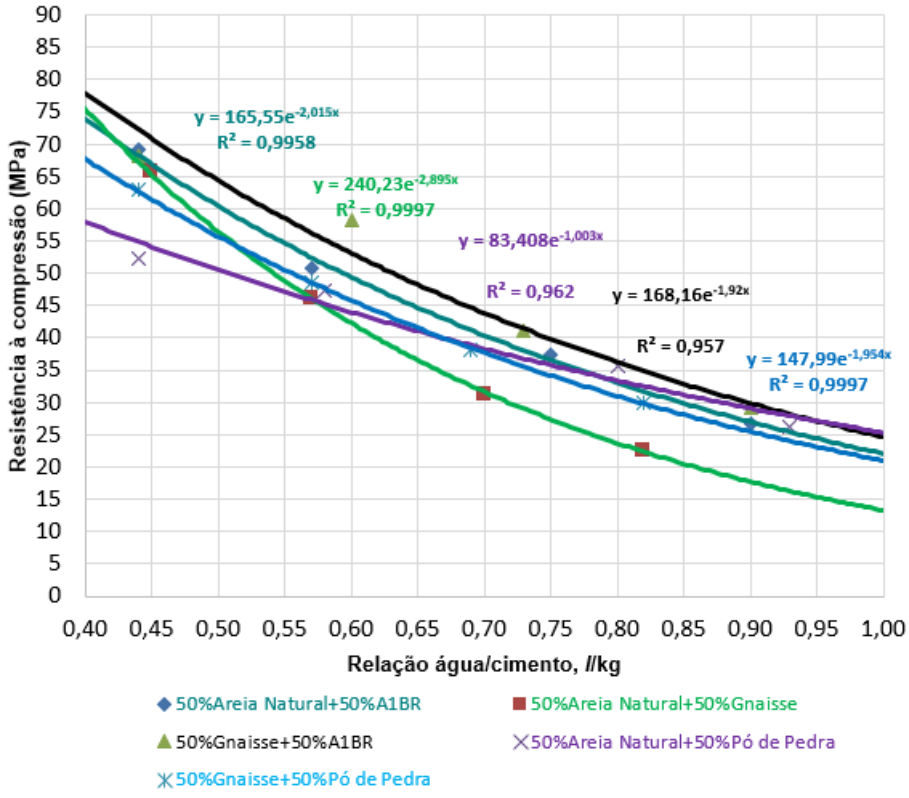
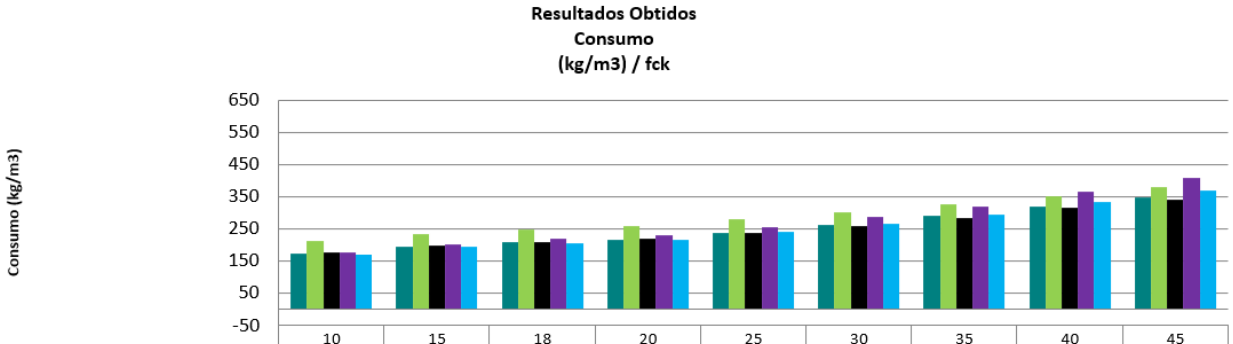


Figura 7 – Curvas de Abrams na idade de 28 dias para as mesclas 50% / 50% obtidas em estudo de dosagem de concretos.

Comparando as séries para cada mescla na figura 3, a mescla 50% Areia Gnaisse + 50% areia de quartzo beneficiada (A1BR) é a que apresenta a maior resistência à compressão em ampla faixa de relação água/cimento (entre 0,40 a 0,95), assim como a combinação 70% / 30% das mesmas areias na figura 2. Além desta série, a 50% Areia Natural + 50% areia de quartzo beneficiada (A1BR) é a segunda melhor mistura na faixa de relação a/c de 0,45 a 0,75 e na relação a/c mais alta a 50% Areia Natural + 50% Pó de Pedra é a segunda melhor escolha.



	10	15	18	20	25	30	35	40	45
50%Areia Natural+50%A1BR	171	193	206	215	237	262	289	317	348
50%Areia Natural+50%Gnaisse	211	234	248	257	278	302	327	352	379
50%Gnaisse+50%A1BR	177	198	210	217	237	259	281	314	340
50%Areia Natural+50%Pó de Pedra	177	202	217	228	255	285	319	366	409
50%Gnaisse+50%Pó de Pedra	169	192	206	215	238	265	294	334	369

Figura 8 – Consumo de cimento/m³ de concreto com as mesclas 50% / 50% utilizando Areia de Mineração vs Areia de Mercado.

A partir da análise da curva de Abrams, observa-se que a melhor mescla entre areias em Belo Horizonte é areia de quartzo beneficiada(A1BR) e Areia Gnaisse. Pelas figuras 2 e 4, pode-se observar que até 25MPa, a proporção que apresenta menor consumo de cimento no concreto é 70% Areia Gnaisse e 30% areia de quartzo beneficiada(A1BR). A partir de 30MPa, a mistura mais eficiente passa a ser a 50% de Areia Gnaisse + 50% de areia de quartzo beneficiada. O uso dessas duas areias pode diminuir o consumo de cimento nos concretos em até 25% em relação às demais séries. Esse aumento na eficiência do material pelo uso da areia da mineração diminui as emissões de CO_2 e reduz os custos de matérias primas do concreto.

Ao observar a mescla entre Areia Natural e areia de quartzo beneficiada (A1BR), nota-se que a proporção mais eficiente em toda a faixa de resistência à compressão dos concretos é a 50% / 50%.

4 CONCLUSÕES

O objetivo do estudo foi comparar as misturas de areias disponíveis para concreto na região de Belo Horizonte através das curvas de Abrams, avaliando especialmente o uso de areia de quartzo beneficiada (A1BR). Os resultados foram consistentes mostrando que os concretos mais eficientes são os com a mistura de Areia Gnaisse com areia de quartzo beneficiada (A1BR). Essa mescla permitiu reduzir em até 25% o consumo de cimento no concreto, em comparação com as outras combinações de areia. A proporção mais vantajosa entre estas areias para concretos até 25MPa é 70% Areia Gnaisse e 30% areia de quartzo beneficiada (A1BR). A partir de 30MPa, a mistura com melhor desempenho passa a ser 50% / 50%. A segunda melhor mistura em toda a faixa de relação água/cimento estudada é 50% de Areia Natural + 50% areia de quartzo beneficiada (A1BR). Assim, além dos ganhos de circularidade, o uso da areia de quartzo beneficiada (A1BR) aumenta a eficiência do concreto na região de Belo Horizonte e contribui para a redução das emissões de CO_2 desses concretos.

Neste trabalho observa-se que o uso da areia A1BR além de melhorar a reologia do concreto, reduz a quantidade de cimento por m³ de concreto devido aos grãos arredondados da areia A1BR e pela baixa absorção. Está diminuição do aglomerante diminui a reserva alcalina e pode reduzir a proteção do aço.

REFERÊNCIAS

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – **Report mensal Barragens de Mineração**, Março de 2024.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

NEVILLE, A. Mattew. e BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª Ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013.

NEVILLE, A. Mattew. **Propriedades do Concreto**. 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

CARMIGNANO, O.R.D.R.; LAGO, R.M.; SANTOS, U.P., Processos de inovação em rede como uma estratégia para a destinação de rejeitos da mineração de ferro: o caso da Plataforma R3 Mineral. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 22, n. 00, p. 1–30, 2023.

Cosenza, J. P., Andrade, E. M. de, & Assunção, G. M. de. (2020). Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista De Gestão Ambiental E Sustentabilidade**, *9*(1), e16147

Faria, S. F., Menezes, M. F. L. **Redução do Consumo de Cimento do Concreto usando Areia da Mineração.** 63º Congresso Brasileiro do Concreto, 2022.

Fundação estadual do meio ambiente – FEAM. **Dados econômicos.** Reporte Final, 2020.

Golev, A., Gallagher, L., Vander Velpen, A., Lynggaard, J.R., Friot, D., Stringer, M., Chuah, S., Arbelaez-Ruiz, D., Mazzinghy, D., Moura, L., Peduzzi, P., Franks, D.M. **Ore-sand: A Potential New Solution to the Mine Tailings and Global Sand Sustainability Crises** Final Report. Version 1.4. The University of Queensland & University of Geneva, 2022.

Hackney, C.R., Vasilopoulos, G., Heng, S., Darbari, V., Walker, S. and Parsons, D.R. **Sand Mining Far Outpaces Natural Supply in a Large Alluvial River**. Earth Surface Dynamics, 9(5), 1323–1334, 2021.

Kuranchie, F. A., Shukla, S. k., Habibi, D. and Mohyeddin, A. **Utilization of Iron Ore Tailings as Aggregates in Concrete**. Cogent Engineering, 2: 1083137, 2015

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. HASPARYK, N. P. 2.ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

Protasio, F. N. M., Avillez, R.R., Letichevsky, S., Silva, F. A. **The Use of Iron Ore Tailings Obtained from the Germano Dam in the Production of a Sustainable Concrete**. Journal of Cleaner Production, 278, 123929, 2021.

Shettima, A. U., Hussin, M. W., Ahmada, Y., Mirza, J. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete.** Construction and Building Materials, 120: 72–79, 2016

UNEP. **Sand And Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis**, GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland, 2022.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BETÃO PRONTO COM AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS PROVENIENTES DE OPERADORES DE GESTÃO DE RESÍDUOS PORTUGUESES: IMPLEMENTAÇÃO INDUSTRIAL

João Pacheco [a]; Javier Valencia [a]; Jorge de Brito [b]

[a] CERIS, c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Portugal, jpacheco@c5lab.pt, jvalencia@c5lab.pt

[b] CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO

Este artigo apresenta a primeira produção industrial de betão pronto com agregados reciclados em Portugal. O processo de produção de betão pronto e as preferências industriais para a incorporação de agregados reciclados em betão são apresentados, as produções piloto são descritas e as propriedades de betões com agregados reciclados produzidos em laboratório são comparadas com as propriedades dos betões produzidos na central.

O estado-da-arte sobre betão com agregados reciclados não é representativo do processo de produção de betão pronto. Para preparar futuras produções de betão com agregados reciclados em Portugal, o c^{5}Lab realizou um projecto de investigação com agentes industriais, incluindo centrais de betão pronto. Esta publicação respeita à fase final do projecto, em que se produziu em central de betão quatro composições (C16/20 a C30/37) produzidas com 25% e com 50% de substituição de agregado natural calcário 6/12 por agregado reciclado. Esta substituição corresponde a cerca de 5% e 10% dos agregados da composição do betão, percentagem reduzida e que se deve à qualidade destes agregados reciclados, de produção industrial, em comparação com agregados reciclados artificiais produzidos em ambiente laboratorial. Parte dos estudos laboratoriais que fundamentaram as opções tomadas neste artigo são apresentadas noutro artigo apresentado nesta conferência.

PALAVRAS-CHAVE

Agregados reciclados; betão pronto; economia circular; produção industrial.

1 INTRODUÇÃO

A incorporação de agregados grossos reciclados de betão (AGRB) em betão é tema de diversos estudos da comunidade científica internacional. Os resultados destas investigações mostram que a a produção de betão com agregados reciclados (BAR) é uma opção viável, que contribui para a economia circular. Contudo, como os AGRB tendem a ter piores propriedades do que os agregados grossos naturais (AGN), as propriedades de BAR tendem a ser piores do que as propriedades de betão produzido exclusivamente com agregados naturais (BAN). Em paralelo, a heterogeneidade dos AGRB (Khoury et al. 2018) poderá resultar em BAR com propriedades incertas. Por estas razões, as normas e recomendações técnicas favorecem a incorporação parcial de AGRB em betão (NP EN 12620:2002+A1, LNEC E471). As incorporações parciais de AGRB não se fundamentam apenas em aspectos técnicos: apesar de os resíduos de construção e demolição (RCD) serem o maior fluxo (36%) de resíduos gerado anualmente na União Europeia e de os resíduos de betão constituírem a maioria dos RCD (European Commission 2022), o elevado volume de produção de betão implica que a totalidade dos resíduos de betão gerados anualmente corresponde apenas a 10% a 20% dos agregados utilizados para produzir betão (CEMBUREAU 2016, Recybéton 2019, Pacheco et al. 2023).

Apesar de o conhecimento científico viabilizar a incorporação de AGRB em betão e de existir enquadramento normativo para a produção de BAR em Portugal, o sector da construção não recorre a este material. A Comissão Europeia está a promover a circularidade no sector da construção, com referência explícita aos RCD no Plano de Acção para a Economia Circular, no Pacto Ecológico Europeu e na Vaga de Renovação na Europa, estando a estudar medidas que promovam operações de valorizações de RCD de maior valor do que as actuais, como a incorporação de AGRB em betão (Pacheco et al. 2023). Será uma questão de tempo até que o BAR se torne um produto corrente do sector da construção. No entanto, há poucos casos práticos de aplicações industriais de BAR (Recybéton 2019) e a maioria dos estudos realizados à data não considera especificidades da indústria do betão pronto.

Neste contexto, o c^{5}Lab - Sustainable Construction Materials Association - desenvolveu um projecto referente à produção de betão pronto com AGRB, que inclui o estudo laboratorial do estado fresco (Pacheco et al. 2022) e endurecido (Pacheco et al. 2024) de BAR produzido com AGRB industriais e que termina em produções piloto em central de betão, tema deste artigo. Todas as decisões do projecto foram tomadas após consulta de parceiros industriais, sendo os BAR desenvolvidos no âmbito do projecto representativos de aplicações da indústria.

2 A PRODUÇÃO DE BETÃO PRONTO

2.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

O betão é produzido pela mistura de um ligante com adjuvantes, adições, água e agregados. Mediante requisitos técnicos, o betão é especificado segundo a NP EN 206-1:2007 e as matérias-primas são proporcionadas de forma a cumprir os requisitos da especificação.

Uma central de betão típica produz betão com quatro a cinco granulometrias de agregados (dois agregados finos e dois a três agregados grossos). Cada granulometria é armazenada em baia própria (Figura 1), que é reabastecida por camião ao longo do dia consoante o ritmo de produção. Das baias, os agregados são encaminhados para as tolvas, sendo depois pesados e transportados para a misturadora.

Figura 1 - Baias e tolvas de uma central de betão

Os agregados são continuamente molhados nas baias através de aspersores colocados nas suas laterais. Esta operação utiliza água da rede e resulta numa distribuição de água heterogénea. O transporte de agregados das baias para as tolvas alterna entre cargas de zonas molhadas e cargas de zonas secas, para atenuar a influência da variabilidade do teor de humidade dos agregados no teor de água de cada amassadura. O teor de humidade dos agregados é monitorizado diariamente, recorrendo as centrais de betão a diferentes tipos de equipamento, como higrómetros do tipo *Speedy*, sondas, ou ensaios de variação de massa após secagem com secador ou microondas (NRMCA P2P e Twitty 2008).A Figura 3 mostra estes métodos. Devido aos ritmos de produção e à variação de humidade ao longo do tempo, não é viável ensaiar o teor de humidade dos agregados através de secagem em estufa.

Figura 2 - Sistema de aspersão de agregados e distribuição heterogénea de água pelos agregados

Figura 3 - Exemplo de métodos de avaliação do teor de humidade de um agregado: higrómetro e sonda

As centrais de betão avaliam o teor de humidade diariamente, podendo realizar ensaios adicionais se as condições atmosféricas se alterarem durante o dia. No caso das sondas, o teor de humidade pode ser avaliado continuamente. A avaliação do teor de humidade tem limitações: a dimensão das amostras é reduzida, mas a humidade das baias está distribuida de forma heterogénea (Figura 2); tipicamente, a humidade é avaliada nas baias e não nas tolvas; e o controlo de humidade é feito pontualmente, mas a humidade varia ao longo do dia.

Os agregados são encaminhados das tolvas para pesagem em balança, sendo posteriormente transportados para a misturadora. Os ligantes e adjuvantes são armazenados em silos e depósitos,

sendo pesados previamente à mistura. As centrais de betão recorrem tipicamente a água recuperada combinada com água da rede, sendo realizadas colheiras periódicas da água recuperada para monitorização da sua qualidade segundo a NP EN 1008:2003. A água recuperada é composta por água de lavagem dos equipamentos e camiões da central combinada com água de precipitação e é permanentemente agitada por meios mecânicos para assegurar a homogeneidade do seu teor de partículas sólidas em suspensão. A Figura 4 mostra uma estação de recuperação de água.

Figura 4 - Estação de recuperação de água

A composição do betão assume que os agregados estão saturados com superfície seca. A mistura de betão dura cerca de 60 segundos e o veio das pás da misturadora inclui um transdutor que monitoriza a resistência do betão ao movimento. Esta resistência é monitorizada na central de controlo e a quantidade de água é ajustada para cumprir a classe de consistência especificada (a resistência ao movimento do betão está correlacionada com a sua consistência). Um camião betoneira costuma ser carregado com duas amassaduras. Caso uma amassadura seja produzida com trabalhabilidade superior ao pretendido, a amassadura seguinte é produzida com menor trabalhabilidade como medida correctiva. Terminada a mistura, o camião betoneira é despachado. Após o seu regresso, o camião é lavado na estação de tratamento e recuperação de água.

Como os agregados utilizados nas centrais de betão têm marcação CE segundo a NP EN 12620:2002+A1, a sua qualidade é avaliada em central apenas pela avaliação visual da sua granulometria, composição e teor de finos. Em casos específicos, poderão ser realizados ensaios.

2.2 CONDICIONANTES PARA A PRODUÇÃO DE BETÃO PRONTO COM AGREGADOS RECICLADOS

As principais condicionantes para a produção de BAR em central são as seguintes:

- os AGR são materiais heterogéneos e de pior qualidade do que os AGN;
- a absorção de água dos AGR implica cuidados específicos para se assegurar que o BAR tem trabalhabilidade adequada durante a betonagem;
- cada fracção de AGR a utilizar na central requer a instalação de uma tolva e uma baia.

Qualidade dos agregados reciclados

Os AGRB são materiais heterogéneos (Khoury et al. 2018), com elevada porosidade, menor massa volúmica e maior absorção de água, tendo piores propriedades para o uso em betão do que a generalidade dos AGN (Pacheco e de Brito 2021). Em paralelo, os produtores de agregados reciclados na maioria dos Estados Membro da União Europeia, incluindo Portugal, não produzem AGRB com marcação CE segundo a NP EN 12620:2002+A1. Esta limitação é indicada por agentes industriais (Pacheco et al. 2023) como uma das principais condicionantes para a produção de BAR.

Absorção de água e trabalhabilidade

A absorção de água às 24 horas de um AGRB varia entre 4 e 8%, enquanto que a absorção de água de um AGN calcário varia tipicamente entre 1.0 e 2.5% (Pacheco e de Brito 2021). A elevada absorção de água dos AGRB é relevante pois a aspersão dos agregados em central não garante a sua saturação. Assim, os AGRB absorverão uma quantidade não desprezável de água de mistura durante o transporte da central até à obra, resultando em perdas de trabalhabilidade ao longo do tempo superiores às do BAN. Tal inviabiliza o controlo de trabalhabilidade do betão realizado durante a amassadura. Esta preocupação é agravada por a avaliação do teor de humidade dos agregados previamente à mistura, segundo os métodos mostrados na Figura 3, não ser adequada para agregados reciclados em condições de sub-saturação. Como mostrado em Recybéton (2019), os equipamentos utilizados para avaliar o teor de água dos agregados de forma expedita não são adequados para AGRB, pois necessitam que o teor de humidade dos agregados seja próximo ou superior à sua absorção de água às 24 horas para que as suas leituras sejam fiáveis (Figura 5).

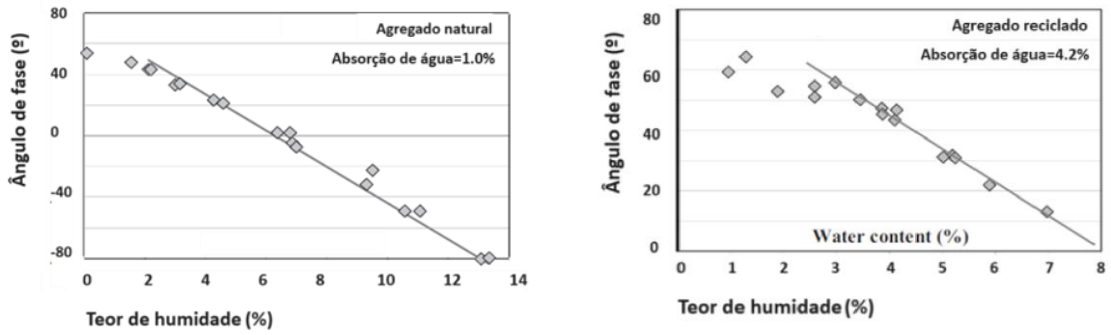


Figura 5 - Exemplo de erro na avaliação do teor de humidade de AGRB por sonda. Figura adaptada de RECYBETON (Recybéton 2019)

Necessidade de baias e tolvas adicionais

As centrais de betão têm uma baia e uma tolva para cada agregado que utilizam (Figura 1). Assim, para cada fracção granulométrica de AGRB a utilizar numa central, será necessário instalar uma tolva e uma baia. Como indicado na secção 2.1, as centrais de betão utilizam duas a três fracções granulométricas de AGN, o que implica que, caso a incorporação de AGR seja feita para todas as granulometrias, o número de baias e tolvas duplicará. Como as centrais de betão são instalações compactas, poderá não ser possível instalar tantas baias e tolvas.

2.3 PREFERÊNCIAS INDUSTRIAIS PARA A PRODUÇÃO DE BETÃO PRONTO COM AGREGADOS RECICLADOS

A equipa de projecto e os responsáveis da central de betão definiram as seguintes preferências para a produção de betão pronto com agregados reciclados:

- incorporação de AGR concentrada em uma única fracção granulométrica, para reduzir o número de baias e tolvas necessárias para a implementação industrial. Assim, o projecto estudou a substituição de AGN 6/12 por AGRB com a mesma granulometria - como estudo acessório, a substituição de 100% dos AGN 6/12 e AGN 12/22 foi também estudada em laboratório (Pacheco et al. 2022, Pacheco et al. 2024). Por questões operacionais, os AGR serão utilizados tal qual fornecidos pelo operador de gestão de resíduos, sem qualquer processamento na central;

- aspersão de AGRB em período prolongado, para mitigar a sua elevada absorção de água. Foi seguido o mesmo método utilizado para a produção de betão pronto com agregados leves, sendo os AGRB colocados nas baias e sujeitos a aspersão a partir do dia anterior à amassadura;
- a incorporação dos AGRB no betão deverá ser fundamentada por campanha experimental que avalie a sua influência no estado fresco e endurecido do betão. Esta campanha deverá também definir percentagens de incorporação de AGRB que permitam assegurar desempenho equivalente ao de amassaduras análogas produzidas com BAN;
- controlo da influência da incorporação dos AGRB nas propriedades do betão através da redução da sua percentagem de substituição, ao invés de se recorrer a alterações na composição do betão (por exemplo, com o aumento do teor de adjuvantes ou do cimento), por questões práticas, económicas e ambientais (Pacheco et al. 2023).

As percentagens de substituição dos AGN por AGRB serão forçosamente reduzidas pois, à data, nenhum operador de gestão de resíduos nacional produz AGRB com marcação CE segundo a NP EN12620+A1, não estando os seus processos de produção vocacionados para AGR de qualidade elevada. Realça-se que, não obstante a elevada geração de RCD na União Europeia, se todos os resíduos de betão fossem reciclados e utilizados como agregados reciclados para betão, estes agregados corresponderiam apenas a cerca de 20% dos agregados utilizados anualmente para a produção de betão (Recybéton 2019). Espera-se assim que incorporações parciais de AGRB contribuem para uma valorização significativa dos RCDs sem comprometer a qualidade do betão.

O estado-da-arte internacional não reflete as preferências industriais pois: i) a maioria dos estudos distribui os AGR ao longo de toda granulometria do betão, ao invés de os concentrar por fracção granulométrica (Pacheco e de Brito 2021); ii) a absorção de água dos AGR tende a ser compensada pela saturação dos agregados ou pela adição de água de compensação (condições não representativas de betão pronto); e iii) a influência dos AGRB nas propriedades do betão não costuma ser compensada com a redução da sua percentagem de incorporação, sendo aceite ou compensada pela alteração da composição do betão - o que implicará impactes económicos e ambientais.

As campanhas laboratoriais realizadas no âmbito deste projecto foram desenvolvidas tendo em conta as preferências dos agentes industriais, tendo sido definidas após a visita a três centrais de betão pronto. A avaliação do estado fresco (Pacheco et al. 2022) e endurecido (Pacheco et al. 2024) de BAR produzido com composições de referência e matérias-primas da central de betão pronto em que se realizou a produção industrial apresentada neste artigo foram tema de outras publicações. A campanha ao estado endurecido é apresentada nesta conferência.

3 PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE BETÃO PRONTO COM AGREGADOS RECICLADOS

3.1 OBJECTIVOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

A produção industrial de BAR apresentada neste artigo teve como motivação:

- validar a viabilidade operacional e as hipóteses definidas pela equipa do projecto;
- comparar a influência da incorporação de AGRB nas propriedades do betão pronto produzido em ambiente industrial com os resultados das fases anteriores da campanha experimental;
- constituir um exemplo demonstrador para a indústria da viabilidade de produzir BAR, contribuindo para o estado-da-arte internacional.

Nos estudos anteriores, concluiu-se que a produção industrial das quatro especificações de betão estudadas (indicadas no Quadro 1) deveria ser realizada para 0%, 25% e 50% de substituição de AGN 6/12 por AGRB 6/12. A estas substituições corresponde um aumento marginal (inferior a 2.7%) do teor de água, cimento e fíler, mantendo a proporção entre estas matérias-primas, e a alterações reduzidas das propriedades do betão (especialmente para a substituição de 25% de AGN 6/12). As percentagens de substituição correspondem a cerca de 4% a 9% do teor total de agregados (finos e grossos) do betão. As composições de betão são apresentadas no Quadro 1. Em reunião com a central de betão, decidiu-se que, na implementação industrial, o teor de cimento, água e fíler seria igual aos de referência pois as alterações são reduzidas quando comparadas com a margem de erro das balanças. Por questões de confidencialidade, o teor de ligante é apresentado em conjunto e a curva granulométrica dos agregados não é apresentada e os adjuvantes utilizados não são indicados.

Quadro 1 - Composições de betão (kg/m^3)

Matéria-prima	C16/20 X0(P)Cl0,40 D22 S3	C20/25 X0(P) Cl0,40 D22 S3	C25/30 XC1(P) Cl0,40 D22 S3	C30/37 XC2(P) Cl0,40 D22 S3
CEMI 52.5R + fíler	240	260	290	330
Plastificante	1.0% cimento + fíler			
Superplastificante	0.4% cimento + fíler			
Agregados finos	749	707	632	572
Brita 2/6	237	236	229	214
Brita 6/12	325	328	332	341
Brita 12/22	501	502	503	504
Água efectiva	160	163	165	165

Foram ensaiadas as propriedades mostradas no Quadro 2. Os ensaios de abaixamento, espalhamento e teor de ar foram realizados imediatamente após a amassadura e após 40 minutos da mesma. Durante este período, o tambor do camião betoneira esteve em rotação, simulando o transporte do betão.

Quadro 2 - Programa experimental

Propriedade	**Composições**	**Idade**	**Tipo de provete**	**Número de provetes**	**Norma**
Abaixamento	Todas	0 e 40 min após a amassadura	-	1	NP EN 12350-2:2022
Espalhamento	Todas	0 e 40 min após a amassadura	-	1	NP EN 12350-5:2019
Teor de ar	Todas	0 e 40 min após a amassadura	-	1	NP EN 12350-7:2022
Resistência à compressão	Todas	2, 7 e 28 dias	Cubos de 150 mm	7 dias - 2 28 dias - 3 91 dias - 2	NP EN 12390-3:2021
Resistência à tracção por compressão diametral	Todas	28 dias	Cilindro 150 x 300 mm	2	NP EN 12390-6:2011
Módulo de elasticidade em compressão	Todas	28 dias	Cilindro 150 x 300 mm	2	LNEC E397
Absorção de água por imersão	Todas	28 dias	Cubos de 100 mm	4	LNEC E394
Profundidade de carbonatação	C25/30 e C30/37	7, 28 e 91 dias de exposição após cura de 28 dias	Cilindros de 150 x 40 mm	7 dias - 3 28 dias - 3 91 dias - 3	LNEC E391
Coeficiente de migração de iões cloreto	C25/30 e C30/37	28 e 91 dias	Cilindros de 150 x 50 mm	3	NT Build 492

O volume das amassaduras foi o seguinte: BAN - um ciclo de 2 m^3; BAR - dois ciclos de 2m^3.

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PRIMÁRIAS

À excepção dos AGRB, as matérias-primas primárias utilizadas nas amassaduras são as correntemente utilizadas pela central de betão pronto e foram indicadas na publicação referente aos estudos em laboratório. As amassaduras são produzidas com água recuperada mas a aspersão dos agregados nas baias é feita com água da rede.

3.3 AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS DE BETÃO

O processo de produção dos AGRB da implementação industrial foi semelhante ao processo utilizado para produzir os AGRB da campanha laboratorial apresentada em Pacheco et al. (2024). A Figura 6 mostra algumas etapas deste processo, que incluiu separação dos resíduos de betão, esmagamento e remoção de armaduras, britagem primária em britador móvel de mandíbulas e classificação granulométrica. Conforme fundamentado na secção 2.3 e de acordo com as recomendações do artigo referente às propriedades laboratoriais (Pacheco et al. 2024), a implementação industrial foi realizada com incorporações parciais de AGRB concentradas na fracção 6/12 dos agregados.

Figura 6 - Pormenores do processo de produção dos AGRB da implementação industrial

Verificou-se que a granulometria destes agregados é equivalente à dos AGN que substituem, bem como à granulometria dos AGRB ensaiados no estudo laboratorial (Pacheco et al. 2024). O Quadro 3 compara estes agregados com as propriedades dos AGN e dos AGRB do estudo laboratorial. O resultado do ensaio de constituintes (NP EN 933-11:2011) é semelhante ao dos AGN laboratoriais, tendo como principal diferença um menor teor de constituintes do tipo "Rc - betão e argamassas" (83% *versus* 94%, mas um teor superior de constituintes do tipo "Ru - pedra natural" (8.7% vs. 2.6%).

Quadro 3 - Propriedades dos AGR industriais vs. AGN e AGR do estudo laboratorial

Propriedade	Norma	Agregado 2/6	Agregado 6/12			Agregado 12/22
		AGN	6/12	AGR industrial	AGR laboratório	AGN
Absorção de água 24 h	NP EN 1097-6:2016	2.50%	2.30%	6.3%	6.50%	2.80%
Massa volúmica saturada com superfície seca (kg/m³)	NP EN 1097-6:2016	2351	2643	2388	2495	2597
Massa volúmica seca (kg/m³)	NP EN 1097-6:2016	2293	2584	2344	2345	2527
Teor de finos	NP EN 933-1:2014	2.10%	1.00%	1.50%	2.80%	0.40%

Em comparação com os AGRB utilizados no estudo laboratorial, os AGRB utilizados na demonstração industrial têm melhores propriedades (especialmente no que respeita ao teor de finos). Como esperado, as suas propriedades são piores do que as dos AGN. A conclusão apresentada em Pacheco et al. (2024) para os AGRB industriais utilizados no estudo laboratorial é válida: estes AGRB, produzidos em

ambiente industrial, têm piores propriedades do que os AGRB típicos de estudos laboratoriais, que costumam ser produzidos em laboratório a partir de resíduos de betão artificiais e com processamento em condições idealizadas (resultando, por exemplo, em AGRB com teor de finos desprezável e sem contaminantes). A caracterização destes AGRB não incluiu todas as propriedades indicadas na especificação LNEC E471, mas sugere que estes AGRB se enquadram na classe ARB2.

4. IMPLEMENTAÇÃO INDUSTRIAL

4.1 COMPOSIÇÃO E ESTADO FRESCO

Devido à sensibilidade das balanças, a composição de uma amassadura de betão não é igual à composição teórica. Estas diferenças são reduzidas para a maioria das matérias-primas. Contudo, no caso dos AGRB, devido ao seu reduzido teor em comparação com a sensibilidade da balança dos agregados, as diferenças são relevantes. O Quadro 4 mostra as percentagens reais de substituição dos agregados reciclados, bem como o abaixamento e espalhamento das amassaduras aos 0 e 40 minutos. A produção industrial ocorreu nos dias 23 e 24 de Maio de 2024, com temperatura entre 23.4 e 27.7 ºC. A massa volúmica variou entre 2344 e 2402 kg/m^3, com tendência para uma ligeira diminuição com a incorporação de AGRB. O teor de ar inicial variou entre 0.8 e 1.3% (com uma excepção, devida a uma anomalia de ensaio) e a 40 minutos entre 0.8 e 1.5%, com tendência congruente com a observada para a massa volúmica (aumento ligeiro do teor de ar com a incorporação de AGRB).

Quadro 4 - Propriedades dos AGR industriais vs. AGN e AGR do estudo laboratorial

Amassadura	C16/20			C20/25			C25/30			C30/37		
Substituição de AGN 6/12	NAC	25%	50%	NAC	25%	50%	NAC	25%	50%	NAC	25%	50%
AGRB / Agregado 6/12 (%)	0%	35%	47%	0%	33%	50%	0%	32%	51%	0%	33%	49%
AGRB / Total agregados (%)	0.0%	5.4%	7.3%	0.0%	5.1%	8.0%	0.0%	4.9%	7.6%	0.0%	5.1%	7.7%
Abaixamento inicial	140	130	70	130	170	110	200	160	185	150	160	120
Abaixamento 40 min	100	90	40	110	100	130	200	100	150	80	90	90
Espalhamento inicial	515	500	470	575	540	520	-	610	560	570	510	480
Espalhamento 40 min	440	440	370	550	460	480	570	560	555	490	455	440

Como pode ser verificado no Quadro 4:

- devido à sensibilidade das balanças, a substituição de 25% de AGN 6/12 é superior (entre 32 e 35%);
- a redução de abaixamento e de espalhamento durante 40 minutos não foi afectada de forma discernível pela incorporação de AGRB (abaixamento: redução média de 30% para BAN, de 38% para BAR com 25% de AGRB e de 17% para BAR com 50% de AGRB; espalhamento: redução média de 11% para todas as substituições de AGN por AGRB);
- esta dispersão de resultados deve-se à reduzida percentagem de incorporação de AGRB e à dispersão de resultados resultante de: i) as amassaduras serem produzidas em central; ii) o volume de produção e número de ciclos (2 m^3 e um único ciclo para as amassaduras de BAN e 4 m^3 e dois ciclos para BAR).

4.2 ESTADO ENDURECIDO

No artigo referente às amassaduras produzidas em laboratório (Pacheco et al. 2024), observou-se que a incorporação de AGRB piora o desempenho do betão, conforme esperado, e as substituições de AGN

6/12 por AGRB estudadas na implementação industrial foram definidas tendo como objectivo minimizar a redução de desempenho. As Figuras 7 a 9 mostram os resultados para parte das amassaduras. Observa-se que, para as propriedades mecânicas, este objectivo foi cumprido. No que respeita à durabilidade, a incorporação de AGRB resulta num aumento de absorção de água, profundidade de carbonatação e coeficiente de difusão de iões cloreto.

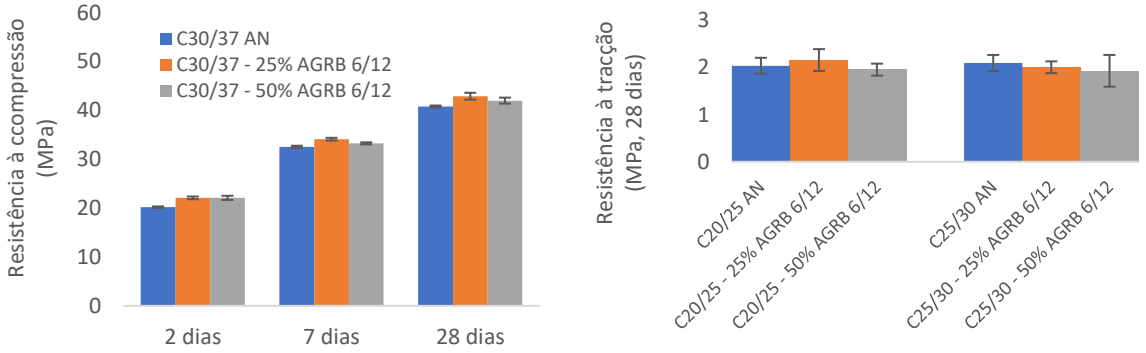


Figura 7 - Esquerda: resistência à compressão em cubos de 150 mm: C30/37; direita: resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias: C20/25 e C25/30

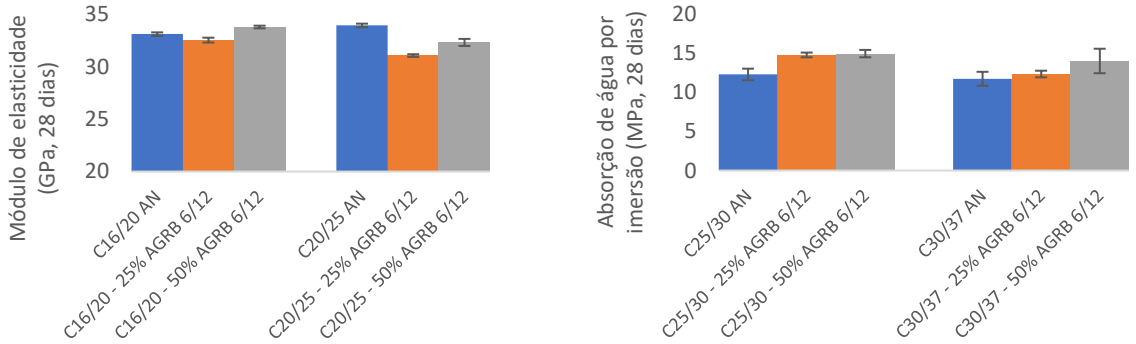


Figura 8 - Esquerda: módulo de elasticidade aos 28 dias: C16/20 e C20/25; direita: absorção de água por imersão: C25/30 e C30/37

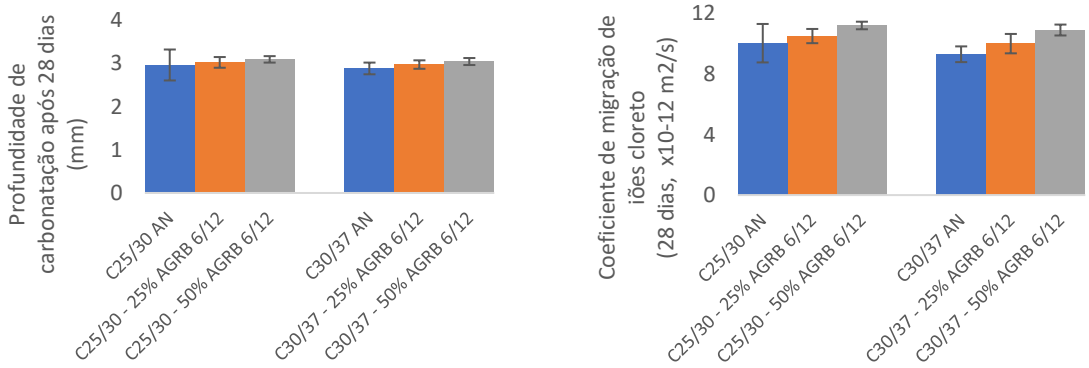


Figura 9 - Esquerda: profundidade de carbonatação após 28 dias de carbonatação forçada: C25/30 e C30/37; direita: coeficiente de difusão de iões cloreto aos 28 dias: C25/30 e C30/37

Os resultados obtidos concordam com os do estudo do betão produzido em laboratório. A razão entre as propriedades dos betões produzidos na central e os betões produzidos em laboratório é apresentada no Quadro 5, para as propriedades ensaiadas aos 28 dias.

Quadro 5 - Razão entre as propriedades dos betões da central e as propriedades dos betões do laboratório

		Resistência à compressão	Resistência à tracção	Módulo de elasticidade	Absorção de água por imersão	Profundidade de carbonatação	Coeficiente de migração de iões cloreto
C16/20	BAN	97%	103%	97%	123%	-	-
	25%	136%	93%	105%	122%	-	-
	50%	141%	86%	-	111%	-	-
C20/25	BAN	84%	79%	91%	108%	-	-
	25%	116%	86%	93%	107%	-	-
	50%	119%	83%	118%	109%	-	-
C25/30	BAN	70%	72%	89%	110%	87%	107%
	25%	77%	72%	92%	117%	76%	92%
	50%	91%	71%	108%	111%	73%	91%
C30/37	BAN	79%	83%	93%	112%	78%	114%
	25%	95%	80%	106%	113%	85%	108%
	50%	94%	62%	108%	126%	87%	94%

Tal como no caso da avaliação da influência dos AGRB nas propriedades dos betões, a relação entre as propriedades dos betões da central e dos betões produzidos em laboratório não é afectada pela incorporação de AGRB, o que pode ser devido à reduzida percentagem de incorporação dos AGRB das amassaduras propostas e à maior variabilidade intrínseca das produções industriais em comparação com as laboratoriais. As propriedades dos betões produzidos em central são piores do que as das amassaduras análogas produzidas em laboratório, com a excepção da profundidade de carbonatação e do coeficiente de migração de iões cloreto.

A principal conclusão da campanha experimental dos betões produzidos em central é que as percentagens de incorporação propostas permitem produzir BAR com comportamento no estado fresco e endurecido semelhante ao BAN e que as diferenças entre amassaduras não aparentam ser devidas à incorporação de AGRB, mas sim à variabilidade entre amassaduras (que é superior ao comum devido ao reduzido número de ciclos das amassaduras: um para BAN e dois para BAR). Realça-se que a campanha experimental às composições produzidas em laboratório concluiu que a durabilidade do betão era afectada, especialmente para 50% de substituição de AGN por AGRB. Não se recomendando a utilização destes AGRB para betões especificados para classes de exposição ambiental exigentes.

4 CONCLUSÕES

Este artigo resumiu a parte final de um projecto que resultou na primeira produção de betão pronto em central de betão portuguesa. A incorporação de agregados reciclados em betão é um tema premente, que tem sido alvo de diversos estudos que não têm resultado em aplicações industriais significativas. Tal deve-se a questões contextuais, relacionadas com o custo e disponibilidade dos agregados naturais. Contudo, devido à grande geração de resíduos de construção e demolição (RCD), será uma questão de tempo até a produção de betão com agregados reciclados se tornar contextualmente mais favorável.

Neste contexto, este artigo descreve o processo de produção de betão pronto e identifica dificuldades associadas à incorporação de agregados reciclados no processo: a necessidade de baias e tolvas para cada fracção de agregado, a pior qualidade dos agregados reciclados em comparação com os agregados naturais e a sua elevada absorção de água. Verificou-se que a maioria das investigações à data não considera estas condicionantes, avaliando composições de betão com agregados reciclados que não são representativas

da indústria do betão pronto. Após visita a centrais de betão e em conjunto com os responsáveis pela central onde foi realizada a produção industrial apresentada neste artigo, foi planeada uma campanha experimental que incidiu em estudos laboratoriais no estado fresco e endurecido e na campanha experimental aos betões produzidos em central, apresentada neste artigo. Constatou-se que as incorporações de agregado reciclado testadas, correspondentes a cerca de 5 a 10% dos agregados totais do betão, são viáveis. Estes agregados reciclados foram utilizados tal qual fornecidos pelo operador de resíduos, sem qualquer pós-processamento, e não foi necessário alterar a composição do betão.

No futuro, e com a crescente aceitação de agregados reciclados pelos agentes do sector da construção, os operadores de gestão de resíduos irão ter incentivo para melhorar o seu processo de produção (nomeadamente com melhores práticas de triagem), sendo viável produzir betão pronto com percentagens de incorporação superiores às indicadas, Realça-se, contudo, que diferentes fontes sugerem que, na União Europeia, o potencial máximo de produção de agregados reciclados de betão corresponde a cerca de 10 a 20% do total de agregados utilizados na produção de betão. Como recomendações, salienta-se a definição de processos mínimos para que os operadores de gestão de resíduos produzam agregados reciclados com qualidade para betão (segundo a NP EN 12620:2002), o estudo aprofundado da influência dos agregados reciclados na reologia do betão pronto e a optimização da composição do betão considerando as propriedades dos agregados reciclados a utilizar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do c^{5}Lab e seus associados. Os autores agradecem também o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020) e o financiamento do c^{5}Lab através da Missão Interface (01/C05-i02/2022.P264).

REFERÊNCIAS

CEMBUREAU (2016). Cement, concrete & the circular economy.

European Commission, J. R. C., Damgaard, A., Lodato, C., Butera, S.et al. (2022). Background data collection and life cycle assessment for CDW management, Publications Office of the European Union.

Khoury, E., W. Ambrós, B. Cazacliu, C. H. Sampaio e S. Remond (2018). "Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability." Construction and Building Materials **175**: 705-713.

NRMCA-P2P e W. C. Twitty (2008). Quality management system for ready mixed concrete companies. Maryland, USA, RMC Research & Education Foundation.

Pacheco, J. e J. de Brito (2021). Recycled aggregate concrete: properties and behaviour, applications and production challenges. *fib* Symposium 2021 Lisbon, Portugal.

Pacheco, J. e J. de Brito (2021). "Recycled aggregates produced from construction and demolition waste for structural concrete: constituents, properties and production." Materials **14**(19): 5748.

Pacheco, J., J. de Brito e M. Lamperti-Tornaghi (2023). Use of recycled aggregates in concrete - Opportunities for upscaling in Europe. Luxembourg, Publications Office of the European Union.

Pacheco, J., J. de Brito e J. Valencia (2022). Comportamento no estado fresco de betão pronto com incorporação de agregados grossos reciclados. JPEE2022. LNEC, Lisbon, Portugal.

Pacheco, J., J. Valencia e J. de Brito (2024). Betão pronto com agregados grossos reciclados provenientes de operadores de gestão de resíduos portugueses: Estudo laboratorial. CLBMCS 2024. Lisboa, Portugal.

Recybéton (2019). Concrete recycling: research and practice. Florida, U.S.A., CRC Press.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BETÃO PRONTO COM AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS PROVENIENTES DE OPERADORES DE GESTÃO DE RESÍDUOS PORTUGUESES: ESTUDO LABORATORIAL

João Pacheco [a]; Javier Valencia [a]; Jorge de Brito [b]

[a] CERIS, c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Portugal, jpacheco@c5lab.pt, jvalencia@c5lab.pt

[b] CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO

Este artigo estuda a incorporação de agregados reciclados em betão produzido numa central de betão pronto portuguesa e surge no âmbito de um projecto aplicado à indústria do c^{5}Lab. Partindo de uma central de betão, de um operador de gestão de resíduos e de um estudo anterior, referente ao estado fresco do betão, o artigo trata a caracterização mecânica e de durabilidade de composições de betão pronto produzidas em laboratório.

É apresentada campanha experimental definida considerando as condições operacionalmente mais favoráveis para a incorporação de agregados reciclados na central de betão. Foram testados diferentes teores de incorporação de agregado grosso reciclado, para quatro classes de resistência (C16/20 a C30/37). As composições dos betões de referência e matérias-primas foram as utilizadas na central de betão. Os agregados reciclados, de origem industrial, têm qualidade inferior ao comummente encontrado em estudos laboratoriais, que recorrem normalmente a agregados reciclados produzidos em laboratório.

Verificou-se que a substituição de 25% e de 50% do agregado natural 6/12 (cerca de 5% e 10% do total dos agregados) por agregado reciclado com a mesma granulometria é uma alternativa viável para os betões estudados. Esta comunicação é acompanhada por outra, referente à produção industrial destes betões.

PALAVRAS-CHAVE

Agregados reciclados; betão pronto; economia circular; propriedades mecânicas; durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A produção de betão com agregados reciclados (BAR) contribui para a valorização de resíduos de contrução e demolição (RCD), enquadrando-se nos objectivos da Directiva 2008/98/EC e do Plano de Acção para a Economia Circular. O estado-da-arte concorda com o uso de agregados grossos reciclados de betão (AGRB) em betão estrutural e não-estrutural, como substituto de agredados grossos naturais (AGN). O desempenho mecânico e de durabilidade e o comportamento estrutural do BAR já foi amplamente estudado pela comunidade científica e já existe enquadramento normativo para a produção de BAR. Contudo, a realidade industrial não reflecte estes desenvolvimentos. À data, os casos práticos de aplicações industriais de betão com agregados reciclados são raros (Recybéton 2019), os agentes industriais carecem de conhecimento para o uso de BAR e a maioria dos projectos de investigação realizados não considera aspectos específicos relacionados com a viabilidade operacional do recurso a AGRB em centrais de betão pronto, não sendo representativos da produção de BAR em condições industriais. Adicionalmente, a maioria dos estudos laboratoriais sobre BAR é realizada com agregados artificiais produzidos em laboratório, com qualidade superior aos produzidos pela generalidade dos operadores de gestão de resíduos.

Para demonstrar a estudar a produção de BAR pela indústria nacional de betão pronto, o c^5Lab - Sustainable Construction Materials Association desenvolveu um projecto que avaliou o desempenho de BAR com AGRB industriais, incluindo o estudo em laboratório do seu comportamento no estado fresco e endurecido, bem como produções piloto em central de betão. Este artigo trata do comportamento no estado endurecido. Outro artigo (Pacheco , Valencia et al. 2024) apresentado nesta conferência trata das produções industriais, enquanto que o estado fresco foi caracterizado em publicação anterior (Pacheco , de Brito et al. 2022), que também definiu quais os agregados reciclados e as percentagens de substituição dos AGN por agregados reciclados a estudar.

Todas as tarefas desenvolvidas pelo projecto foram definidas em colaboração com parceiros industriais e os agregados reciclados foram incorporados no betão nas mesmas condições em que foram fornecidos pelo operador de gestão de resíduos, assegurando-se a viabilidade operacional e a representatividade industrial do projecto.

2 DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGIA E OBJECTIVOS

A campanha experimental foi desenvolvida pela comparação das propriedades de BAR com diferentes teores de substituição de AGN por AGRB, com as propriedades de quatro composições análogas de betão com agregados naturais (BAN). Estas composições correspondem às especificações de betão C16/20 X0(P)Cl0,40 D22 S3; C20/25 X0(P) Cl0,40 D22 S3; C25/30 XC1(P) Cl0,40 D22 S3 e C30/37 XC2(P) Cl0,40 D22 S3. Doravante as composições serão designadas unicamente pela sua classe de resistência. As especificações e respectivas composições foram selecionadas pela central de betão por serem as mais representativas da sua produção. A incorporação de AGRB foi estudada para substituições parciais de brita 6/12 e para a substituição simultânea de 100% da brita 6/12 e da brita 12/22. A substituição dos AGN por AGRB foi concentrada em frações granulométricas do agregado grosso para minimizar a necessidade de instalar baias e tolvas na central de betão (Pacheco , Valencia et al. 2024).

Em estudo prévio (Pacheco , de Brito et al. 2022) realizado com as mesmas composições de betão e matérias-primas, foi avaliada a influência de agregados reciclados industriais no estado fresco do

betão, tendo-se concluído que os agregados reciclados produzidos actualmente por operadores de gestão de resíduos nacionais têm piores propriedades do que os agregados reciclados utilizados na maioria das publicações do estado-da-arte e que os finos, rugosidade e forma dos mesmos prejudicam a trabalhabilidade do betão. Nessa publicação, foram definidas as percentagens de incorporação de AGRB a estudar nas fases seguintes do projecto, incluindo a presente publicação. Estas percentagens de incorporação foram definidas com base nas propriedades do estado fresco do betão, incluindo ao longo do tempo, e nas alterações à composição do betão necessárias para se assegurar que o BAR tem consistência equivalente à do BAN de referência. Os objectivos da campanha experimental apresentada nesta comunicação são:

- contribuir para o estado-da-arte internacional, devido à escassez de estudos sobre o comportamento mecânico e de durabilidade de BAR produzido de acordo com práticas representativas da indústria do betão pronto.
- quantificar a influência da incorporação de AGRB, com as percentagens propostas no estudo do estado fresco do betão (Pacheco , de Brito et al. 2022), nas propriedades mecânicas e de durabilidade do betão, que se pretende que sejam reduzidas para garantir que o BAR cumpre a sua especificação;
- definir que composições de BAR deverão ser produzidas e ensaiadas em ambiente industrial, tema de outra publicação apresentada nesta conferência.

2.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram analisadas as propriedades indicadas no Quadro 1. Os provetes foram curados em câmara húmida até à data de ensaio, excepto nos ensaios de carbonatação e cloretos, em que os provetes foram retirados da câmara húmida e colocados em câmara seca 14 dias antes do início do ensaio.

Quadro 1 – Programa experimental

Propriedade	Composições	Idade	Tipo de provete	Número de provetes	Norma
Abaixamento	Todas	Após a amassadura	Cone de Abrams	1	NP EN 12350-2:2022
Resistência à compressão	Todas	7, 28 e 91 dias	Cubos de 150 mm	7 dias - 2 28 dias - 3 91 dias - 2	NP EN 12390-3:2021
Resistência à tracção por compressão diametral	Todas	28 dias	Cilindro 150 x 300 mm	2	NP EN 12390-6:2011
Módulo de elasticidade em compressão	Todas	28 dias	Cilindro 150 x 300 mm	2	LNEC E397
Absorção de água por imersão	Todas	28 dias	Cubos de 100 mm	4	LNEC E394
Profundidade de carbonatação	C25/30 e C30/37	7, 28 e 91 dias de exposição após cura de 28 dias	Cilindros de 150 x 40 mm	7 dias – 3 28 dias - 3 91 dias - 3	LNEC E391
Coeficiente de migração de iões cloreto	C25/30 e C30/37	28 e 91 dias	Cilindros de 150 x 50 mm	3	NT Build 492
Resistência à abrasão	C16/20 e C20/25	91 dias	Prismas 71 x 71 x 50 mm	3	DIN 52108 2007

O abaixamento foi ensaiado como parâmetro de controlo das amassaduras e variou entre 123 mm e 135 mm. A maior diferença para amassaduras da mesma classe de resistência foi de 9 mm, considerando-se que todas as amassaduras têm a mesma aplicabilidade e consistência equivalente.

O Quadro 2 mostra as composições de referência (BAN). Por questões de confidencialidade os teores de cimento e de fíler calcário são apresentados em conjunto, os adjuvantes não são identificados e a curva granulométrica dos agregados não é apresentada.

Quadro 2 – Composições de betão com agregados naturais (kg/m³)

Matéria-prima	C16/20 X0(P)Cl0,40 D22 S3	C20/25 X0(P) Cl0,40 D22 S3	C25/30 XC1(P) Cl0,40 D22 S3	C30/37 XC2(P) Cl0,40 D22 S3
CEMI 52.5R + fíler	240	260	290	330
Plastificante	1.0% cimento + fíler			
Superplastificante	0.4% cimento + fíler			
Agregados finos	749	707	632	572
Brita 2/6	237	236	229	214
Brita 6/12	325	328	332	341
Brita 12/22	501	502	503	504
Água efectiva	160	163	165	165

As substituições de AGN por AGRB estudadas no presente artigo são mostradas no Quadro 3 (que também mostra o aumento relativo do teor de cimento, fíler e água). As incorporações totais de AGRB 6/12 e de AGRB 6/12+AGRB 12/22 resultam em perdas de trabalhabilidade ao longo do tempo e aumento do teor de cimento relevantes e só foram estudadas nesta campanha experimental devido à escassez de estudos no estado-da-arte sobre BAR representativo da indústria.

Quadro 3 – Composições de BAR e aumento relativo do teor de fíler, cimento e água

Classe de resistência	Incorporação de brita 6/12	Incorporação de brita 12/22	AGRB / total de agregados grossos	AGRB / total de agregados	Aumento fíler, cimento e água
C16/20	25%	0	8%	4%	0.6%
	50%	0	15%	8%	1.9%
C20/25	25%	0	8%	4%	1.0%
	50%	0	16%	9%	2.7%
C25/30	25%	0	8%	4%	0.6%
	50%	0	16%	9%	1.5%
	100%	0	31%	18%	2.0%
	100%	100%	78%	44%	6.3%
C30/37	25%	0	8%	5%	0.5%
	50%	0	16%	9%	1.1%
	100%	0	32%	18%	2.2%
	100%	100%	80%	46%	6.6%

A substituição de AGN por AGRB foi feita por volume e a absorção de água dos agregados grossos, naturais e reciclados, foi compensada por imersão durante 30 minutos, seguida de secagem da superfície dos agregados. Recorreu-se a este método por ser representativo de condições industriais de sub-saturação de um agregado em aspersão (Butler 2012). Foi realizada uma amassadura de 85 litros por composição, em betoneira de eixo vertical com capacidade de mistura de 110 litros. A mistura foi realizada em ambiente interior. Todas as amassaduras, bem como a produção dos provetes, foram realizados pelo mesmo investigador. O processo de mistura caracterizou-se por: 1) introdução dos agregados e metade da água de mistura; 2) 2 min de mistura; 3) 1 min de repouso; 4)

introdução do fíler, cimento e 40% da água de mistura; 5) 6 min de mistura; 6) introdução de adjuvantes e 10% da água de mistura; 7) 3 minutos de mistura.

2.3 MATÉRIAS-PRIMAS PRIMÁRIAS E ÁGUA RECUPERADA

As matérias-primas primárias utilizadas nas amassaduras são as utilizadas pela central de betão:

- a totalidade da água de mistura é constituída por água recuperada proveniente de estação de tratamento da água. Esta água é composta por água de lavagem dos camiões e equipamentos e por água de precipitação e a sua composição é variável. A estação de tratamento inclui agitador que homogeneíza continuamente a distribuição de sólidos;
- cimento CEM I 52.5R, conforme definido na NP EN 197-1:2012;
- fíler calcário (indicações do fabricante: diâmetro D50: 8,55 µm; média de partículas< 45 µm: 85%; média partículas < 5 µm: 32% e corte superior de 170 µm);
- agregados finos: combinação de duas fracções de areia siliciosa (0/2 e 0/4);
- britas calcárias com as designações granulométricas indicadas no Quadro 2.
- plastificante multifunções com manutenção de consistência e superplastificante polimérico de elevada redução de viscosidade.

A aspersão dos agregados nas baias é feita com água da rede. À excepção dos AGRB, todas as matérias-primas foram directamente recolhidas da central ou fornecidas pelos mesmos produtores que abastecem a central. Para evitar a influência da heterogeneidade entre lotes na análise de resultados, os materiais foram fornecidos num único lote (incluindo os AGRB), excepto a água recuperada. Neste caso, foram recolhidas cinco colheitas na central, tendo-se determinado (em sala com temperatura controlada de 22º+-5º C) a massa volúmica da água como parâmetro de controlo da sua homogeneidade. Foi ensaiada uma amostra de água por dia de amassadura. A massa volúmica relativa média é de 1,086 (total de amostras: 36) e o seu coeficiente de variação é reduzido (inferior a 1%).

2.4 AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS DE BETÃO

Os AGRB estudados nesta campanha foram produzidos em operador de gestão de resíduos nacional a partir de resíduos de betão separados após recepção de RCD. Posteriormente, os resíduos de betão foram esmagados e britados em britador móvel de mandíbulas. Após a britagem, os AGRB foram crivados para as fracções estudadas (AGRB 6/12 e AGRB 12/22). A granulometria dos AGRB foi comparada com a dos AGN, sendo equivalente. Os constituintes dos AGRB foram analisados segundo a NP EN 933-11:2011. Constata-se que os resíduos de betão (constituintes do tipo “betão e argamassa” e “rocha”) constituem cerca de 95% do AGRB e que o teor de contaminantes é reduzido. A composição dos AGRB concorda com a classe ARB1 da Especificação LNEC E471.

O Quadro 4 compara as outras propriedades analisadas com os AGN. Os AGRB têm priores propriedades que os AGN, como seria expectável. A piores propriedades físicas resultam da composição do agregado (argamassas, cerâmicos e resíduos de betão são constituintes mais porosos que AGN) e do processo de britagem (britagem em britador de mandíbulas, enquanto que os AGN foram britados em britador de mandíbulas seguido de moinho de martelos). O azul de metileno sugere a presença de matéria argilosa, que para percentagens superiores de incorporação do AGRB poderá ter causado perda de trabalhabilidade e de resistência (Pacheco , de Brito et al. 2022). Das propriedades analisadas, os AGRB cumprem os

requisitos para pertencer à classe ARB2 da LNEC E471. Esta avaliação não considerou ensaios químicos, que não foram realizados.

Quadro 4 – Propriedades dos agregados

Propriedade	Norma	Agregado grosso natural			AGRB	
		2/6	6/12	12/22	6/12	12/22
Absorção de água 24 h	NP EN 1097-6:2016	2.50%	2.30%	2.80%	6.50%	6.30%
Massa volúmica saturada com sup. seca (kg/m^3)	NP EN 1097-6:2016	2351	2643	2597	2495	2463
Massa volúmica seca (kg/m^3)	NP EN 1097-6:2016	2293	2584	2527	2345	2317
Índice de forma	EN 933-4: 2008	-	18	24	32	26
Índice de achatamento	NP EN 933-3:2014	-	17	10	9	14
Abrasão - Desgaste Los Angeles	NP EN 1097-2:2020	-	29		40	
Teor de finos	NP EN 933-1:2014	2.1%	1.0%	0.4%	2.8%	3.9%
Equivalente de areia	EN 933-8: 2002	16%			21%	
Azul de metileno 0/0.0125 mm (g/kg)	NP EN 933-9:2009+A1	4.0			8.1	

Comparando as propriedades destes AGRB, produzidos em ambiental industrial, com as propriedades de AGRB típicos do estado da arte, tendo como base a meta-análise de (Silva, de Brito et al. 2014), confirma-se que as propriedades dos AGRB industriais são piores que as da maioria dos AGRB da literatura (tipicamente produzidos em ambiente laboratorial e a partir de resíduos artificiais de betão).

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.1.1 Resistência à compressão

A incorporação dos AGRB reduziu a resistência à compressão dos betões, sendo esta resistência tanto maior quanto a percentagem de incorporação de AGRB. As Figuras 1 e 2 mostram os resultados para as classes de resistência C25/30 e C30/37. O desvio-padrão é indicado em barras de erro.

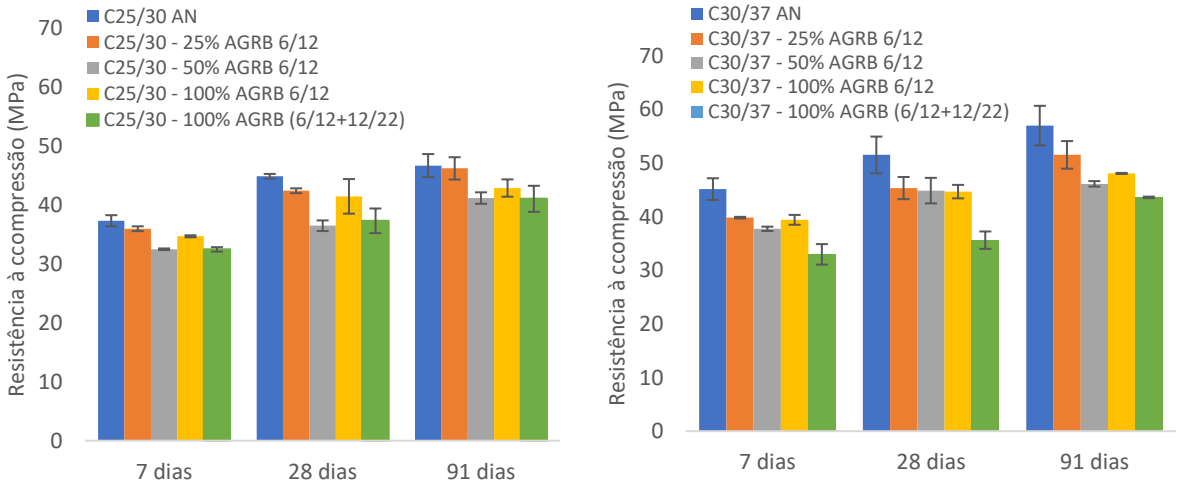


Figura 5 – Resistência à compressão em cubos de 150 mm. Esquerda: C25/30; direita: C30/37

Como foram ensaiadas amassaduras com aumentos da percentagem de incorporação de AGRB reduzidos entre si (Quadro 3), a diferente entre as propriedades de amassaduras com teores de AGRB próximos tende a ser reduzida. Assim, parte das amassaduras não respeitou a tendência associada aos AGRB devido à variabilidade intrínseca dos ensaios laboratoriais (caso da amassadura C25/30 com 100% de AGRB 6/12, cuja resistência à compressão média foi superior à da amassadura C25/30 com 50% de AGRB 6/12).

No caso dos betões C16/20 e C20/25, observou-se reduções de resistência acentuadas com a incorporação de AGRB (Figura 2). Tal é contrário ao expectável pois a influência dos AGRB na resistência deveria ser superior no caso de betões de resistência mais elevada. A resistência muito semelhante das amassaduras com 25% e 50% de AGRB concorda com a hipótese de que a incorporação de AGRB tem efeitos reduzidos nas classes de resistência mais reduzidas.

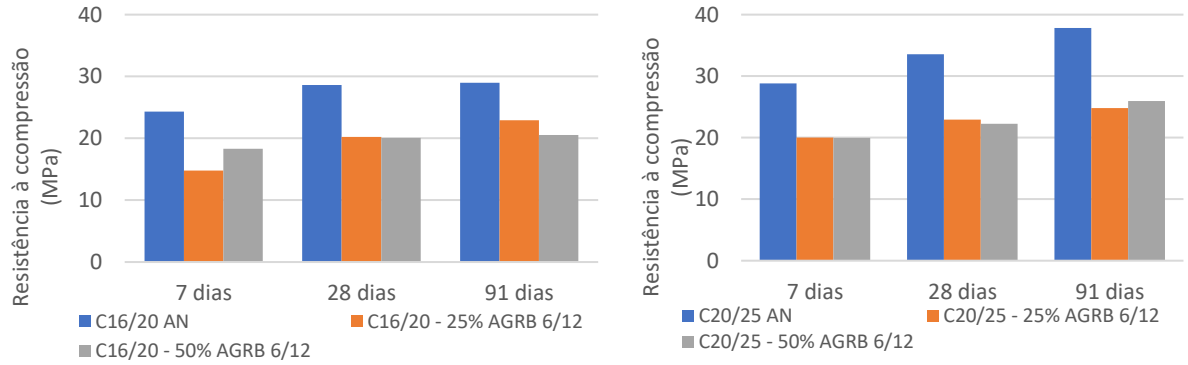


Figura 2 – Resistência à compressão em cubos de 150 mm: C16/20 e C20/25

3.1.2 Resistência à tracção

A Figura 3 mostra os resultados da resistência à tracção por compressão diametral. Tal como para a resistência à compressão, a incorporação de AGRB diminui esta propriedade. Tal é justificado pela menor resistência dos AGRB em comparação com os AGN, observando-se superfícies de rotura que atravessa os AGRB, ao invés de os contornar, o que só foi observado para os AGN em casos pontuais.

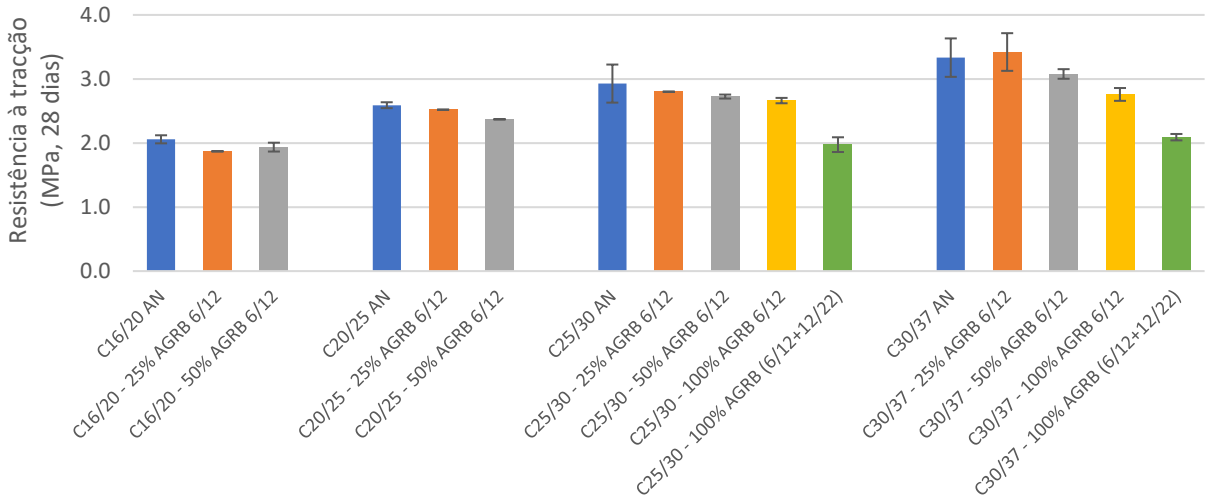


Figura 3 – Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

3.1.3 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade em compressão são mostrados na Figura 4, que concorda com o exposto nas secções anteriores: i) com o aumento da classe de resistência do betão, o módulo de elasticidade aumenta; e ii) a incorporação de AGRB diminui o módulo de elasticidade.

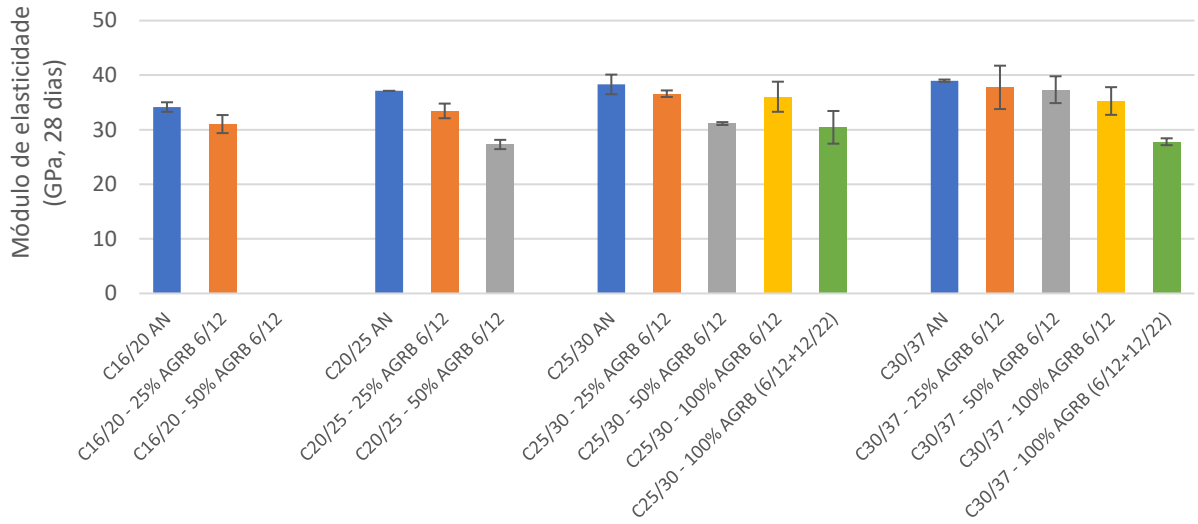


Figura 4 – Módulo de elasticidade aos 28 dias

O estado-da-arte é consensual no que respeita à influência da incorporação de AGRB nesta propriedade: devido à argamassa aderida, os AGRB têm maior porosidade e menor rigidez que os AN e a sua incorporação reduz directamente o módulo de elasticidade. Sendo esta propriedade avaliada em regime elástico, a influência dos AGRB é proporcional à percentagem de substituição dos AN por AGRB. Por imprevistos experimentais, o módulo de elasticidade da amassadura C16/20 50% AGRB 6/12 não foi ensaiado.

3.1.4 Perda por abrasão

Os resultados de perda por abrasão variaram entre 0.26 e 0.23 (C16/20) e entre 0.20 e 0.21 (C20/25). Os desvios-padrão da maioria das amostras foram de cerca de 0.25. A incorporação de AGRB não afectou esta propriedade, que tipicamente melhora com a incorporação de agregados reciclados no betão, devido à sua rugosidade (Bravo, de Brito et al. 2015). A reduzida percentagem de incorporação de AGRB em relação ao total de agregados da mistura (Quadro 3) é a principal razão para estes resultados.

3.1.5 Relações constitutivas

As relações constitutivas entre a resistência à compressão e a resistência à tracção e o módulo de elasticidade da NP EN 1992-1 são comparadas com os resultados experimentais para as diferentes percentagens de substituição dos AN por AGRB. Em estudo anterior (Pacheco, de Brito et al. 2019), quantificou-se a influência da incorporação de AGRB nas relações constitutivas através de meta-análise para BAR produzido com 100% de substituição de AN por AGRB, tendo-se observado que as previsões da NP EN 1992-1 podem não ser adequadas para BAR (por exemplo, para a previsão da resistência à tracção de betão com resistência superior a 50 MPa). Esta meta-análise foi realizada predominantemente com estudos que recorreram a AGRB laboratoriais, de qualidade superior aos AGRB industriais utilizados nesta

publicação. Pretende-se neste artigo compreender se a substituição reduzida de AN por estes AGRB resulta em betões com propriedades concordantes com as expectativas da NP EN 1992-1.

A Figura 5 mostra as relações constitutivas, assinalando também todas as amassaduras ensaiadas. As resistências à compressão experimentais foram convertidas em resistências cilíndricas multiplicando por um factor de 0,80. Como a NP EN 1992-1 estima a resistência média à tracção através da resistência à compressão característica, foi necessário estimar o valor característico com base nos resultados experimentais. O valor característico (percentil 5%) foi determinado a partir da resistência à compressão média e do desvio-padrão amostral de cada amassadura e assumindo uma distribuição normal para a resistência à compressão. Não se considerou a incerteza estatística associada ao reduzido número de provetes ensaiados (3) pois o objectivo desta análise é comparar os resultados experimentais com as previsões regulamentares e não estimar conservativamente valores característicos. A resistência à tracção por compressão diametral foi assumida como equivalente à resistência à tracção uniaxial devido a recomendação do Model Code 2010 (*fib* 2010).

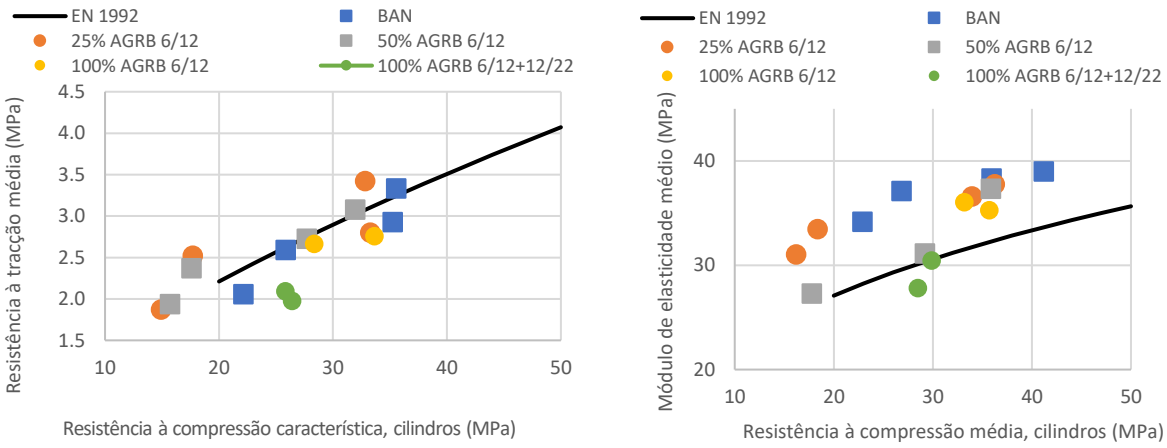


Figura 5 – Comparação das relações constituivas da NP EN 1992-1 com os resultados experimentais

A relação constitutiva para a resistência à tracção concorda com os resultados experimentais, enquanto que o módulo de elasticidade é subestimado pela relação constitutiva, o que pode ser devido às características do maciço rochoso de onde foram extraídos os AGN, como especificamente referido para AGN calcários em documento referente à segunda geração da NP EN 1992-1 (Müller 2018). A incorporação de AGRB só afecta a aproximação dos resultados experimentais às relações constitutivas para a maior incorporação de AGRB testada (100% de AGRB 6/12 e 100% de AGRB 12/22), que corresponde a cerca de 45% do total de agregados no betão. As outras composições ensaiadas têm teor de AGRB inferior a 20% do total dos agregados, valor limite da especificação LNEC E471 para a produção de BAR estruturais com agregados reciclados da classe ARB2, sem necessidade de ensaios específicos.

3.2 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

3.2.1 Absorção de água por imersão

A Figura 6 mostra que a absorção de água por imersão diminui com o aumento da classe de resistência do betão (devido à menor porosidade do betão), mas aumenta com a incorporação de AGRB, pois a incorporação de AGRB aumenta a porosidade do betão. Os aumentos observados são substanciais quando comparados com as percentagens de substituição e devem-se à pior qualidade destes AGRB em

relação aos AGRB laboratoriais utilizados na maioria das investigações do estado-da-arte. Sendo estes agregados mais porosos e tendo maior absorção de água que o expectável (Quadro 3), tenderão a resultar em betões com maior absorção de água que um BAR de um estudo laboratorial típico. Recorda-se que os AGRB foram utilizados em condições de sub-saturação.

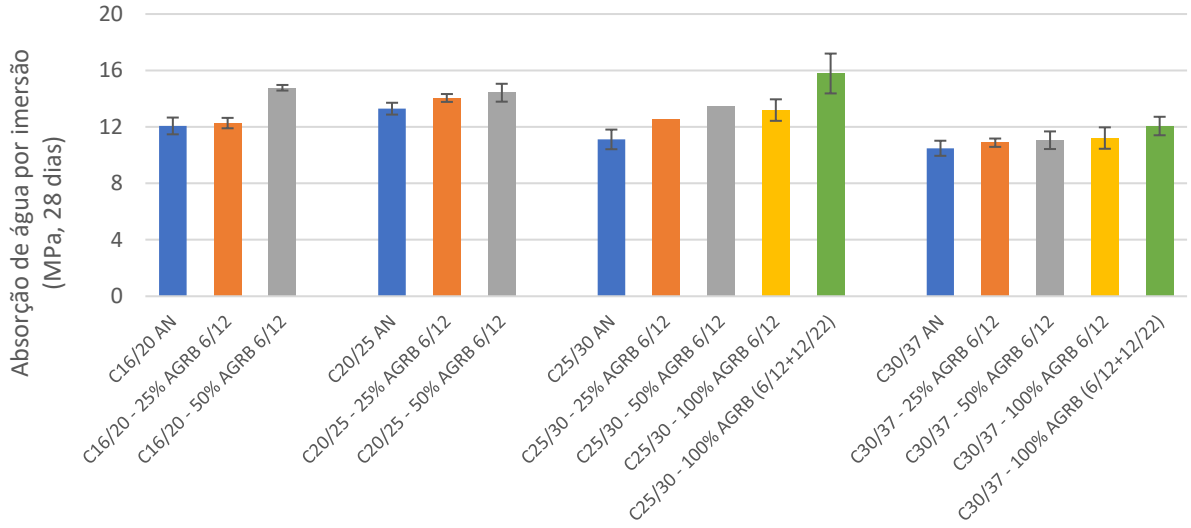


Figura 6 – Absorção de água por imersão

3.2.2 Profundidade de carbonatação

A Figura 7 mostra uma tendência muito clara para a incorporação de AGRB aumentar a profundidade de carbonatação dos betões. Esta tendência concorda com os resultados de absorção de água por imersão. Contudo, a magnitude do aumento de profundidade de carbonatação é superior ao expectável para as duas classes de resistência, especialmente aos 91 dias. A influência dos AGRB foi mais relevante para a classe C25/30 do que para a classe C30/37, pois os mecanismos de transporte são menos afectados pela porosidade dos AGRB quanto menor a porosidade da matriz cimentícia (Thomas, Setién et al. 2013).

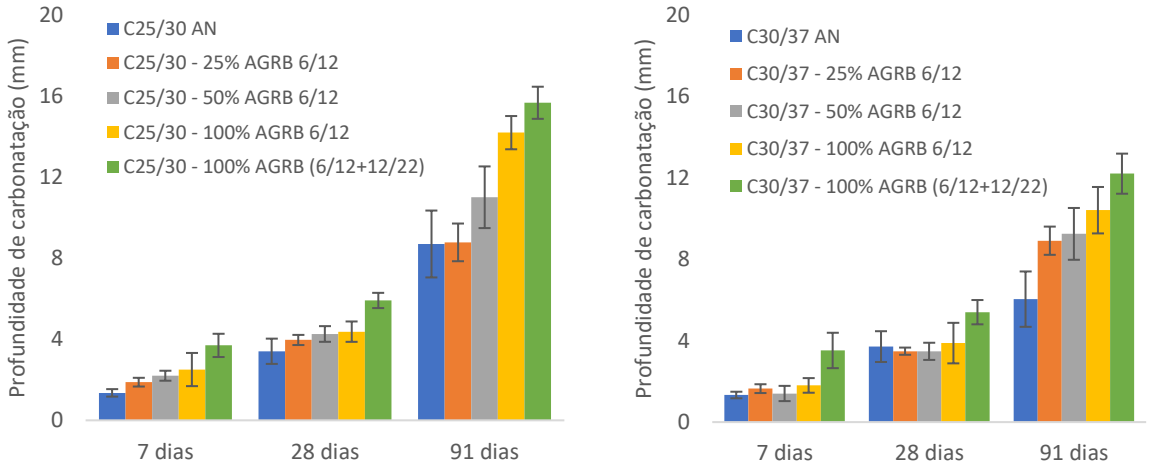


Figura 7 – Profundidade de carbonatação

3.2.3 Coeficiente de migração de iões cloreto

O coeficiente de migração de iões cloreto acompanhou a tendência observada para a profundidade de carbonatação: o efeito negativo dos AGRB nesta propriedade foi superior ao observado para as propriedades mecânicas, sendo relevante mesmo para as menores percentagens de incorporação analisadas. Tal como no caso da carbonatação, a influência dos AGRB foi superior para o betão mais poroso: para a máxima substituição testada, correspondente à substituição de cerca de 45% dos agregados totais (Quadro 3), esta propriedade aumentou 76% (C25/30) e 59% (C30/37). Recorda-se que estas composições não são especificadas para classes de exposição ambiental XS, tendo esta propriedade sido estudada para complementar o estado-da-arte.

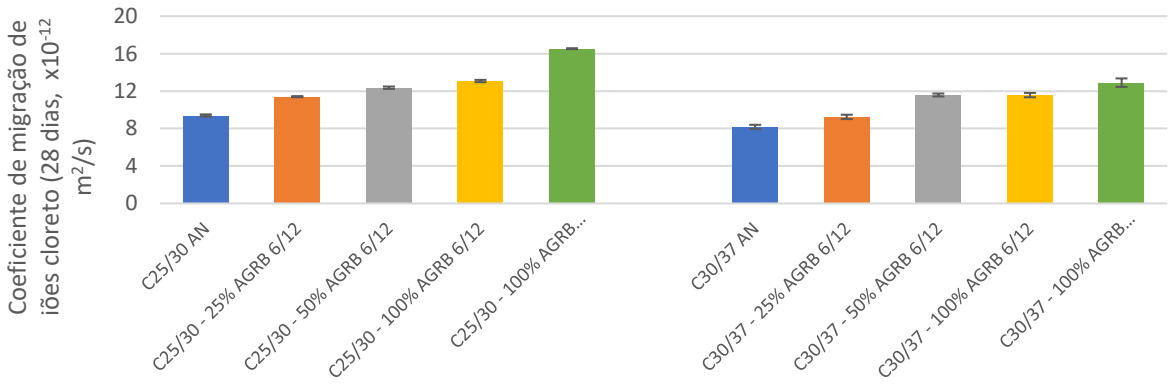


Figura 8 – Coeficiente de migração de iões cloreto aos 28 dias.

4 CONCLUSÕES

Este artigo avalia as propriedades mecânicas e de durabilidade de composições de betão pronto produzidas com agregados reciclados industriais. A campanha experimental foi realizada em ambiente laboratorial e fundamenta as opções tomadas em produções piloto de betão pronto com agregados reciclados, apresentadas noutro artigo realizado no âmbito desta conferência (Pacheco , Valencia et al. 2024).

O artigo discute a valorização de RCDs como agregados reciclados para betão, apresentando um aspecto que limita o estado-da-arte: a maioria das investigações é realizada com agregados reciclados artificiais, com melhores propriedades que as expectáveis em produções industriais. Esta limitação é particularmente relevante no contexto actual, em que os operadores de gestão de resíduos não estão capacitados para a produção de agregados reciclados de qualidade.

Foi planeada campanha experimental, articulada com central de betão pronto e recorrendo a composições de betão e matérias-primas da central. A campanha experimental foi concebida de acordo com as preferências da central (por exemplo: concentração dos agregados reciclado numa fracção de agregado grosso). Após campanha experimental anterior, referente ao estado fresco, esta campanha avaliou a viabilidade dos betões em estudo, de quatro classes de resistência, no que respeita às suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Verificou-se que as propriedades do betão foram afectadas pela incorporação dos agregados reciclados. Para substituições reduzidas de agregado reciclado (substituição de um quarto a metade da brita 6/12, correspondendo a 4% a 9% do total dos agregados da mistura), as propriedades mecânicas do betão são afectadas de forma reduzida e as relações constitutivas previstas na NP EN 1992-1 podem ser aplicadas. Recomenda-se que estes agregados reciclados não sejam utilizados em betões expostos a condições ambientais XS devido à sua

influência no coeficiente de migração de iões cloreto, mesmo para percentagens de incorporação reduzidas. Os resultados de profundidade de carbonatação aos 91 dias também sugerem que estes agregados podem comprometer a durabilidade de betão exposto a ambientes propensos a carbonatação, apesar de a profundidade de carbonatação aos 28 dias não ter sido afectada para incorporações de agregado reciclado reduzidas.

Com base nos resultados da campanha experimental, as produções piloto em ambiente industrial apresentadas em (Pacheco , Valencia et al. 2024) serão realizadas com incorporações de 25% e 50% de agregado reciclado, para as quatro classes de resistência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do c^{5}Lab e seus associados. Os autores agradecem também o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020) e o financiamento do c5Lab através da Missão Interface (01/C05-i02/2022.P264).

REFERÊNCIAS

Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008 , relativa aos resíduos e que revoga certas directivas, JO L 312 de 22.11.2008.

Bravo, M., J. de Brito, J. Pontes and L. Evangelista (2015). "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." Journal of Cleaner Production **99**: 59-74.

Butler, L. (2012). Evaluation of Recycled Concrete Aggregate Performance in Structural Concrete. PhD, University of Waterloo.

fib (2010). Bulletin 65: Model Code 2010 final draft. Volume 1. Lausanne, Switzerland**:** 357.

Müller, H. S. (2018). "prEN 1992-1-1:2018: Background document to subsection 5.1, annex B and annex D Concrete." CEN/TC250/SC2/WG1/TG7.

Pacheco, J., J. de Brito, C. Chastre and L. Evangelista (2019). "Scatter of constitutive models of the mechanical properties of concrete: comparison of major international codes." Journal of Advanced Concrete Technology **17**(3): 102-125.

Pacheco , J., J. de Brito and J. Valencia (2022). Comportamento no estado fresco de betão pronto com incorporação de agregados grossos reciclados. JPEE2022. LNEC, Lisbon, Portugal.

Pacheco , J., J. Valencia and J. de Brito (2024). Betão pronto com agregados grossos reciclados provenientes de operadores de gestão de resíduos portugueses: Implementação industrial. CLBMCS 2024. Lisboa, Portugal.

Recybéton (2019). Concrete recycling: research and practice. Florida, U.S.A., CRC Press.

Silva, R. V., J. de Brito and R. K. Dhir (2014). "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production." Construction and Building Materials **65**: 201-217.

Thomas, C., J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos and M. Sánchez de Juan (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." Construction and Building Materials **40**: 1054-1065.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Adriana Dias [a]; João Pacheco [a]; José Silvestre [b]; Isabel Martins [c]; Jorge de Brito [b]

[a] c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Portugal, adias@c5lab.pt, jpacheco@c5lab.pt

[b] CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt, jb@civil.ist.utl.pt

[c] LNEC, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, imartins@lnec.pt

RESUMO

Para promover a circularidade dos produtos de construção, é necessário adoptar medidas que promovam a diminuição da extracção de recursos naturais e o aumento da reciclagem e da reutilização de materiais. No caso das argamassas, esta questão pode passar pela substituição dos agregados naturais, usados na sua composição, por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Neste contexto, esta comunicação apresenta uma avaliação ambiental comparativa do ciclo de vida, do berço ao portão ("*cradle-to-gate*"), de dois tipos de argamassas (revestimento e assentamento) produzidas com agregados naturais e com agregados reciclados. Estas argamassas foram definidas em conjunto com um produtor português, recorrendo a distâncias de transporte, composições e matérias-primas representativas. Inicialmente, foi feita a caracterização da produção actual, na qual são utilizados agregados naturais, provenientes de uma pedreira e, posteriormente, foram consideradas várias percentagens de substituição destes por agregados reciclados, procedentes de um operador de gestão de resíduos. Os resultados dos impactes ambientais foram comparados através da metodologia de avaliação do ciclo de vida. Foi possível verificar que, na fase da extracção e processamento das matérias-primas, a redução de impactes variou entre 0,5% e 2% para as categorias mais relevantes para este estudo (potencial de aquecimento global e potencial de depleção de recursos abióticos fósseis). Na fase de transporte, a redução dos impactes chegou a 15%, em ambas as categorias. Em termos globais, considerando toda a fase de produto, foram registados ligeiros benefícios ambientais (diminuição dos impactes até 2%), com a incorporação de cerca de 30% de material reciclado.

Palavras-chave: agregados reciclados, argamassas, avaliação do ciclo de vida, resíduos de construção e demolição.

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos de construção e demolição (RCD), a sua reciclagem e o seu reaproveitamento têm sido algumas das grandes preocupações do sector da construção (Duan *et al.* 2019). A introdução de agregados reciclados (AR), provenientes de RCD, em argamassas é uma das alternativas estudadas com o intuito de diminuir a deposição de resíduos em aterro e, consequentemente, reduzir a extracção de recursos naturais. Deste modo, foram já realizados vários estudos que comprovam a viabilidade da produção de argamassas com AR.

Corinaldesi e Moriconi (2009) analisaram o desempenho de argamassas com AR (provenientes de resíduos de betão da indústria de pré-fabricação, de tijolos e de RCD) e concluíram que a resistência mecânica tende a ser inferior à das argamassas com agregados naturais (AN), embora outras características possam melhorar (por exemplo, os autores observaram melhorias de aderência). Silva *et al.* (2016) realizaram uma revisão bibliográfica sobre o efeito da incorporação de AR provenientes de RCD em argamassas, tendo constatado que a introdução de AR pode comprometer o desempenho de algumas argamassas (especialmente aquelas que têm uma baixa relação água/cimento). No entanto, o comportamento da maioria das argamassas foi semelhante ao das argamassas com AN. Martínez-García *et al.* (2022) compararam as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas com AN e agregados finos reciclados de betão, considerando várias percentagens de incorporação (0, 25, 50 e 100%). Concluíram que a absorção de água é muito superior nas argamassas com AR, sendo que, para uma substituição de 100% dos AN, é necessário adicionar mais de 50% de água à mistura para obter a mesma trabalhabilidade e fluidez e o aumento da taxa de incorporação de AR resultou numa diminuição da densidade e das resistências à compressão e à flexão das argamassas. No estudo destes autores, a argamassa com 25% de incorporação de AR apresentou o melhor desempenho. Borges *et al.* (2023) estudaram a influência da substituição de AN por AR de RCD em argamassas, sendo as percentagens de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. Em termos de propriedades físico-mecânicas, as argamassas com AR tiveram um comportamento satisfatório, de acordo com as normas europeias. No entanto, apenas são recomendadas substituições até 50%.

Em relação ao estudo do impacte ambiental (IA), Cuenca-Moyano *et al.* (2019) recorreram à metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) para comparar o IA de argamassas com AN e AR. Foram consideradas duas taxas de incorporação de AR, de 25 e 50%. Os limites do sistema considerados foram do berço ao portão ("*cradle-to-gate*") e a unidade funcional 1 t de argamassa de alvenaria seca. A maioria dos dados do inventário foram recolhidos no local. Os resultados demonstraram que a introdução de AR nas argamassas resulta numa diminuição do IA na maioria das categorias de impacte (até cerca de 4% na categoria alterações climáticas - total (GWP-total) e 7% na categoria depleção dos recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP-fossil)), em grande parte por ser evitada a deposição de resíduos em aterro (os autores consideraram também os impactes evitados). No entanto, o aumento da distância de transporte dos AR em relação aos AN leva a um ligeiro aumento do IA na categoria de ecotoxicidade. Grabois *et al.* (2020) estudaram o desempenho ambiental, através de uma avaliação de impacte do ciclo de vida, de argamassas produzidas com AR de betão, provenientes da demolição de um edifício. As percentagens de substituição dos agregados foram de 15, 25 e 50%. Os limites do estudo foram do berço ao portão ("*cradle-to-gate*") mas foram também considerados os impactes evitados devido ao uso de AR. A unidade utilizada foi 1 m^3 de argamassa. Apesar da trabalhabilidade das argamassas diminuir, a resistência à compressão aumentou e os impactes ambientais diminuíram (cerca de 13 e 14% nas categorias ADP-fossil e depleção do ozono (ODP), respectivamente), com o aumento da percentagem de substituição de AN por AR. Os autores concluíram também que a distância de transporte de todas as matérias-primas é um dos parâmetros mais influentes para os resultados finais.

A inovação do presente estudo prende-se com o facto de ser o primeiro estudo de ACV, realizado com dados reais de uma fábrica em Portugal, de um ano de referência, que compara os IA de argamassas com AN e AR.

2 CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS

Neste estudo, são considerados dois tipos de argamassas: uma de revestimento (de acordo com a NP EN 998-1:2017) e uma de assentamento (de acordo com a NP EN 998-2:2016). A composição destas argamassas é baseada num caso de estudo industrial nacional, assumindo que são utilizados agregados calcários com as seguintes fracções granulométricas:

- calcário L1: entre 1 e 4 mm;
- calcário L2: entre 0,5 e 2 mm;
- calcário L3: entre 0,5 e 1 mm;
- calcário L4: entre 0 e 0,5 mm.

A substituição, em massa, destes AN por AR mistos é feita de três modos distintos (substituição de 10% de todos os AN, substituição de 100% do calcário L1 e substituição de 100% do calcário L4), de acordo com o esquema apresentado no Quadro 1. Estas percentagens de substituição foram definidas assumindo duas vias para a incorporação de AR na fábrica de argamassa: a aplicação consistente de uma fracção reduzida de AR cobrindo todas as fracções granulométricas da argamassa, ou a substituição total de todo o agregado correspondente a uma fracção granulométrica (na prática, a duplicação de um silo da fábrica de argamassa).

Quadro 1 - Percentagens de substituição dos AN por AR

Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
10% AN	10% AN
100% L4	100% L1
	100% L4

Deste modo, é apresentada no Quadro 2 a proporção de AR em relação ao total de agregados em cada argamassa, bem como a quantidade de AR (em kg) por tonelada de argamassa.

Quadro 2 - Quantidade de agregado por argamassa e percentagem de AR (em massa) por percentagem de substituição de AN

	Total de agregados	10% AN		100% L1		100% L4	
	kg	% AR	kg AR	% AR	kg AR	% AR	kg AR
Argamassa de revestimento	464	10	46	-	-	62	290
Argamassa de assentamento	710	10	71	25	180	37	260

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Definição do objectivo e do âmbito

O objectivo deste estudo é comparar o IA da produção de dois tipos de argamassa, produzidas com AN, com o de argamassas equivalentes com substituição parcial dos AN por AR. Para tal, foram calculados o IA associados à produção das argamassas com AN numa fábrica nacional, tendo-se depois

assumido diferentes cenários de substituição de AN por AR.

2.2.2 Unidade declarada

A unidade declarada considerada é 1 tonelada de argamassa seca, sendo esta a unidade de medida da produção utilizada por defeito na fábrica.

2.2.3 Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema definidas neste estudo são do berço ao portão ("*cradle-to-gate*"), ou seja, englobam apenas a etapa de produto (A1-A3):

- A1: extracção e processamento de matérias-primas;
- A2: transporte (do local de produção para a fábrica de argamassas);
- A3: produção (da argamassa).

2.2.4 Inventário do ciclo de vida

A recolha de dados para o inventário do ciclo de vida foi efectuada localmente, através de um questionário, após a visita às instalações da fábrica. Para tal, foi considerado um ano típico de produção, neste caso 2021. Este conjunto de dados incluiu a quantidade e o tipo de matéria-prima necessários à produção dos dois tipos de argamassa bem como os respectivos transportes, os consumos de electricidade (associados aos diversos equipamentos utilizados no processo de produção) e combustível (consumido por alguns equipamentos de transporte interno) e a produção de resíduos. Os consumos associados à produção (A3) de cada tipo de argamassa foram determinados por alocação de massa, considerando que os impactes associados à fase de produção de todos os tipos de argamassa são equivalentes. Por questões de confidencialidade, não são apresentadas as composições das argamassas. No entanto, no Quadro 2, são apresentadas as quantidades de AN e AR de cada argamassa. Em relação às distâncias de transporte, a pedreira que fornece os AN está localizada a 39 km da fábrica de argamassas e o operador de gestão de resíduos (OGR) a 18 km.

A modelação foi realizada recorrendo ao *software* SimaPro 9.1.0.11 e a maior parte dos processos foi retirada da base de dados Ecoinvent 3.6, à excepção dos agregados calcários, do fíler, da sílica e do cimento, que foram retirados da base de dados ELCD. Adicionalmente, foi necessário recorrer a Declarações Ambientais de Produto (DAP) para obter o IA do hidrófugo (EFCA 2021) e dos AR (Argent Materials 2021; ASAC 2018; CAVIT 2023; D.A. Mattsson 2022; FdA 2022; Greenstone Recycling 2020; Green Vision Recycling 2022). Para estes últimos, foi calculada uma média ponderada de impactes, considerando os resultados obtidos nas DAP. Os resultados dos impactes ambientais por tonelada de AN e AR encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 - Impactes ambientais da produção de AN e AR, por tonelada de agregado

	AN	**AR**
GWP-total (kg CO_2 eq)	2,47E+00	1,14E+00
ADP-fossil (MJ)	4,23E+01	1,59E+01

2.2.5 Metodologia e selecção das categorias de impacte

A avaliação do impacte foi determinada segundo a NP EN 15804:2012+A2:2019, sendo os impactes calculados para as categorias especificadas na norma: alterações climáticas - total (GWP-total), alterações climáticas - combustíveis fósseis (GWP-fossil), alterações climáticas - biogénico (GWP-biogenic), alterações climáticas - uso do solo e alterações no uso do solo (GWP-luluc), depleção do

ozono (ODP), acidificação (AP), eutrofização aquática fluvial (EP-freshwater), eutrofização aquática marinha (EP-marine), eutrofização terrestre (EP-terrestrial), formação de ozono fotoquímico (POCP), depleção dos recursos abióticos - minerais e metais (ADP-minerals&metals), depleção dos recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP-fossil) e uso da água (WDP).

No entanto, por uma questão de simplificação, esta comunicação analisa apenas os resultados em termos de GWP-total e ADP-fossil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

O IA das argamassas com AN foi calculado inicialmente de acordo com a produção corrente da fábrica. Posteriormente, foi determinado o IA das argamassas com AR, substituindo a respectiva quantidade de AN por AR e recalculando as distâncias de transporte dos agregados. Todos os restantes parâmetros permaneceram inalterados.

As Figura 1 e Figura 2 representam graficamente a comparação do IA, em termos de GWP-total e ADP-fossil, respectivamente, na fase de extracção e processamento de matérias-primas (A1) da argamassa de assentamento com AN e diferentes incorporações de AR. Em termos visuais, a diferença de impactes é pouco perceptível, tendo em conta que a grande maioria dos impactes nesta fase está associada ao cimento (cerca de 94% para o GWP-total e entre 77% e 78% para o ADP-fossil).

No Quadro 4, é apresentada em percentagem a redução do IA das argamassas após a incorporação dos vários teores de AR. Deste modo, é possível concluir que a menor redução de IA está associada a menores substituições de AR (neste caso 46 kg de AR para a argamassa de revestimento e 71 kg para a argamassa de assentamento). Pelo contrário, a maior de redução de IA verifica-se quando se substitui 100% da fracção com maior peso (neste caso, 290 kg de AR para a argamassa de revestimento, representando 62% dos agregados, e 260 kg para a argamassa de assentamento, representando 37% dos agregados).

Em termos de transporte (A2), a diminuição dos impactes é mais perceptível (Figura 3 e Figura 4) visto que a distância de transporte dos AR corresponde a cerca de metade da distância de transporte dos AN e a quantidade de AR varia entre 10% e 37% do peso total dos agregados.

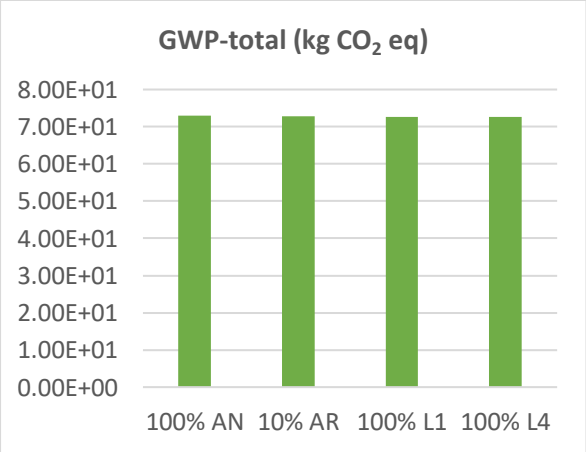


Figura 1 - GWP-total da fase A1 da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR, por tonelada de argamassa

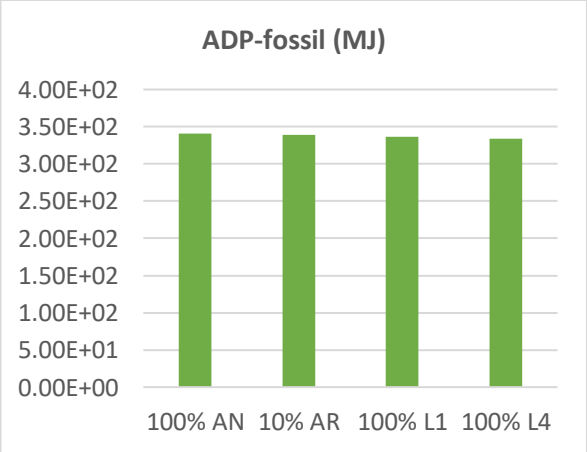


Figura 2 - ADP-fossil da fase A1 da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR, por tonelada de argamassa

Quadro 4 - Alterações no IA da fase A1 das argamassas após a introdução dos AR

	Argamassa de revestimento		Argamassa de assentamento	
	GWP-total	**ADP-fossil**	**GWP-total**	**ADP-fossil**
10% AR	-0,1%	-0,3%	-0,1%	-0,6%
100% L1	-	-	-0,3%	-1,4%
100% L4	-0,5%	-1,9%	-0,5%	-2,0%

De acordo com o Quadro 5, observa-se, mais uma vez, maiores reduções de IA nas argamassas com maiores quantidades de AR, devido à redução da distância de transporte.

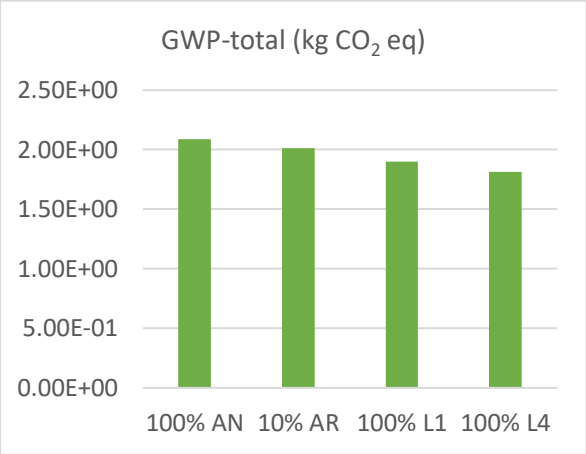


Figura 3 - GWP-total da fase A2 da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

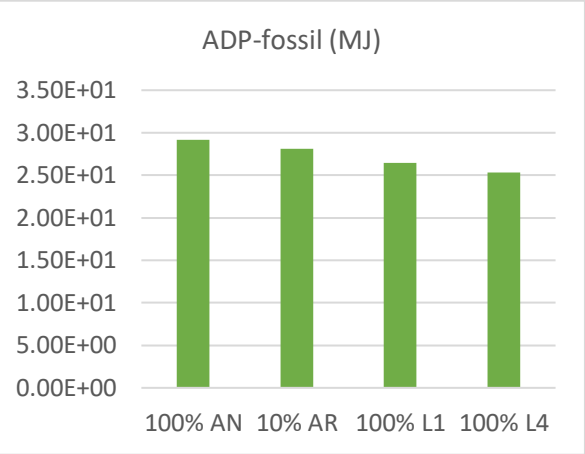


Figura 4 - ADP-fossil da fase A2 da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

Quadro 5 - Alterações no IA da fase A2 das argamassas após a introdução dos AR

	Argamassa de revestimento		Argamassa de assentamento	
	GWP-total	**ADP-fossil**	**GWP-total**	**ADP-fossil**
10% AR	-2,4%	-2,4%	-3,6%	-3,6%
100% L1	-	-	-9,1%	-9,1%
100% L4	-14,9%	-14,9%	-13,2%	-13,2%

As Figura 5 e Figura 6 apresentam a comparação do IA, em termos de potencial de aquecimento global total e potencial de depleção de recursos abióticos fósseis, respectivamente, de toda a etapa de produto (fases A1-A3) da argamassa de assentamento com AN e diferentes incorporações de AR. Verifica-se que, em termos globais, as variações de impacte ambiental com a introdução de AR são muito reduzidas.

Deste modo, é observada uma diminuição do potencial de aquecimento global total de:

- 0,3% com a substituição de 10% dos AN;
- 0,9% com a substituição do calcário L1;
- 1,2% com a substituição de 100% do calcário L4.

No caso do potencial de depleção dos recursos abióticos fósseis, a diminuição de impactes é de:

- 0,5% com a substituição de 10% dos AN;
- 1,3% com a substituição de 100% do calcário L1;
- 1,9% com a substituição de 100% do calcário L4.

O Quadro 6 apresenta a alteração no IA total (A1-A3) dos dois tipos de argamassa estudados, após a incorporação de AR. Verifica-se que a redução de impactes das duas argamassas é equivalente.

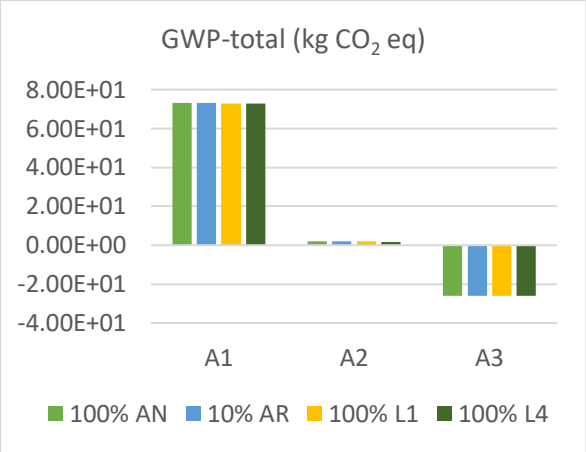


Figura 5 - GWP-total da etapa de produto (A1-A3) da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

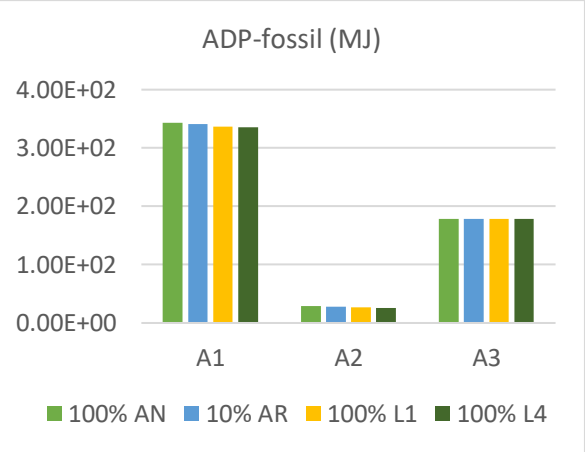


Figura 6 - ADP-fossil da etapa de produto (A1-A3) da argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

Quadro 6 - Alterações no IA das fases A1-A3 das argamassas após a introdução dos AR

	Argamassa de revestimento		Argamassa de assentamento	
	GWP-total	**ADP-fossil**	**GWP-total**	**ADP-fossil**
10% AR	-0,2%	-0,3%	-0,3%	-0,5%
100% L1	-	-	-0,9%	-1,3%
100% L4	-1,4%	-2,0%	-1,2%	-1,9%

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Analisando apenas os impactes associados à produção dos AN e AR necessários para a produção da argamassa de assentamento, em termos de potencial de aquecimento global total, observa-se reduções de 5% com a substituição de 10% dos AN, 14% com a substituição de 100% do calcário L1 e 20% com a substituição de 100% do calcário L4 (Figura 7). Em termos de potencial de depleção dos recursos abióticos fósseis, observa-se uma redução de 6% com a substituição de 10% dos AN, 16% com a substituição de 100% do calcário L1 e 23% com a substituição de 100% do calcário L4 (Figura 8).

O Quadro 7 apresenta, em resumo, a alteração no IA da produção dos agregados após a incorporação de AR nos dois tipos de argamassas estudadas. A maior redução de impactes ocorre para a argamassa de revestimento, na qual são substituídos 62% dos AN por AR (correspondendo à substituição de 100% do calcário L4). A menor redução ocorre em todas as argamassas cuja percentagem de substituição é de apenas 10% em todas as fracções de AN calcário.

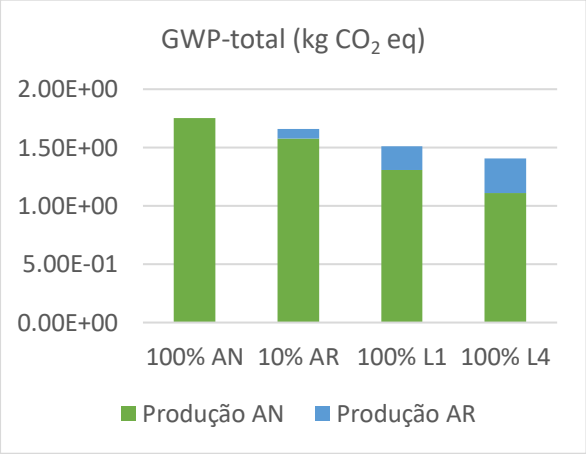


Figura 7 - GWP-total da produção de agregados (A1) para a argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

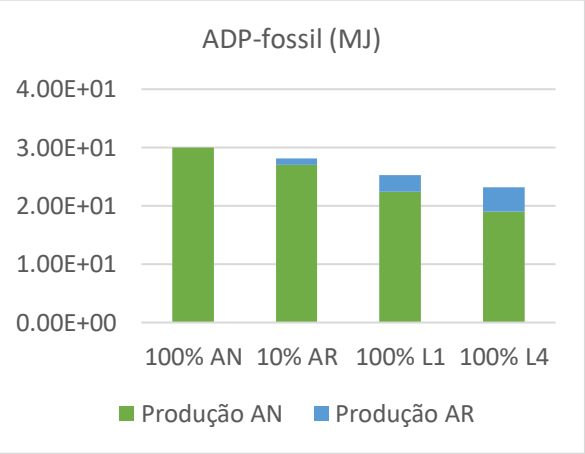


Figura 8 - ADP-fossil da produção de agregados (A1) para a argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

Quadro 7 - Alterações no IA da produção dos agregados após a introdução dos AR nas argamassas

	Argamassa de revestimento		Argamassa de assentamento	
	GWP-total	**ADP-fossil**	**GWP-total**	**ADP-fossil**
10% AR	-5,4%	-6,2%	-5,4%	-6,2%
100% L1	-	-	-13,7%	-15,8%
100% L4	-33,7%	-39,0%	-19,8%	-22,9%

No que respeita ao transporte dos agregados necessários para a produção da argamassa de assentamento, observa-se diminuições de 5% com a substituição de 10% dos AN, 14% com a substituição de 100% do calcário L1 e 20% com a substituição de 100% do calcário L4, para ambas as categorias de impacte (Figura 9 e Figura 10).

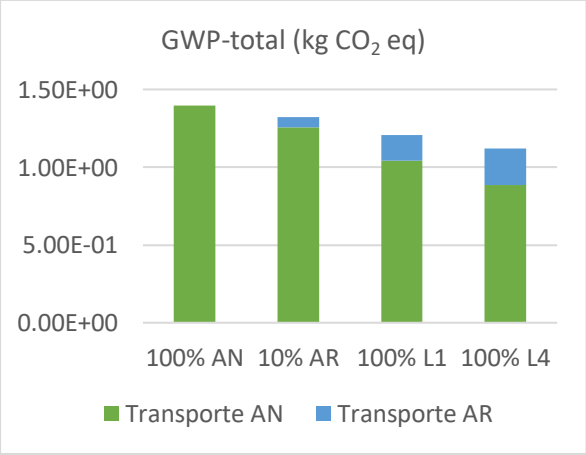


Figura 9 - GWP-total do transporte de agregados (A2) para a argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

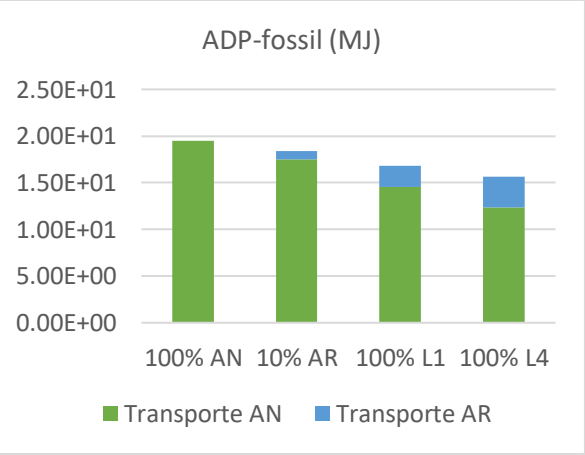


Figura 10 - ADP-fossil do transporte de agregados (A2) para a argamassa de assentamento com AN e várias incorporações de AR

O Quadro 8 apresenta, em resumo, a alteração no IA do transporte dos agregados após a incorporação de AR nos dois tipos de argamassas estudadas. Verifica-se, mais uma vez, que a maior redução de

impactes ocorre na argamassa de revestimento, quando são substituídos 62% dos AR (100% da fracção L4). Na argamassa de assentamento, a substituição desta fracção corresponde apenas a 37% dos AR.

Quadro 8 - Alterações no IA do transporte dos agregados após a introdução dos AR nas argamassas

	Argamassa de revestimento		**Argamassa de assentamento**	
	GWP-total	**ADP-fossil**	**GWP-total**	**ADP-fossil**
10% AR	-5,4%	-5,4%	-5,4%	-5,4%
100% L1	-	-	-13,7%	-13,7%
100% L4	-33,6%	-33,6%	-19,7%	-19,7%

4 CONCLUSÕES

Esta comunicação pretende avaliar as vantagens da utilização de AR como substituto de AN na produção de argamassas. A utilização de AR, para além de contribuir para a diminuição da deposição de resíduos em aterro e da extracção de matéria-prima, contribui também para uma diminuição do IA das argamassas.

O estudo de ACV foi efectuado numa fábrica de argamassas portuguesa, utilizando dados reais. Foram seleccionadas duas argamassas, uma de revestimento e outra de assentamento, e foram definidos três teores de substituição de AN por AR: substituição de 10% dos AN, substituição de 100% da fracção L1 e substituição de 100% da fracção L4.

Verifica-se que, na fase de extracção e processamento das matérias-primas (A1), a redução dos impactes após a introdução de AR é muito reduzida em termos de potencial de aquecimento global total (até 0,5%) e de potencial de depleção dos recursos abióticos fósseis (até 2%). Este valor é pouco significativo, dado que, mesmo com a substituição de 100% de uma fracção de AN (correspondendo a uma substituição de até 290 kg de AN), os impactes do cimento prevalecem nesta fase do ciclo de vida.

Na fase de transporte das matérias-primas para a fábrica (A2), é verificada uma redução dos impactes visto que a distância de transporte dos AR é inferior à distância de transporte dos AN. Os impactes ambientais variam entre 2% quando se substitui 10% dos AN da argamassa de revestimento e 15% com a substituição de 100% do calcário L4 para a mesma argamassa, em ambas as categorias.

Na fase de produção (A3), não há alterações nos impactes, visto que estes não são afectados pela incorporação de AR.

Em termos globais (fases A1-A3), é observada uma ligeira diminuição do IA em ambas as argamassas (até cerca de 1% para o potencial de aquecimento global total e até 2% para o potencial de depleção dos recursos abióticos fósseis).

Analisando apenas os impactes associados à produção dos AN e dos AR incluídos na composição das argamassas, são observadas diminuições dos impactes entre 5% e 34% em termos de potencial de aquecimento global total e entre 6% e 39% em termos de potencial de depleção dos recursos abióticos fósseis. Fazendo a análise do transporte dos AN e AR, observa-se diminuições nos impactes de entre 5% e 34% em ambas as categorias de impacte.

Concluindo, a incorporação de AR em argamassas contribui para a redução do IA das argamassas, tanto ao nível da extracção e processamento das matérias-primas como em termos de transporte até ao local da produção (caso o OGR se localize a uma distância da fábrica inferior à da pedreira). Verificou-se que é possível reduzir a utilização de AN em até 62% (em massa), correspondendo à incorporação de 29% de materiais reciclados nas argamassas, com pequenas reduções em termos de potencial de

aquecimento global e depleção dos recursos abióticos fósseis.

Como trabalho futuro, seria importante realizar uma análise económica, na qual se analisariam os impactes económicos da substituição de AN por AR.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do c5Lab e seus associados, nomeadamente do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Os autores gostariam de agradecer o apoio a este trabalho ao Civil Engineering Research and Inovation (CERIS), Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) referência UI/BD/153398/2022. Os autores agradecem o apoio da FCT através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Argent Materials Inc. (2021). Environmental Product Declaration: Recycled aggregate products. EPD International AB, Sweeden.

ASAC. (2018). Environmental Product Declaration: Average EPD for Aggregates. SÜGB, Bern.

Borges, P.M., Schiavon, J.Z., da Silva, S.R., Rigo, E., Junior, A.N., Possan, E., Andrade, J.J.O. (2023). Mortars with recycled aggregate of construction and demolition waste: Mechanical properties and carbon uptake. Construction and Building Materials, 387:131600. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131600

CAVIT. (2023). Environmental Product Declaration: Aggregato Ricilato. EPDItaly, Milano.

Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. Construction and Building Materials, 23(1):289–294. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006

Cuenca-Moyano, G.M., Martín-Morales, M., Bonoli, A., Valverde-Palacios, I. (2019). Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates. The International Journal of Life Cycle Assessment, 24:191–210. https://doi.org/10.1007/s11367-018-1518-9

D.A. Mattsson AB. (2022). Environmental Product Declaration: Recycled aggregates. EPD International AB, Sweeden.

Duan, H., Miller, T.R., Liu, G., Tam, V.W.Y. (2019). Construction debris becomes growing concern of growing cities. Waste Management, 83:1-5. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044

Ecoinvent. (2019). Ecoinvent LCA database (version 3.6). Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Retrieved from SimaPro Software, version 9.1.0.

ELCD. (2018). European life cycle database (version 3.2). European platform of life cycle assessment. Retrieved from SimaPro Software, version 9.1.0.

EFCA. (2021). Environmental Product Declaration: Concrete admixtures - Water Resisting Admixtures. Institut Bauen and Umwelt e.V., Berlin.

FdA. (2022). Declaración Ambiental de Producto: Áridos Reciclados. AENOR, Madrid.

Grabois, T.M., Caldas, L.R., Julião, N.R., Filho, R.D.T. (2020). An experimental and environmental evaluation of mortars with recycled demolition waste from a hospital implosion in Rio de Janeiro. Sustainability, 12(21):1–18. https://doi.org/10.3390/su12218945

Greenstone Recycling. (2020). Environmental Product Declaration: Recycled Aggregates. Irish Green Building Council, Dublin.

Green Vision Recycling. (2022). Environmental Product Declaration: Recycled Crushed Concrete Aggregates from Green Vision Recycling. EPD Australasia, New Zealand.

Martínez-García, R., Sánchez de Rojas, M.I., Jagadesh, P., López-Gayarre, F., Morán-del-Pozo, J.M., Juan-Valdes, A. (2022). Effect of pores on the mechanical and durability properties on high strength recycled fine aggregate mortar. Case Studies in Construction Materials, 16:e01050. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01050

NP EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. CEN Brussels.

NP EN 998-1:2017. Especificação de argamassas para alvenaria - Parte 1: Argamassas para rebocos interioires e exteriores. IPQ, Caparica.

NP EN 998-2:2016. Especificação de argamassas para alvenaria - Parte 2: Argamassas de assentamento. CEN, Bruxelas.

PRé Consultants. (2014). SimaPro 9.1.0.11, LCA Software and Database Manual. The Netherlands.

Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K. (2016). Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. Construction and Building Materials, 105:400–415. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESAFIOS NA INCORPORAÇÃO DE CINZAS VOLANTES DE QUEIMA DE BIOMASSA EM CIMENTO-COLA, CASO PRÁTICO

Luis Silva[a], Vera Fernandes[b], Pedro Sequeira[c], João A. Labrincha[d]

[a]Saint-Gobain Portugal, Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Esgueira, Aveiro, Portugal, luis.silva@saint-gobain.com

[b]Saint-Gobain Portugal, Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Esgueira, Aveiro, Portugal, vera.fernandes@saint-goain.com

[c]Saint-Gobain Portugal, Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Esgueira, Aveiro, Portugal, pedro.sequeira@saint-goain.com

[d]Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal, jal@ua.pt

RESUMO

As metas de descarbonização impostas pela União Europeia constituem um campo favorável ao desenvolvimento de novas soluções de construção porque apontam para obrigatoriedade a curto e médio prazo e ajudam a conciliar os vários intervenientes da construção para o caminho que é necessário percorrer.

No caso específico de cimentos-cola, este processo implica a substituição de cimento Portland por alternativas de menor emissão de CO_2, como cimentos pobres em clínquer ou pela substituição parcial do próprio por subprodutos de indústrias alternativas como escórias, cinzas volantes ou outros. O elevado nível de substituição requerido poderá trazer desafios de ordem técnica, ambiental, mas também dos hábitos de aplicação. Numa indústria muito conservadora, estas alterações geram reticências, desconfiança e até impossibilidade de concretizar a mudança pretendida.

Consciente desta necessidade, a Saint-Gobain Portugal e a Universidade de Aveiro, no âmbito de um projeto PT 2020-047052 (Recycled Waste Materials in Mortars- RECLAIM), estudaram a incorporação de uma cinza de queima de biomassa em argamassas. O trabalho realizado constitui todo um trajeto que apresenta as necessidades de preparação da cinza a nível técnico e ambiental, o estudo da sua incorporação num cimento-cola de classe C2 e uma avaliação dos principais desafios apresentados pelos utilizadores durante a sua aplicação.

Palavras-chave: Descarbonização, Cimento Portland, Cinzas de Biomassa, Cimento-cola, Desempenho.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Hall (1991) e Tortosa Masiá *et al* (2007), a biomassa representa cerca de 14% de fonte de energia a nível mundial além de se tratar de uma fonte de energia que está perto da neutralidade carbónica. A sua utilização encerra vantagens ambientais e económicas, apesar de gerar elevadas quantidades de cinzas que são de dois tipos: (i) de fundo, mais densas e contendo escórias ou areias purgadas do leito fluidizado (na combustão em caldeiras deste tipo), componentes inorgânicos da alimentação e a fração de biomassa não queimada; (ii) cinzas volantes (FA), granulometricamente finas e, por isso, arrastadas pelos gases de combustão e recolhidas nas chaminés ou sistemas de tratamento de gases (precipitadores). Considerando a diminuição na utilização de carvão para gerar energia elétrica, resultante de regulamentações ambientais rigorosas, tem-se registado declínio na produção de cinzas volantes, pelo que as cinzas resultantes da queima de biomassa têm sido alvo de estudo como material cimentíceo suplementar (Rajamma *et al*. 2009).

Uma das fontes de cinzas de biomassa mais robusta, pela disponibilidade e constância de processos, é a indústria de produção de pasta de papel, cuja produção de energia a partir de biomassa constitui uma operação fundamental a nível económico e ambiental. Segundo Cardoso (2016), em Portugal esta indústria é uma das mais influentes e representa cerca de 7% de toda a produção europeia. A cinza volante utilizada neste trabalho foi gerada numa empresa deste setor, que queima biomassa numa caldeira de leito fluidizado (aqui designada CTB) que, para ocorrer de uma forma estável no leito, a variação das propriedades do combustível tem de respeitar determinados intervalos de composição química e propriedades físicas como humidade (25-55%), poder calorífico inferior (6,1-11,8MJ), enxofre (≤ 0,1%), azoto (≤ 0,3%), cloro (≤ 0,1%), cinzas (≤ 5%), sódio e potássio (≤ 0,2%), densidade (150-350kg/m3), dimensão máxima de partículas (200mm), associadas a operações com pouco grau de liberdade (trituração, transporte e armazenamento) que asseguram algum grau de estabilidade relativamente às cinzas resultantes do processo pelo que a sua utilização potencial em argamassas adquire maior probabilidade de sucesso (Cardoso, 2016; Vilas-Boas, 2018).

As cinzas volantes são ricas em óxido de silício e óxido de ferro. Por vezes, também possuem elevado teor de cálcio. São essencialmente depositadas em aterros sanitários ou recicladas em terrenos agrícolas ou florestais. São geradas mais de 100000 t/ano, com tendência de aumento dada a instalação de mais unidades de queima. A tipologia CTB aqui utilizada, cuja geração anual atinge 12000 toneladas, parece ter composição química mais adequada para incorporação em argamassas, mas a utilização pode ser limitada pelo teor de cloretos e componentes alcalinos presentes. Assim, torna-se necessária uma seleção criteriosa de lotes e/ou o seu tratamento prévio (operações de lavagem e crivagem) para adequação composicional e granulométrica.

Admite-se que, embora mais exigente, com processos de ativação corretos, mecânicos e químicos, estes materiais possam apresentar reatividades adequadas que permitam a sua utilização em argamassas industriais. A resolução deste desafio pode originar a primeira argamassa-cola constituída maioritariamente por cinzas volantes na fração ligante. Atualmente, a utilização de cinzas volantes em argamassas é muito limitada e, quando incorporadas como substituto parcial de cimento Portland, não se ultrapassa um nível de 20% de substituição. Na verdade, na maioria das vezes, a sua incorporação ocorre sobretudo como um *filler*/agregado para conferir propriedades como trabalhabilidade ou compacidade o que pode, em última análise, garantir melhor desempenho mecânico. Relativamente ao caso particular de cinzas CTB, a sua utilização é praticamente desconhecida (Chi e Huang, 2013).

Os cimentos-cola são constituídos, genericamente, por agregados de sílica e carbonato de cálcio, adjuvantes como éteres de celulose, éteres de amido, aceleradores de presa, polímero redispersável e, sobretudo, por cimento Portland (OPC) como ligante, sendo este o principal responsável pelas emissões de CO_2, entre 40 e 70% dependendo da classe. Assim, o processo de descarbonização de

uma argamassa deste tipo implica a substituição do tipo de cimento por opções combinadas ou mesmo a sua substituição, total ou parcial, por materiais cimentíceos suplementares, como escórias, argila calcinada e cinzas de diversas origens, incluindo o objeto de estudo do presente trabalho. O processo de substituição, porém, implica um estudo detalhado sob várias perspetivas para garantir uma solução final robusta. Por exemplo, a simples substituição de cimento Portland por cinzas volantes, ainda que estas possuam carácter hidráulico, implica também alterações relevantes ao nível do tempo de presa da argamassa, do seu endurecimento ao longo do tempo, sobretudo se ocorre em condições mais adversas como superfícies pouco absorventes, ambientes pouco ventilados ou com elevada humidade e baixa temperatura. Assim, ainda que sejam assegurados os valores de aderência por tração perpendicular segundo a EN 12004:2004+A1:2012, o seu desempenho pode ser fortemente condicionado por alterações de hábitos de aplicação, resultando em prejuízo do objetivo final.

Consciente desta necessidade, a Saint-Gobain Portugal e a Universidade de Aveiro, no âmbito de um projeto PT 2020-047052 (*Recycled Waste Materials in Mortars- RECLAIM*), trabalharam na preparação e incorporação de uma cinza de queima de biomassa num cimento-cola de classe C2. O trabalho realizado constitui todo um trajeto que apresenta as necessidades de preparação da cinza a nível técnico e ambiental, o estudo da sua incorporação na argamassa e uma avaliação dos principais desafios apresentados pelos utilizadores durante a sua aplicação. Espera-se que os resultados apresentados, correspondentes a algumas das etapas mais relevantes, ainda que não todas, possam contribuir para incentivar o desenvolvimento de mais ações similares e acelerar definitivamente o processo de descarbonização na fabricação destas argamassas.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 CARATERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA CINZA VOLANTE

A primeira fase do estudo relativo ao potencial de incorporação de uma amostra de cinza volante proveniente da queima de biomassa implicou:

a) Avaliação de disponibilidade do material, incluindo a sua apresentação, necessidade de operações de tratamento prévio à sua utilização e viabilidade técnica, ambiental e económica dessas operações;

b) Avaliação de propriedades físicas como densidade aparente, distribuição de tamanho de partículas e aspeto (cor);

c) Avaliação da composição química e mineralógica do material, o que permite avaliar a presença de elementos perigosos, mas também indiciar o potencial reativo, hidráulico ou pozolânico;

d) Estudo do potencial reativo, incluindo avaliação de ativadores, aceleradores de reação, reguladores de presa, agentes reológicos, capazes de garantir um desempenho de argamassas comparável ao de formulações que utilizam cimento Portland, tipo I, 42,5 (cinza).

Estes trabalhos foram realizados com recurso a 5 lotes de cinzas, recolhidas em diferentes períodos ao longo de 3 anos, confirmando uma estatística considerada razoável do material recolhido na origem. A avaliação das cinzas CTB como potencial ligante, a partir de amostras tratadas em função das necessidades definidas na primeira fase, fez-se pela sua combinação com Cimento Portland OPC, tipo I, 42,5 (cinza) e respetiva avaliação por:

a) Calorimetria isotérmica

O ensaio foi realizado por recurso ao equipamento Calmetrix I-CAL-Ultra. As amostras foram misturadas com água num rácio água/pó de 0,4, considerando a trabalhabilidade durante a mistura. Depois, a mistura com um total aproximando de 2,4g foi colocado num dos vários canais do

equipamento (cada canal apresenta 2 células, uma de referência e outra da amostra, com detetores de calor na parte inferior). As pastas foram preparadas externamente durante 60 segundos e imediatamente transferidas paras as células de teste. A temperatura ambiente foi mantida a 20ºC, usando um sistema de ventilação controlado pelo equipamento. A evolução do calor libertado devido à hidratação foi detetada por sensores térmicos na câmara de teste e registados no software do sistema, permitindo obter o fluxo de calor (W/g) e o calor acumulado (integral do fluxo de calor, J/g) durante as primeiras 24horas de hidratação a 20ºC. As amostras equivalentes a rácios OPC/CTB de 50/50 e 20/80 também foram comparadas com versões similares, mas com areia de sílica como material potencialmente inerte relativamente à cinza CTB (Pane e Hansen, 2005).

b) TG/ATD

O objetivo deste ensaio foi avaliar a formação de hidratos num sistema OPC/CTB, proporções 50/50 e 20/80 em comparação com uma amostra de OPC puro (100%). Para o efeito, as amostras foram preparadas num rácio água/pó de 0,4. Para cada caso, após o processo de mistura, iniciou-se a hidratação que foi parada a 28 e 91 dias com álcool isopropílico. Posteriormente, a amostra foi filtrada e seca durante 1 noite em vácuo. Após este processo, as amostras foram armazenadas em frascos selados numa estufa a 40 °C antes da realização da análise de TGA/ATD. O aquecimento foi realizado à taxa de 10 °C/min de forma a quantificar o conteúdo de "água de ligações" relativamente a cada fase hidratada potencialmente presente. No intervalo de temperatura entre 25 °C e 270 °C procura-se identificar produtos da hidratação de compostos hidráulicos (C-S-H, *etringite*, …). A *Portlandite* (CH) pode ser avaliada a partir da perda de massa que ocorre entre 380 e 550 °C.

A água de ligação corresponde à água ligada nos produtos de hidratação, hidratos e hidróxidos e pode fornecer uma estimativa do grau e extensão da hidratação ao longo do tempo. O cálculo da água de ligação (Wb) é baseado na equação seguinte (Monteagudo *et al*. 2014; Bathy, 1986; Avet *et al*. 2019):

$$Wb = (Ldh + Ldx + 0.41.Ldc)^{H} - (Ldh + Ldx + 0.41.Ldc)^{A}$$

Onde:

Ldc = perda de massa devida à descarbonatação da calcite e outros carbonatos, entre 550 and 900 °C

Ldh = perda de massa devida à desidratação de hidratos, entre 30 e 300 °C

Ldx = perda de massa devida à desidroxilação da Portlandite, entre 380 e 550 °C

0,41 corresponde a um fator de conversão, assumindo que uma parte de portlandite carbonatou; perda de massa equivalente de água relativa a $Ca(OH)_2$ carbonatada = $[MH_2O/MCO_2]$ x Ldc = 0.41 x Ldc.

H: equivalente ao material hidratado; A: equivalente ao material anidro

2.2 INCORPORAÇÃO DA CINZA VOLANTE EM CIMENTO-COLA

As várias formulações estão apresentadas no quadro 1. A definição do conteúdo total de ligante foi baseada em valores considerados necessários para a obtenção de um cimento-cola da classe C2 (aderência mínima de 1N/mm^2, segundo a EN 12004-1:2007+A1:2012). O conteúdo do éter de celulose foi alterado para garantir níveis semelhantes de trabalhabilidade, retenção de água e tempo de presa. O controlo reológico foi auxiliado pela utilização de adjuvantes. Finalmente, considerando que a introdução de cinzas conduz a tempos de presa mais longos, adicionaram-se agentes aceleradores, ativadores/percursores (Petit e Wirquin, 2013; M. Cappellari *et al*. 2013; Glatthor, 2016; Xu e Wang, 2024; Pichniarczyk e Niziurska, 2015; Brough e Atkinson, 2002; Mohamed, 2023).

As três formulações foram avaliadas ao nível da aderência por tração perpendicular, segundo as condições exigidas pela EN 12004:2007+A1:2012, nomeadamente, aderência inicial, por ação do calor, após imersão e após ciclos gelo-degelo. Adicionalmente, considerando os hábitos de aplicações associadas a colagem de cerâmica, fez-se avaliação do tempo de presa (método *Vicat*) dos casos em estudo e, finalmente, avaliação de hábitos e aplicação ao nível de facilidade de mistura e facilidade de aplicação com um júri de 15 aplicadores experientes. Neste caso, os resultados são expressos na relação percentual obtida entre as classificações obtidas numa escala de 1 (mau) a 10 (excelente).

Quadro 1 – Formulações adotadas para estudo de incorporação da cinza CTB num cimento-cola de classe C2 (% em massa).

Componente/Versão	**OPC 100**	**OPC/CTB:50/50**	**OPC/CTB:20/80**
Cimento Portland, I, 42,5	35	17,5	7
CTB < 200µm	n.a	17,5	28
Areia sílica 0,1-0,5mm	60,7	60,72	60,02
Éter de celulose modificado, 25000mPa.s	0,30	0,25	0,25
Acelerador de presa	1	0,5	0,2
Ativador/Percursor	n.a	0,5	1
Polímero redispersável, EVA, Tg 15ºC	2,5	2,5	2,5
Outros adjuvantes reológicos	0,53	0,53	1,03

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARATERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA CINZA VOLANTE

O quadro 2 e figura 1 (a e b) apresentam o aspeto das cinzas CTB recolhidas na origem, em diferentes momentos e o respetivo impacto imediato a nível estético num cimento-cola, por substituição de OPC em 50%. Os resultados obtidos para as amostras recolhidas revelam um material com diferenças que se poderão tornar inconvenientes ao nível de utilização final, nomeadamente por apresentar uma percentagem elevada de *inqueimados* e também à existência de partículas de carvão em quantidade relevante. Esta situação pode ser limitadora de utilização em argamassas, por apresentar aglomerados que se desfazem apenas durante a aplicação o que pode condicionar a perceção de qualidade pelos clientes. Por outro lado, também se evidencia que as frações abaixo de 315µm poderão constituir uma base de trabalho aceitável para explorar, embora se percecione que as partículas de *inqueimados* e carvão poderão estar distribuídas pelos vários peneiros. Assim, considerando os resultados apresentados, é óbvia a necessidade de proceder a operações prévias de tratamento, por forma a garantir a sua utilização em condições aceitáveis. No presente caso, admite-se que uma crivagem entre 200 e 250 µm seja uma operação-chave para obter essa garantia, conforme indicado na figura 1c e quadro 3. Estes resultados também sugerem que um processo industrial de crivagem, usando esta dimensão de separação resultará num rendimento acima de 80%, que se apresenta como aceitável também do ponto de vista de sustentabilidade, com um máximo de 20% de material rejeitado.

Figura 1 – Aspeto visual de várias amostras recolhidas na a) origem (após crivagem), b) potencial impacto negativo da sua adição numa argamassa com excessiva concentração de *inqueimados* e c) resultados após ações de ajuste realizadas.

Quadro 2 – Resultados de caracterização de amostras de cinzas CTB recolhidas.

Amostra/ Propriedade	**1 (16-06-19)**	**2 (03-11-20)**	**3 (05-06-21)**	**4 (02-11-21)**	**5 (01-12-21)**
Distribuição partículas					
630µm	0,5	0,4	0,7	0,6	0,5
315µm	29,6	15,3	19,9	24,7	16,3
160µm	15,6	22,0	17,4	16,5	17,1
80µm	15,6	15,9	13,5	13,5	15,1
Fundo	38,7	46,4	48,5	44,7	51,0
Densidade aparente	n.d.	n.d.	0,76	0,90	0,61
Perda massa (%)					
100ºC	0,17	n.t	n.t	0,20	0,12
500ºC	0,12	1,5	0,13	0,15	0,12
900ºC	3,14	4,0	2,3	1,5	3,5
Aspeto visual	OK ao nível de partículas de carvão e *inqueimados* (apesar de visíveis acima de 315µm)				

n.d.: não determinado

Admitindo a crivagem a 250 µm como adequada, procedeu-se à caracterização das propriedades físicas, composição mineralógica (por DRX) e composição química (por XRF), cujos resultados são apresentados nos quadros 4 e 5. Os resultados sugerem existir algum carácter potencialmente hidráulico, considerando a concentração de CaO presente nas amostras. Ainda assim, grande parte deste óxido estará na forma de $CaCO_3$, o que limita esse poder reativo. Por outro lado, a presença de 30% de fases amorfas poderá ser positiva se representar algum potencial hidráulico ou pozolânico. Com efeito, admite-se o seu contributo mais específico quando se observam os restantes ensaios realizados e se conclui que adição de cinzas não consubstancia comportamento inerte.

A avaliação das cinzas CTB como potencial ligante fez-se pela sua combinação com cimento Portland e respetiva avaliação de reatividade por calorimetria isotérmica e TG/ATD. A comparação é feita para 3 sistemas de ligantes: OPC 100, OPC/CTB: 50/50 e OPC/CTB: 20/80. No caso do ensaio de calorimetria, para os casos de combinação com cimento, foram realizadas preparações similares, substituindo CTB por areia de sílica (0,1 a 0,5mm) considerando tratar-se de um material inerte.

Quadro 3 – Caracterização do material recolhido durante as várias crivagens.

Propriedade/Amostra	**0-250µm**	**250-400 µm**	**0-400 µm**
Distribuição partículas			
630µm	0,0	0,0	0
315µm	0,0	14,9	15,4
160µm	2,2	37,5	29,4
80µm	13,3	13,6	14,3
Fundo	82,8	33,8	41,2
Densidade aparente	0,74	1,18	1,03
Perda massa (%)			
100 °C	0,3	0,2	0,9
500 °C	1,2	0,5	2,6
900 °C	3,8	1,8	12

Quadro 4 – Composição mineralógica, obtida por DRX, com semi-quantificação das fases principais presentes.

Componente	Quartzo	Calcite	Albite	Microclina	Outras fases cristalinas	Fases amorfas
Fórmula química	SiO_2	$CaCO_3$	$NaAlSi_3O_3$	$KAlSi_3O_8$	---	---
% (wt)	43	9	5	4	< 2	30

Quadro 5 – Composição química (óxidos), obtida por FRX.

Fase	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O + Na2O	SiO_2	SO_3	Cl	Outros óxidos, em % menor	LOI (105-1100 °C)	LOI (20-105 °C)
% (wt)	10,3	12	3,41	4,07	57,5	1,26	0,03	< 0,05	4,06	0,58

a) Calorimetria isotérmica

Os resultados relativos à calorimetria isotérmica são apresentados na figura 2 e quadro 6. O pico exotérmico do OPC durante o período de pré-indução (0-2h) é dominado pela hidratação do C3A e é dominante para todos os casos em avaliação. No período seguinte (2 a 24h), o pico exotérmico observado é dominado pela hidratação do C3S para produzir gel C-S-H e CH. No caso das versões com introdução de cinzas CTB, admite-se a possibilidade de formação de C-(A)-S-H. A versão OPC/CTB: 50/50 evidencia um calor libertado acumulado menor que a versão OPC 100, ainda assim, superior a metade do valor, sugerindo que ocorrerão reações de hidratação também dependentes da presença da cinza de biomassa. Os resultados seguem uma tendência similar quando o rácio é de OPC/CTB:20/80, com valores de calor acumulado superiores à condição idêntica com areia de sílica, novamente sugerindo a ocorrência de ligações hidráulicas ou pozolânicas potenciadas pela presença da cinza. Naturalmente, estes resultados sugerem esta conclusão, não obstante o aumento de calor acumulado obtido poder ter origens secundárias como dissolução de sais presentes na amostra.

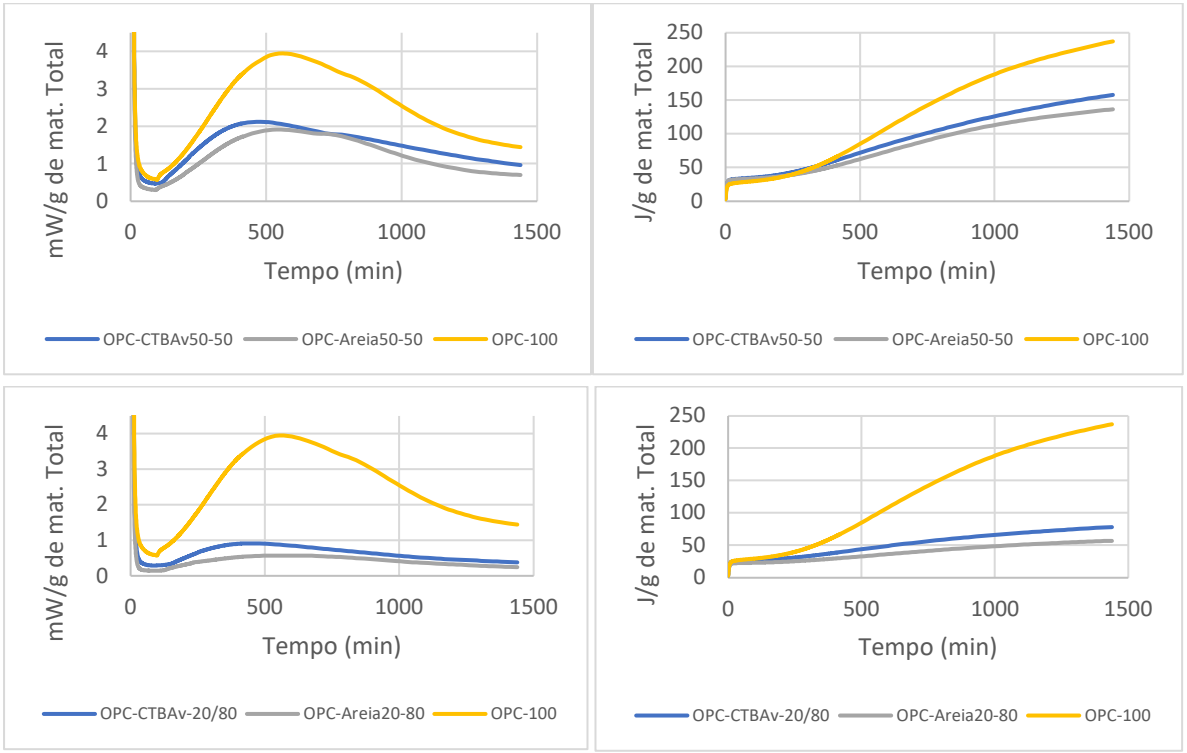


Figura 2 – Resultados de calorimetria isotérmica relativos ao calor de hidratação dos ligantes em estudo (esquerda: curva exotérmica de hidratação; direita: calor de hidratação acumulado).

Quadro 6 – Resultados relativos ao calor acumulado libertado durante 24h, obtidos pelo ensaio de calorimetria isotérmica.

Amostra	**Calor libertado (J/g total amostra)**
OPC 100	237,26
OPC/CTB (50/50)	157,68
OPC/areia (50/50)	136,42
OPC/CTB (20/80)	78,27
OPC/areia (20/80)	57,04

b) TG/ATD

Os resultados dos ensaios de termogravimetria e análise térmica diferencial, relativos à hidratação dos ligantes em estudo em condições de cura a 8 e 20ºC, para 21 e 91 dias, são apresentados no quadro 7 e figura 3. Os resultados obtidos por temogravimetria, com destaque para o valor da água de ligação (quadro 7), indicam uma diminuição significativa de intensidade dos picos com o incremento da percentagem de cinza CTB, corroborando as expetativas que o ligante dominante é o cimento Portland, ainda assim com alguma contribuição da própria cinza.

Os resultados da ATD (figura 3) são apresentados apenas até 300ºC por constituir o intervalo-chave para uma avaliação das principais fases hidratadas e respetiva água de ligação. O pico endotérmico

entre 60 e 170ºC corresponde à decomposição da AFt e CSH (ou C(A)SH) e o pico próximo de 170ºC estará relacionado com a decomposição de AFm, Mc ou Hc. Novamente, a intensidade dos picos decresce com a introdução das cinzas CTB, em consonância com os resultados da TG.

Quadro 7 – Relação percentual de água de ligação entre as amostras de cimento puro e as combinações com cinza de biomassa, obtido pelo ensaio de termogravimetria.

Amostra/Água de ligação*	**21d**		**91d**	
	8 ºC	**20 ºC**	**8 ºC**	**20 ºC**
OPC 100	100		100	
OPC/CTB (50/50)	69	72	76	78
OPC/CTB (20/80)	45	50	50	64

* % relativamente a OPC puro

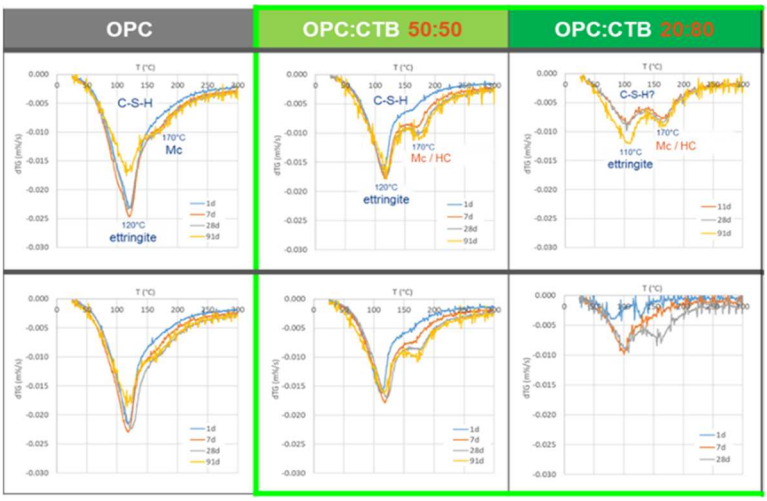


Figura 3 – dTG entre 30 e 300 °C (intervalo relativo a perda de massa devido à de-hidratação de hidratos) para as combinações OPC:CTB 50:50 e OPC:CTB 20:80 a 20 °C (superior) e 8 °C (inferior) por comparação com OPC puro (Abreviaturas: Mc = monocarboaluminato, HC = hidrocalumite).

3.2 INCORPORAÇÃO DA CINZA VOLANTE EM CIMENTO-COLA

Considerando os estudos realizados relativamente aos rácios OPC/CTB de 100/0, 50/50 e 20/80, prepararam-se formulações de cimento-cola, classe C2, segundo dados do quadro 1 e fez-se avaliação de parâmetros relacionados com a EN 12004:2007+A1:2012, avaliação do tempo de presa e avaliação empírica de trabalhabilidade. Os resultados estão apresentados nos quadros 8 e 9.

Os resultados obtidos relativamente à aderência por tração perpendicular indicam uma relação de grandeza de valores similar à relação entre a água de ligação obtida relativamente aos ligantes isolados. Com efeito, a versão OPC/CTB: 50/50 apresenta valores de aderência tendencialmente menores que os valores obtidos para a composição constituída apenas por OPC. Ainda assim, o decréscimo verificado, entre 10 e 30%, mantém a classificação C2, com valores sempre acima de 1N/mm^2. Também na formulação OPC/CTB: 20/80 se verifica uma relação semelhante entre a aderência e a água de ligação medida por termogravimetria. Neste caso, os valores de aderência são claramente inferiores ao mínimo exigido para a classe C2, especialmente na condição após ação do calor, cujo valor obtido está no limite para que se possa considerar a argamassa como sendo da classe

C1. Os resultados relativamente à tipologia de rotura, para os casos com introdução da cinza de biomassa tendem a favorecer o caso Cfa (rotura coesiva do cimento-cola), evidenciando também a sua diminuição de coesão interna relativamente à versão constituída apenas por OPC. No caso de um cimento-cola, esta observação não é necessariamente negativa, pelo contrário, permite obter um melhor equilíbrio entre a coesão interna da argamassa e a ligação da mesma ao elemento cerâmico. Isto é, a mistura constituída apenas por OPC como ligante está, de algum modo, sobredimensionada porque assegura os valores mínimos da norma embora indicie necessitar de maior coesão para o obter, uma vez que a rotura é evidentemente adesiva.

Quadro 8 – Avaliação das formulações de cimento-cola, classe C2, preparado a partir de ligantes com OPC ou combinado com introdução de cinzas CTB.

Componente/Versão	**OPC: 100**	**OPC/CTB: 50/50**	**OPC/CTB: 20/80**
Água amassadura (g/100g pó)	23	24	26
Tempo de fim de presa, método vicat (min)			
8 °C	20	24	48
22 °C	10	10	12
Aderência por tração perpendicular (N/mm2)			
Inicial	1,48 (Aft)	1,55 (Aft/Cfa)	1,10 (Aft/Cfa)
Após imersão	1,21 (Aft)	1,10 (Aft)	0,75 (Aft)
Após ação calor	1,75 (Aft)	1,25 (Aft/Cfa)	0,50 (Aft/Cfa)
Após gelo-degelo	1,20 (Aft)	1,15 (Aft/Cfa)	0,91 (Aft/Cfa)
Tempo aberto (MPa)			
20´	1,55	1,60	1,12
30´	1,30	1,10	0,55

Aft: rotura adesiva pelo cerâmico; Cfa: rotura coesiva do cimento-cola

Os resultados relativos à avaliação do tempo de presa indiciam algumas diferenças importantes, sobretudo quando o ensaio foi realizado a baixa temperatura. Os resultados para a versão OPC/CTB:20/80 são considerados mesmo inadmissíveis do ponto de vista dos hábitos de aplicação em contexto real. No caso da versão OPC/CTB:50/50, não obstante estarem mais próximos do desejado, são indicadores da necessidade de trabalhar melhor os processos de aceleração de presa destas misturas.

Ao nível de avaliação empírica de aplicação, por recurso a um questionário junto de aplicadores experientes, os resultados do quadro 9 confirmam todas as expetativas resultantes dos ensaios laboratoriais e confirmam que o produto obtido é viável a este nível. Ainda assim, também indiciam alguma necessidade de melhoria ao nível do seu espalhamento o que revela que os adjuvantes usados para o efeito poderão ser mais bem-adaptados nestes sistemas.

Os resultados obtidos relativos à calorimetria isotérmica, TG/ATD, tempo de presa e aderência por tração perpendicular apresentam coerência de tendência entre os rácios OPC/CTB. Por isso, parece aceitável admitir que as cinzas CTB têm um potencial efetivo para substituir cimento Portland, por contribuir para a formação de hidratos, até determinado limite. Com efeito, a substituição de OPC por CTB até 50% deu origem a uma versão de cimento-cola ainda capaz de ser classificada como classe C2 (aderência superior a 1N/mm2). Por outro lado, a relação 20/80 já se revela insuficiente o que seria previsível pelos próprios resultados relativos ao estudo do ligante isolado. Assim, também é aceitável admitir que, não obstante algum poder de contribuição para a formação de fases hidratadas, a cinza

CTB em estudo está longe de apresentar um nível sequer próximo de outros materiais alternativos a OPC como, por exemplo, escórias de alto forno (Brough e Atkinson, 2002; Mohamed, 2023).

Quadro 9 – Resultados relativos a aplicação (júri) de colas com introdução de cinzas CTB em comparação com outras colas mais convencionais.

Versão/ Avaliação aplicadores (1-10)*	**Versão OPC (versão de mercado)**	**Versão OPC/CTB: 50/50**
Avaliação mistura	100%: 8	75%: 10 25%: 8
Avaliação espalhamento da cola	90%: 10 10%: 9	50%: 8 30%: 6 20%: 9
Comentários gerais	Produto usado com referência, por ser considerado como dos melhores no mercado	A presença de *inqueimados* foi notada pelos aplicadores

* 10: excelente; 5: médio; < 5: mau

4 CONCLUSÕES

A Saint-Gobain Portugal e a Universidade de Aveiro, no âmbito de um projeto PT 2020-047052 (*Recycled Waste Materials in Mortars- RECLAIM*) trabalharam na preparação e incorporação de uma cinza de queima de biomassa (CTB) num cimento-cola de classe C2. O trabalho inicial realizado revelou, desde logo, alguma constância do material recolhido na origem, mas também necessidades especificas de preparação da cinza por forma a permitir a sua introdução em cimento-cola ou noutras argamassas industriais.

Posteriormente, realizaram-se testes de caracterização química e mineralógica da cinza tratada e avaliou-se o seu potencial de hidraulicidade por aplicação de técnicas como calorimetria isotérmica e análise termo-gravimétrica. Considerando os resultados promissores obtidos, decidiu-se finalmente pelo estudo de incorporação em versões de cimento-cola, a partir de substituições parciais de cimento Portland (OPC) pela CTB. Os resultados obtidos entre as várias técnicas usadas são bastante coerentes entre si corroborando o potencial da cinza CTB como substituto de OPC. Ainda assim, também evidenciam limites claros para o grau de substituição, sugerindo que 50% é um valor bastante aceitável e que, valores superiores, dificilmente garantirão níveis idênticos de desempenho.

A metodologia realizada mostra robustez e admite-se que possa ser considerada como apoio efetivo na obtenção de resultados capazes de sustentar decisões futuras de continuidade, aumentando o grau de confiança, impulsionado finalmente a implementação de casos reais de valorização de resíduos.

5 AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado foi realizado ao abrigo do projeto PT 2020-047052 (*Recycled Waste Materials in Mortars- RECLAIM*). Os autores agradecem o suporte financeiro durante a execução do mesmo.

REFERÊNCIAS

Hall, D.O., Biomass energy, Energy Policy, Vol. 19, Issue 8, October 1991, Pag. 711-73.

Tortosa Masiá, A.A., et al., Characterizing ash of biomass and waste. Fuel Processing Technology, 2007. 88(11): p. 1071-1081.

Rajamma, R., et al., Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials. Journal of Hazardous Materials, 2009. 172(2): p. 1049-1060.

Cardoso, A. (2016). Análise energética e exergética de uma caldeira de biomassa. Relatório de Estágio, Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.

Vilas-Boas, A. (2018). Controlo de NOx durante a combustão de biomassa em fornalhas industriais de leito fluidizado. Relatório de Estágio, Mestrado em Engenharia de Ambiente, Universidade de Aveiro.

Chi, M. , Huang, R., Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, Construction and Building Materials, Vol. 40, March 2013, Pages 291-298.

Pane, I. and W. Hansen, Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. Cement and Concrete Research, 2005. 35(6): p. 1155-1164.

Monteagudo, S.M., et al., The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. Thermochimica Acta, 2014. 592: p. 37-51.

Bhatty, J.I., Hydration versus strength in a portland cement developed from domestic mineral wastes — a comparative study. Thermochimica Acta, 1986. 106: p. 93-103.

Avet, F., E. Boehm-Courjault, and K. Scrivener, Investigation of CASH composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3). Cement and Concrete Research, 2019. 115: p. 70-79.

Xu, Y.; Wang, J. Effect of polymer type and sand/cement ratio on the performance of two-component ceramic tile back side adhesive, Journal of Adhesion Science and Technology, Apr 2024

P. Pichniarczyk e M. Niziurska, «Properties of ceramic tile adhesives modified by different viscosity hydroxypropyl methylcellulose», Constr. Build. Mater., vol. 77, pp. 227–232, 2015.

J. Y. Petit e E. Wirquin, «Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars», Int. J. Adhes. Adhes., vol. 40, pp. 202–209, 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2012.09.007.

M. Cappellari, A. Daubresse, e M. Chaouche, «Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention», Constr. Build. Mater., vol. 38, pp. 950–961, 2013.

A. Glatthor, «Performance of Starch Ethers in Drymix Mortars Performance of Starch Ethers in Drymix Mortars», n. December, pp. 1–3, 2016.

Brough, A.R. and A. Atkinson, Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. Cement and Concrete Research, 2002. 32(6): p. 865-879.

Osama A. Mohamed, Effects of the Curing Regime, Acid Exposure, Alkaline Activator Dosage, and Precursor Content on the Strength Development of Mortar with Alkali-Activated Slag and Fly Ash Binder: A Critical Review, Polymers 2023, 15(5), 1248.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROCESSAMENTO DE CONCHAS DE OSTRA PARA BLOCOS DE BETÃO SUSTENTÁVEIS: ATIVIDADES INICIAIS DO PROJETO BLOCOSYTER

Nicollas Moreira[a]; Rui Vasco Silva[a]; Léo Pinchard[a]; Poliana Bellei[a]; Fernanda Caroline Magalhães[a,c]; Maria Paula Mendes[a], Ana Paula Soares Dias[b], Manuel Francisco Costa Pereira[b], Inês Flores-Colen[a]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, nicollas.moreira@tecnico.ulisboa.pt; poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt; rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt; leo.pinchard@gmail.com; ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisbon, Portugal, apsoares@tecnico.ulisboa.pt; mfcp@tecnico.ulisboa.pt

[c] CiTUA, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal, fernandamagalhaes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O projeto BLOCOSYTER explora o vasto potencial das conchas de ostra como subproduto da aquicultura para aplicação no setor da construção, premiada na VI edição dos Prémios Mares Circulares. As conchas de bivalves, notáveis pelo seu elevado teor de carbonato de cálcio, surgem como matéria-prima para diversos setores, como agricultura, saúde, ambiente e construção. Dentro do contexto da aplicação desse material na Engenharia Civil, este projeto busca desenvolver uma metodologia que integre os resíduos de conchas de ostras em blocos de betão não estruturais mais sustentáveis. A produção dos blocos foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na substituição em massa do cimento por pó de concha de ostra, enquanto a segunda envolveu a substituição do agregado por agregado de concha de ostra na constituição de um bloco. Em ambos os casos, os resultados foram comparados com blocos de referência desenvolvidos com a mesma metodologia, utilizando as misturas tradicionais de cimento e agregado de areia. No âmbito desta comunicação são apresentados e discutidos os resultados dos trabalhos preliminares relacionados com a preparação e processamento dos resíduos de conchas de ostra como matéria-prima para a incorporação em blocos sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE

Conchas de Ostra, Economia Circular Azul, Bloco Sustentável, Mares Circulares

1 INTRODUÇÃO

Diversos estudos exploram o uso de conchas de bivalves, como ostras, mexilhões e amêijoas, na produção de materiais de construção, destacando o elevado conteúdo de carbonato de cálcio das conchas de ostra (Mo et al., 2018; Topić Popović et al., 2023). Premiado na VI edição dos Prémios Mares Circulares, o projeto BLOCOSYTER é uma iniciativa inovadora que reutiliza conchas de ostra, subproduto da aquicultura, no setor da construção, promovendo a incorporação desse tipo de resíduo para a construção de blocos de betão não estruturais, favorecendo a economia circular.

A motivação do projeto BLOCOSYTER reside na crescente necessidade de encontrar soluções sustentáveis para a gestão de resíduos, e na busca por alternativas ecológicas aos materiais de construção tradicionais. Na última década, com o crescimento da produção de bivalves em Portugal, e a necessidade de encontrar um uso adequado para as conchas (pós-consumo ou oriundas da elevada mortalidade nos viveiros), estudos sobre o tema estão sendo cada vez mais frequentes (Bellei et al., 2023, 2024; Magalhães et al., 2024).

Alguns estudos demostram que a substituição de conchas de bivalves no betão mantém ou melhora a resistência à compressão, tração e flexão, para além de aumentar a durabilidade aos ataques dos sulfatos, álcalis e ácidos, assim como aos ciclos de gelo-degelo (Liu et al., 2022; Peceño et al., 2022; Wungkhai e Chand, 2024). O uso de resíduos de conchas de moluscos também reduz emissões de CO_2 e oferece benefícios económicos (Alonso et al., 2021; Lee et al., 2020).

Até ao momento, os maiores desafios do projeto BLOCOSYTER, os quais são apresentados neste artigo, concentram-se na otimização do processo de recolha e preparação da concha como resíduo. Ao realizar a substituição dos componentes convencionais do betão, é preciso garantir que os blocos produzidos alcancem as propriedades requeridas. Para além disso, a abordagem do projeto envolve diversos testes laboratoriais de caraterização para determinar as melhores práticas de incorporação das conchas de ostra, bem como a avaliação de desempenho a longo prazo dos blocos de betão.

O projeto BLOCOSYTER procura promover a sustentabilidade e a inovação no setor da construção, servindo como um modelo para a implementação de práticas que impulsionam a economia circular azul em diferentes áreas. A reutilização de resíduos da aquicultura em produtos de valor acrescentado representa um avanço significativo na gestão sustentável de recursos e na redução do impacte ambiental da construção.

2 METODOLOGIA

O projeto BLOCOSYTER desenvolve-se em cinco atividades principais (Figura 1), sendo elas:

A Atividade 1 consiste no tratamento mecânico do resíduo (pó e agregado) – inclui o tratamento mecânico para a transformação da concha de ostra até à granulometria de um agregado natural (0 a 4 mm), ou de um ligante hidráulico (pó< 150 µm).

A atividade 2 corresponde à produção de blocos de betão com incorporação em diferentes taxas de resíduo e seleção das formulações com melhor desempenho físico e mecânico. Pretende-se avaliar de que forma o resíduo, as percentagens de substituição e as granulometrias (como ligante e agregado) utilizadas interferem no desempenho dos blocos. Inicialmente, as taxas de substituição do resíduo de concha de ostra serão de 10% e 20% do cimento por pó de concha de ostra, e de 50% e 100% da massa de agregado por agregado de concha de ostra.

A análise do desempenho e durabilidade em serviço, a longo prazo, dos blocos de betão com resíduo de concha de ostra corresponde à atividade 3 – os blocos serão sujeitos a testes físicos e mecânicos, após a sua exposição em ambiente de laboratório e de degradação a longo prazo (envelhecimento acelerado).

A avaliação do desempenho técnico, impactes ambientais e económicos é efetuada na atividade 4 – será realizada uma análise do ciclo de vida dos blocos de betão produzidos, considerando as diversas combinações estudadas. Consideram-se aspetos como a produção e o transporte da matéria-prima, mistura, destino final das perdas durante a execução, bem como as etapas de reposição e fim da vida útil dos blocos. Com a viabilidade técnica e comercial do aproveitamento deste tipo de resíduo, será possível obter novas formulações e aplicações, com menor consumo dos recursos naturais existentes e implementação de soluções inovadoras e conscientes a nível económico. O reconhecimento deste resíduo na economia circular a diferentes níveis (local/região, nacional e internacional) terá um impacto relevante para os sectores e para a sociedade.

Finalmente, a atividade 5, gestão e disseminação, desenvolve-se ao longo do projeto e contempla reuniões trimestrais da equipa e a elaboração de um relatório de progresso após 6 meses, bem como um relatório final. A disseminação do projeto iniciou-se com o arranque do mesmo e prossegue com a divulgação das atividades em curso através das redes sociais.

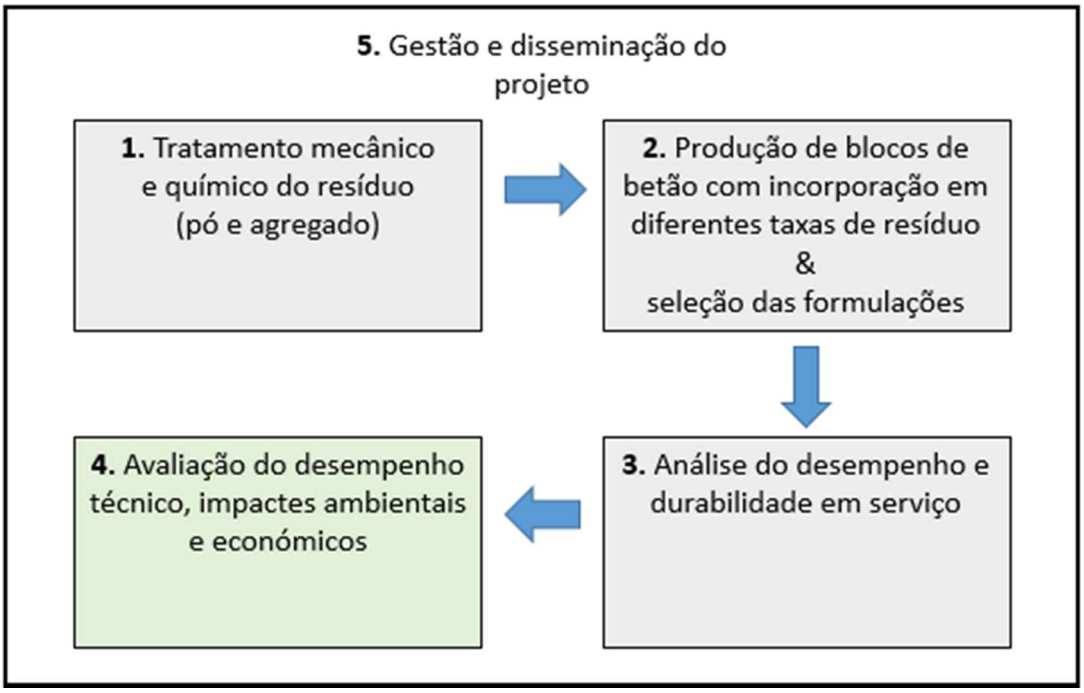


Figura 1 – Principais atividades do projeto BLOCOSYTER.

3 RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões apresentados neste artigo são preliminares, refletindo o estágio atual da investigação em desenvolvimento. Até ao momento, houve um progresso substancial na atividade 1 - preparação e no processamento das conchas de ostras. A eficácia dos métodos de separação, imersão, lavagem e secagem foi rigorosamente avaliada, proporcionando entendimentos cruciais para a otimização desses processos. No entanto, a fase subsequente de produção e análise das propriedades dos blocos de betão com a incorporação do bioproduto ainda se encontra em desenvolvimento.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Com o objetivo de promover uma economia circular local e sustentável no setor marinho, as conchas de ostras utilizadas são da espécie Crassostrea Gigas (Figura 2.A), cultivadas no Sul de Portugal. Essas conchas foram fornecidas pela associação de moradores da Ilha da Culatra, localizada na região do Algarve, Portugal (Figura 2.B). As ostras recolhidas resultam de perdas na aquicultura. Antes de serem embaladas e transportadas para o laboratório, as ostras foram armazenadas ao ar livre pelo fornecedor durante três meses, garantindo-se assim a limpeza natural do seu conteúdo orgânico, através dos fatores meteorológicos ou como alimento de espécies locais.

A transformação das conchas em partículas menores para serem aproveitadas nos blocos de betão foi dividida em duas fases: a fase de pré-processamento, que inclui quatro etapas (separação, imersão, lavagem e secagem) e a fase de processamento.

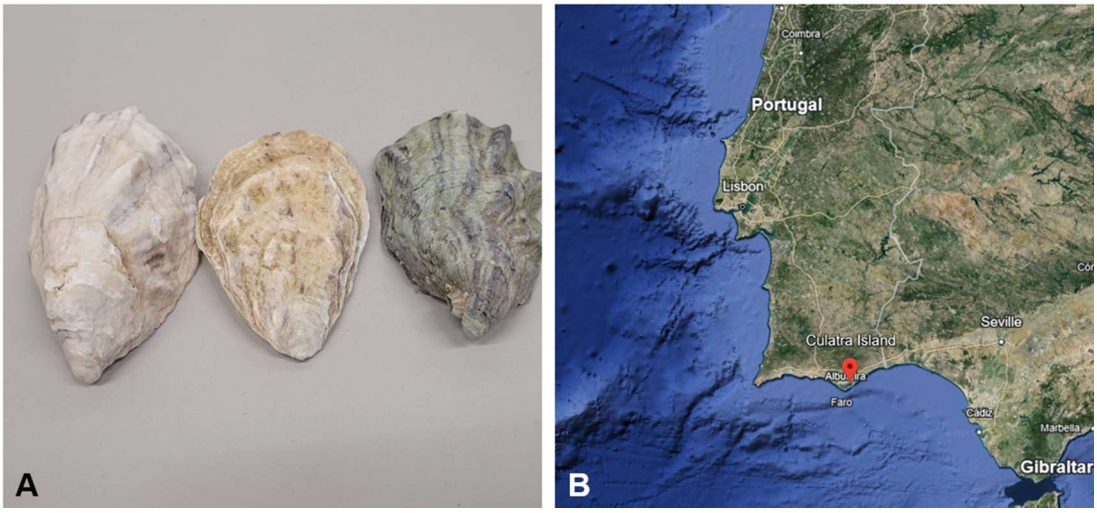


Figura 2 – Ostras da espécie *Crassostrea Gigas* (A); Localização da Ilha da Culatra (Google Earth) (B).

3.2 MÉTODOS DE PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta secção apresentam-se as fases necessárias na etapa de pré-processamento do material bruto fornecido. Em cada fase procurou-se minimizar o impacto ambiental e económico do processo.

3.2.1 Passo 1: Separação

Apesar de terem sido expostas a condições ao ar livre por três meses para facilitar a limpeza natural pelos animais e agentes ambientais, uma proporção substancial das conchas de ostras reteve alguma matéria orgânica (Figura 3.A.B) ou permaneceu fechada.

Para garantir a eficácia dos passos subsequentes da fase de preparação, como imersão e lavagem, foi implementado um passo de separação manual. Este envolveu a separação das conchas fechadas e a remoção de matéria orgânica residual através de uma limpeza manual grosseira (Figura 3.C).

O uso deste método de separação manual permitiu o controle da limpeza de cada concha, prevenindo a contaminação das amostras com material orgânico residual, conforme evidenciado pelas Figuras 3.A e 3.B. No entanto, esta técnica demonstrou ter um baixo rendimento, alcançando uma taxa média de separação de aproximadamente 7,5 kg/hora por pessoa. Embora esta taxa tenha sido suficiente para produzir os blocos necessários para este estudo à escala laboratorial, considera-se que deve ser usada uma automatização do processo em aplicações industriais futuras.

3.2.2 Passo 2: Imersão

Os sais, nomeadamente os cloretos, podem constituir uma fonte de anomalias em argamassas e betões. Deste modo, considerou-se um segundo passo que envolve a imersão em água doce das conchas abertas e separadas para dissolução dos sais solúveis. Esta imersão facilita e reduz também o tempo necessário para a remoção dos resíduos orgânicos e das impurezas presentes nas conchas, na lavagem subsequente. Para realizar este procedimento, as ostras foram colocadas em lotes de 10 kg dentro de recipientes impermeáveis, onde foi adicionada água suficiente para cobrir completamente as conchas (Figura 4).

Figura 3 – Restos de matéria orgânica no interior das ostras (A, B); separação manual (C).

Figura 4 – Ostras imersas em água num recipiente impermeável.

3.2.3 Passo 3: Lavagem

Como se referiu, foi incluída uma etapa de lavagem mecânica na preparação das conchas de ostras para remover matéria orgânica e impurezas. Após a imersão, cerca de 10 kg de conchas de ostras foram colocados numa betoneira "TOGEIRA H300". Segue-se um enxaguamento para eliminar as principais impurezas e resíduos da água (Figura 5.A). Após esta passagem de água preliminar, é adicionada uma mistura de sabão e água para completar a limpeza (Figura 5.B e Figura 5.C). Neste processo, as conchas passaram por vários ciclos de remoção de água até que não reste espuma. Em todos esses ciclos a betoneira é ligada por pelo menos 3 minutos, de forma que a mistura e agitação do equipamento auxilia na remoção de sujeiras e detritos das ostras, promovendo uma limpeza eficiente. O processo de lavagem finaliza com a utilização de um jato de água (Figura 5.D).

Para estabelecer o protocolo de limpeza mais eficiente em termos de uso de água, este passo de lavagem foi otimizado variando-se diversos parâmetros, incluindo a quantidade de detergente neutro, a duração da lavagem e o número e a duração dos ciclos de adição/remoção de água. A eficiência da limpeza foi avaliada através da inspeção visual das conchas e pela avaliação da limpidez da água removida das conchas.

Figura 5 – Etapas do processo de lavagem: limpeza preliminar (A); adição de detergente neutro (B); limpeza com o sabão (C); limpeza manual final (D).

3.2.4 Passo 4: Secagem

Após a lavagem, as conchas passaram por uma etapa de secagem para evitar a aglomeração de partículas finas em partículas maiores durante a trituração, o que poderia distorcer os resultados das

distribuições granulométricas subsequentes. As conchas de ostra foram dispostas em tabuleiros metálicos e secas em forno Heraeus UTP20 a 100°C (Figura 6.A).

Figura 6 – Conchas de ostras no processo de secagem a 100 °C (A); pesagem durante o processo de secagem (B).

A massa das amostras foi registada a cada 30 minutos (Figura 6.B) até que a mesma fosse constante. Este procedimento permitiu determinar e otimizar o tempo mínimo necessário dos tabuleiros no forno, e assegurar uma secagem completa das conchas.

A Figura 7 apresenta os resultados das medições de massa realizadas a intervalos de 30 minutos durante o processo de secagem. Observou-se uma estabilização da massa após aproximadamente 3 horas e 30 minutos de secagem (ou seja, uma variação de massa inferior a 0,1%), indicando a evaporação completa da água.

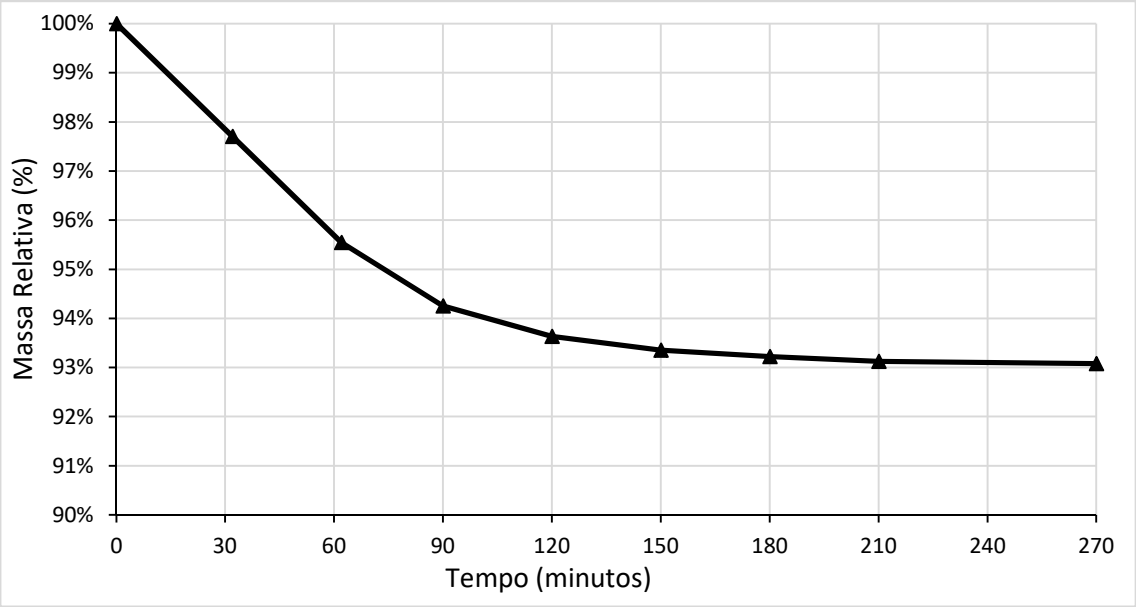


Figura 7 – Medição da massa das conchas de ostras na fase de secagem

Após esta constatação, considerou-se sempre uma secagem das conchas com duração mínima de 3 horas e 30 minutos em forno a 100 °C. Após a secagem, as conchas foram armazenadas em barris herméticos até à sua utilização na fase de processamento.

3.3 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO

A fase de processamento da concha envolve a sua trituração, de modo que os tamanhos das partículas sejam compatíveis, a ponto de substituir a areia, na produção de blocos de betão não estrutural. Portanto, nesta seção descreve-se a metodologia utilizada e disponível no laboratório de construções do Instituto Superior Técnico, para obter uma distribuição granulométrica da areia de concha semelhante à da areia siliciosa utilizada no bloco de betão convencional.

Para avaliar o impacto desses agregados nas propriedades dos blocos, produziu-se uma mistura com distribuição granulométrica semelhante à da mistura de areia siliciosa usada nos blocos de referência. A distribuição granulométrica desta areia é apresentada na Figura 8, indicando-se ainda as curvas dos limites superior e inferior especificadas para agregados de betão segundo a norma americana ASTM C33.

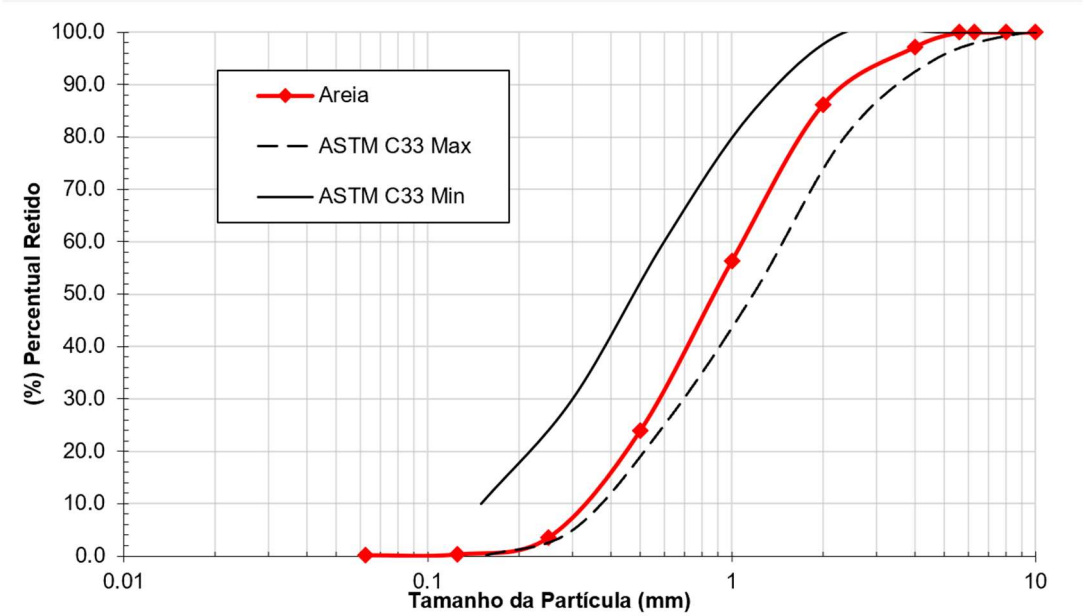


Figura 7 – Curva granulométrica da areia siliciosa usada para a produção de blocos de betão de referência.

Nesta seção descreve-se a metodologia utilizada para produzir uma areia de concha com a mesma distribuição granulométrica da areia siliciosa mostrada acima.

As conchas de ostra foram trituradas com o uso de uma máquina de abrasão de Los Angeles (Figura 9.A), seguindo um método derivado das normas ASTM C131, ASTM C535 e EN 1097-2. A massa de conchas de ostras é colocada no recipiente cilíndrico (Figura 9.C), juntamente com "N" esferas de aço (Figura 9.B). Após a selagem do recipiente com uma tampa de aço, a máquina é operada a uma velocidade de rotação de 33 rpm, resultando um produto fragmentado e desgastado (Figura 9.D).

Inicialmente, uma amostra de conchas de ostras com uma massa total de 20 kg e 42 esferas de aço pesando 380 g cada (totalizando 16 kg) foi colocada na máquina de Los Angeles, resultando numa razão de 1,25 entre o peso da amostra e o peso da carga abrasiva. Para determinar o tempo adequado de trituração, o processo foi interrompido a cada 5 minutos para medições da distribuição do tamanho dos grãos conforme especificado na norma europeia EN 933-1. Após cada interrupção, o processo foi reiniciado até que a distribuição de tamanho de grão desejada fosse alcançada. Caso o tempo de

trituração excedesse 40 minutos sem alcançar o resultado desejado, o método seria repetido com uma nova amostra de conchas e uma razão de massa triturada / carga abrasiva inferior.

Após os primeiros 5 minutos de processamento, observou-se que a maioria das conchas ainda estava intacta, indicando que esta configuração proporcionou uma fragmentação e abrasão insuficiente. Como resultado, foi necessário ajustar a razão entre massa de conchas e número de bolas de aço, para garantir uma trituração eficaz. Dessa forma, o método repetiu-se utilizando uma amostra de 10 kg de conchas e as mesmas 42 bolas de aço.

Figura 8 – Máquina Los Angeles (A); Bola Metálica (B); Conchas de ostra antes do processamento (C); Areia de ostra após o processamento (D).

A Figura 10 apresenta os perfis de distribuição de tamanho de grão medidos ao longo do processo de trituração. Durante este ensaio, as curvas de distribuição de tamanho de grão obtidas mostraram-se significativamente dispersas em comparação com os limites padrão ASTM C33. A proporção de partículas mais finas foi adequada após um curto período de processamento, enquanto, após 35 minutos de trituração, a amostra de areia conchas ainda continha uma proporção excessivamente elevada de partículas grossas. Para alcançar a distribuição desejada de tamanho de grão, foi necessário remover partículas com diâmetros superiores a 4 mm, representando cerca de 7,5% da amostra total. Isso resultou na modificação da curva de distribuição granulométrica, a qual também está indicada na Figura 10 ("curva ajustada aos 35 minutos").

Ao final da fase de processamento, foi obtida uma mistura de agregados que correspondia à distribuição de tamanho de grãos da areia de sílica de referência, conforme mostrado na Figura 7. Esta consistência na distribuição de tamanho de grãos é crucial para garantir a replicabilidade das propriedades dos blocos de betão não estrutural produzidos. Com base nestes resultados, o método de processamento subsequente utilizado no projeto basear-se-á nos seguintes parâmetros: (i) razão de massa de conchas para bolas de aço de 0,625; (ii) duração de trituração de 35 minutos; e (iii) exclusão de partículas com diâmetros superiores a 4 mm.

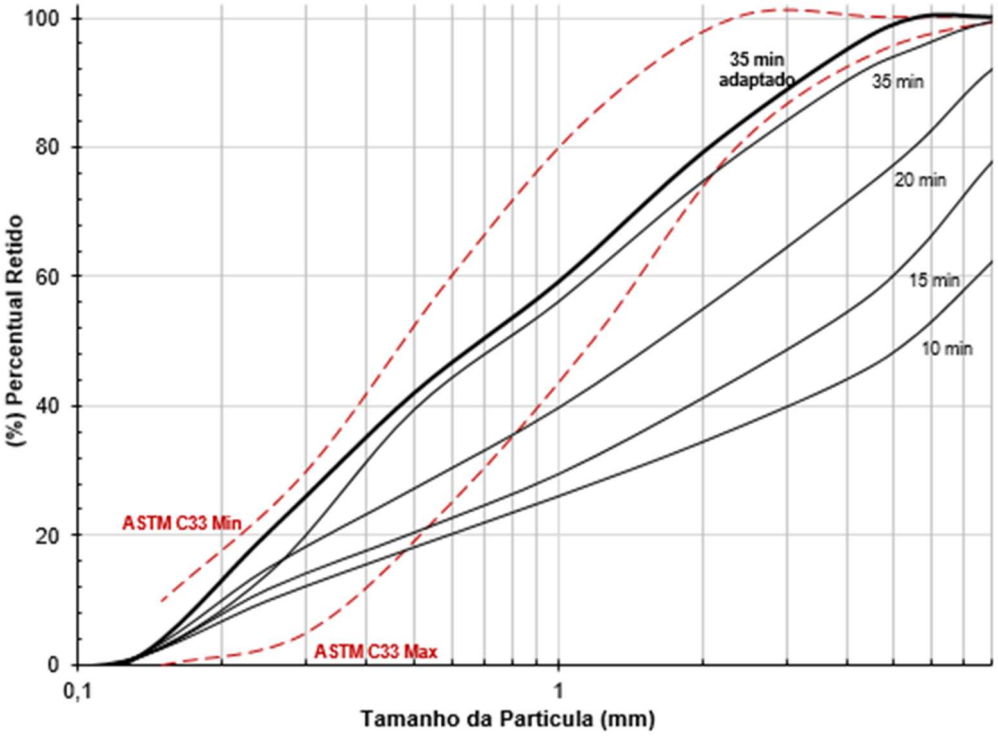


Figura 10 – Diferentes curvas granulométricas obtidas durante o processamento.

O rendimento do processo foi avaliado, e revelou perdas significativas para a máquina de abrasão de Los Angeles durante a remoção da concha triturada (aproximadamente 10% em massa), e durante a peneiração para separação das partículas maiores de 4 mm (aproximadamente 7,5% em massa). Com isso, a perda de material resultante total foi de 16,75%, por lote. No entanto, as partículas grossas previamente separadas podem ser reprocessadas, e se transformarem em partículas mais finas. O pó resultante desse reprocessamento pode ser utilizado como filler em substituição ao ligante, ou em um ligante à base de concha de ostra, mitigando assim a perda de material e melhorando a eficiência geral do processo.

4 CONCLUSÕES

Os resultados preliminares alcançados até ao momento refletem um avanço substancial na etapa de pré-processamento e processamento das conchas de ostras (Atividade 1). A eficácia dos métodos de separação, imersão, lavagem e secagem foi criteriosamente avaliada, proporcionando perceções valiosas para a otimização destes processos. Adicionalmente, evidenciou-se a importância crucial da fase de processamento em materiais de origem biológica, enfatizando a relevância da análise da granulometria para assegurar resultados consistentes.

A fase de produção e análise das propriedades dos blocos de betão estão em desenvolvimento. Os dados preliminares indicam uma tendência positiva. Porém, apesar dos progressos alcançados, persistem desafios como: otimização no processo de lavagem, redução das perdas de material durante o processamento, produção de maiores quantidades de blocos, e a necessidade de escalar os processos a nível industrial. A automação de determinados procedimentos, e a investigação contínua para otimizar as formulações dos blocos são cruciais, para viabilizar tecnicamente e economicamente, a aplicação das conchas de ostra na indústria da construção em larga escala.

Por último, ao integrar um biomaterial proveniente da indústria da aquacultura na produção de blocos de betão, o projeto BLOCOSYTER não apenas promove inovação e sustentabilidade no setor da construção, mas também contribui de forma inovadora para a economia circular azul. Dessa forma, o sucesso contínuo deste projeto poderá estabelecer um precedente para iniciativas futuras que visem a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos naturais, demonstrando um modelo viável de aproveitamento de resíduos biológicos em aplicações de alto valor agregado.

AGRADECIMENTOS

O estudo apresentado foi realizado no âmbito dos projetos: BLOCOYSTER (VI edição do prémio Mares Circulares) e SHELLTER (FBR_OC2_30). Os autores agradecem, respetivamente, o financiamento pelo prémio Mares Circulares que resulta da parceria entre a Liga para a Proteção da Natureza e a Coca-Cola; e o financiamento do fundo bilateral EEA Grants (Portugal e Noruega). Os autores também são gratos ao CERIS (UIDB/04625/2020; https://doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020) e ao CERENA (UID/ECI/04028/2019), ambos unidades de investigação do IST, e à FCT pelo apoio financeiro com a bolsa de doutoramento UI/BD/151151/2021 (https://doi.org/10.54499/UI/BD/151151/2021).

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials. (n.d.). ASTM C33-Standard specification for concrete aggregates. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (n.d.). ASTM C131-Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (n.d.). ASTM C535-Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. ASTM International.

European Committee for Standardization. (n.d.). EN 1097-2: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.

European Committee for Standardization. (n.d.). EN 933-1: Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.

Alonso, A.A., Álvarez-Salgado, X.A., Antelo, L.T., 2021. Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. J. Clean. Prod. 279, 123873. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123873

Bellei, P., Schäfer, G., Magalhães, F., Torres, I., Costa, E., Solstad, R., Flores-Colen, I., 2024. Oyster shells' incorporation into mortar to achieve blue circular economy – LCA case study in Portugal. Procedia Struct. Integr., ESICC 2023 – Energy efficiency, Structural Integrity in historical and modern buildings facing Climate change and Circularity 55, 96–102. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.013

Bellei, P., Torres, I., Solstad, R., Flores-Colen, I., 2023. Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review. Buildings 13, 1546. https://doi.org/10.3390/buildings13061546

Lee, M., Tsai, W.-S., Chen, S.-T., 2020. Reusing shell waste as a soil conditioner alternative? A comparative study of eggshell and oyster shell using a life cycle assessment approach. J. Clean. Prod. 265, 121845. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121845

Liu, S., Zhang, Y., Liu, B., Zou, Z., Liu, Q., Teng, Y., Zhang, L.V., 2022. Sustainable Use of Waste Oyster Shell Powders in a Ternary Supplementary Cementitious Material System for Green Concrete. Materials 15, 4886. https://doi.org/10.3390/ma15144886

Magalhães, F.C., Bellei, P., Flores-Colen, I., da Costa, E.M., 2024. Blue Circular Economy—Reuse and Valorization of Bivalve Shells: The Case of Algarve, Portugal. Recycling 9. https://doi.org/10.3390/recycling9020027

Mo, K.H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Lee, S.C., Goh, W.I., Yuen, C.W., 2018. Recycling of seashell waste in concrete: A review. Constr. Build. Mater. 162, 751–764. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009

Peceño, B., Bakit, J., Cortes, N., Alonso-Fariñas, B., Bonilla, E., Leiva, C., 2022. Assessing Durability Properties and Economic Potential of Shellfish Aquaculture Waste in the Construction Industry: A Circular Economy Perspective. Sustainability 14, 8383. https://doi.org/10.3390/su14148383

Topić Popović, N., Lorencin, V., Strunjak-Perović, I., Čož-Rakovac, R., 2023. Shell Waste Management and Utilization: Mitigating Organic Pollution and Enhancing Sustainability. Appl. Sci. 13, 623. https://doi.org/10.3390/app13010623

Wungkhai, K., Chand, J., 2024. Experimental study on mechanical properties of Oyster-sea shell powder, fly ash, GGBS and hydraulic lime as partial replacement of cement in concrete. AIP Conf. Proc. 3100, 030004. https://doi.org/10.1063/5.0209459

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PLATAFORMA ELETRÓNICA DE ECO-DESIGN DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Júlia Ferreira Fontoura[a]; José Dinis Silvestre[a]

[a]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, julia.fontoura@tecnico.ulisboa.pt; jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a implementação de uma plataforma eletrónica de *eco-design* para centrais de produção de betão e de misturas betuminosas que permita verificar a alteração do perfil ambiental dos produtos e dos seus impactes a partir da variação dos dados inseridos. Ao compor novos cenários de produção com alterações reais ou potenciais nas composições, a empresa pode assim explorar em tempo real os resultados obtidos e as consequências em termos de impacte ambiental dos respetivos materiais.

O método proposto é baseado num formulário online simplificado e adaptado a partir da introdução dos dados de produção. A introdução dos dados é feita de forma direta num modelo da produção do betão e do das misturas betuminosas previamente desenvolvido num software de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), incluindo todos os processos abordados no Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do material dentro dos portões da fábrica e no final de vida, podendo também incluir a produção das matérias-primas mais comuns.

O modelo desenvolvido na plataforma será previamente validado por casos de estudos experimentais de ACV de materiais semelhantes para permitir o aperfeiçoamento necessário e, posteriormente, ser implementado de forma a viabilizar a realização dos estudos de ACV e do respetivo relatório de suporte à Declaração Ambiental do Produto (DAP) de forma mais célere e sistemática para este setor. A plataforma considera as normas europeias e as Regras de Categoria dos Produtos aplicáveis e em vigor, permitindo também que a própria empresa inicie o processo de verificação e consiga o registo da DAP.

Uma vez finalizados os estudos de ACV, a empresa poderá aceder ao módulo online para implementar a análise e comparação dos resultados de impactes ambientais dos seus respetivos produtos, o que facilitará a identificação dos *hot-spots,* das soluções de *eco-design* mais eficientes para cada tipo de produto, e das estratégias de descarbonização mais adequadas.

PALAVRAS-CHAVE

Avaliação do Ciclo de Vida, betão, Declaração Ambiental do Produto, eco-design, Impactes ambientais.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está entre os principais agentes que dificultam o progresso do desenvolvimento sustentável global devido ao alto consumo de recursos naturais e à significativa produção de resíduos. Em 2019, o setor da Construção Civil foi responsável por 38% das emissões globais de CO_2, enquanto em 2021 permaneceu responsável por 37%, incluindo emissões operacionais e energéticas (UNEP, 2022). Apesar de todos os dados e relatórios que traduzem explicitamente os impactes diretos desse setor, as informações coletadas não são completas, uma vez que a avaliação sobre o impacte global do ambiente construído deve abranger uma grande quantidade de componentes e instalações, incluindo construção privada e pública, e cada entrada e saída das etapas do ciclo de vida do ambiente construído (Horvath, 2004), de forma a tentar quantificar seus impactes negativos a fim de diminuí-los (Silvestre, 2012).

Na União Europeia, os edifícios residenciais e comerciais representam em média 40% do consumo final total de energia e emissões de CO_2, portanto cerca da metade das emissões não cobertas pelo "Sistema de Comércio de Emissões", e aproximadamente 40% de todos os resíduos produzidos por esta comunidade de países. Dessa forma, todas as reduções possíveis no impacte de um edifício levam a benefícios econômicos, sociais e ambientais significativos, e o potencial de redução deste tipo de construção é alto, especialmente nas emissões de CO_2, e apresenta custos de abatimento negativos ou baixos (CIB, 1999; CE, 2008; PNUMA, 2007). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) indica que a Indústria da Construção e Edificações apresenta um significativo potencial de mitigação global para atingir os objetivos do Acordo de Paris, sugerindo a descarbonização do processo de produção dos materiais de construção como uma mudança crucial (IPCC, 2022).

O reconhecimento internacional da gravidade dessa situação resultou na elaboração de ações globais, princípios de atuação e diretrizes destinados a promover e orientar a adoção de práticas de projeto e construção mais sustentáveis. No entanto, o aumento nos índices de emissão de CO_2, conforme indicado pelo *Global Building Climate Tracker* 2022 (UNEP, 2022), reflete que poucas mudanças efetivas estão a ocorrer no setor da construção para seguir o caminho da redução de consumo de energia e de emissões. Este facto realça a urgência na implementação de políticas mais incisivas que priorizem e incentivem a sustentabilidade no ambiente construído e na cadeia de produção de materiais de construção. Essas ações de mudança são essenciais para facilitar o processo de descarbonização do setor no âmbito nacional, europeu ou global.

2 PLATAFORMA ELETRÓNICA DE ECO-DESIGN

2.1 METODOLOGIA

No âmbito da redução dos impactes ambientais provenientes do setor da construção civil, o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma eletrónica de *eco-design* nas centrais de produção de betão e de misturas betuminosas facilita a adoção de práticas de projeto e produção mais sustentáveis e contribui para uma cadeia de produção mais limpa destes tipos de material, uma vez que permite analisar a alteração no perfil ambiental do produto e seu respetivo impacte com base nos dados inseridos no sistema. Por se tratar de uma plataforma digital, ao criar novos cenários de produção a fim de estudar alterações potenciais ou reais nas composições a serem fabricadas, as empresas recebem em tempo real os resultados e as implicações ambientais dos materiais e processos envolvidos na cadeia de produção.

O método proposto baseia-se num formulário online simplificado, adaptado de acordo com os dados de produção propostos pelo utilizador. As informações são incorporadas diretamente num modelo de produção de betão e de misturas betuminosas padrão previamente desenvolvido num software de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que abrange todos os processos abordados no Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do material, desde os portões de fábrica até o final de vida útil. Ademais, a plataforma pode incluir a etapa de produção das matérias-primas mais comuns.

2.2 CASO DE ESTUDO

Este trabalho tem como base o estudo, em desenvolvimento, da implementação de uma plataforma eletrónica em dois complexos industriais com centrais de produção de betão e de misturas betuminosas. Este estudo propõe a análise pormenorizada ao desempenho ambiental de betões estruturais e de misturas betuminosas produzidos nas duas unidades industriais, conforme listado em seguida, correspondendo no total a 6 estudos de ACV e a 3 Declarações Ambientais de Produto (DAPs). Este trabalho inclui assim duas fases sequenciais e complementares: 1 – Avaliação do ciclo de vida ambiental; 2 –DAPs.

Os grupos de materiais objeto de estudo são os seguintes:

- Grupo 1 – Betões estruturais (incluindo betões com e sem agregados reciclados);
- Grupo 2 – Misturas betuminosas a quente (incluindo misturas com e sem agregados reciclados);
- Grupo 3 – Misturas betuminosas a frio (incluindo misturas com e sem agregados reciclados).

2.2.1 Avaliação do Ciclo de Vida ambiental – ACV

A primeira fase do estudo inclui a recolha de dados *in situ* relativos às fases do processo de produção identificadas após visitas preparatórias (Declarações Ambientais **de Produto – DAP**

A segunda fase do estudo terá em consideração as caraterísticas finais definidas para os betões estruturais e as misturas betuminosas estudados na Fase 1, sendo considerado 1 m^3 de cada um dos grupos de materiais como unidade declarada. Com base nos resultados obtidos a partir das análises realizadas na primeira fase e no perfil ambiental do betão estrutural e das misturas betuminosas, serão elaborados dois relatórios com pressupostos dos estudos de ACV realizados de modo a servirem de base ao desenvolvimento das 3 DAPs, seguindo as diretrizes incluídas nas normas internacionais e europeias (EN 15804+A2: 2019) aplicáveis.

Tabela 1 - Fases do processo de produção do betão estrutural.

1	**Recepção de matérias-primas e armazenamento**
1.1	Balanço de massas
1.2	Consumos de água
1.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
1.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
1.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
1.6	Balanços de energia
1.7	Dados sobre o transporte
2	**Mistura mecânica**
2.1	Balanços de massa
2.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)

2.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
2.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
2.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
2.6	Balanços de energia
3	**Carregamento**
3.1	Balanços de massa
3.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
3.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
3.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
3.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
3.6	Balanços de energia

, Tabela 2 e

Tabela *3*). Com o auxílio de softwares específicos para a realização do Inventário do Ciclo de Vida dos betões e das misturas betuminosas nos complexos industriais, segue-se a posterior definição do fluxograma de produção dos mesmos, apresentados nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3.

A ACV ambiental em desenvolvimento considera o processo do berço ao portão e fim-de-vida de 1 m^3 de cada um dos grupos de materiais em cada uma das duas centrais. Durante a realização da ACV serão considerados os valores médios ponderados das composições selecionadas em conjunto com a empresa para este estudo, podendo algumas características diferenciadas serem as mais representativas do processo de produção das centrais, como resistências e classes de exposição.

2.2.2 Declarações Ambientais de Produto – DAP

A segunda fase do estudo terá em consideração as caraterísticas finais definidas para os betões estruturais e as misturas betuminosas estudados na Fase 1, sendo considerado 1 m^3 de cada um dos grupos de materiais como unidade declarada. Com base nos resultados obtidos a partir das análises realizadas na primeira fase e no perfil ambiental do betão estrutural e das misturas betuminosas, serão elaborados dois relatórios com pressupostos dos estudos de ACV realizados de modo a servirem de base ao desenvolvimento das 3 DAPs, seguindo as diretrizes incluídas nas normas internacionais e europeias (EN 15804+A2: 2019) aplicáveis.

Tabela 1 - Fases do processo de produção do betão estrutural.

1	**Recepção de matérias-primas e armazenamento**
1.1	Balanço de massas
1.2	Consumos de água
1.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
1.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
1.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
1.6	Balanços de energia
1.7	Dados sobre o transporte
2	**Mistura mecânica**
2.1	Balanços de massa
2.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
2.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
2.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
2.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
2.6	Balanços de energia
3	**Carregamento**
3.1	Balanços de massa
3.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
3.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
3.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
3.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
3.6	Balanços de energia

Tabela 2 - Fases do processo de produção de misturas betuminosas a quente.

1	**Recepção de matérias-primas e armazenamento**
1.1	Balanço de massas
1.2	Consumos de água
1.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)

1.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
1.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
1.6	Balanços de energia
1.7	Dados sobre o transporte
2	**Mistura, secagem, crivagem e armazenamento de agregados**
2.1	Balanços de massa
2.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
2.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
2.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
2.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
2.6	Balanços de energia
3	**Mistura com betume, armazenamento das misturas e carregamento**
3.1	Balanços de massa
3.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
3.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
3.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
3.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
3.6	Balanços de energia

1.1	Balanço de massas
1.2	Consumos de água
1.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
1.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
1.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
1.6	Balanços de energia
1.7	Dados sobre o transporte
2	**Mistura e carregamento**
2.1	Balanços de massa
2.2	Consumos de água (proveniente de lençóis freáticos)
2.3	Saídas (produtos e resíduos sólidos)
2.4	Saídas (produtos e resíduos líquidos)
2.5	Saídas (produtos e emissões gasosos)
2.6	Balanços de energia

Tabela 3 - Fases do processo de produção de misturas betuminosas a frio.

1	**Recepção de matérias-primas e armazenamento**

Figura 1 - Fluxograma de produção do betão estrutural.

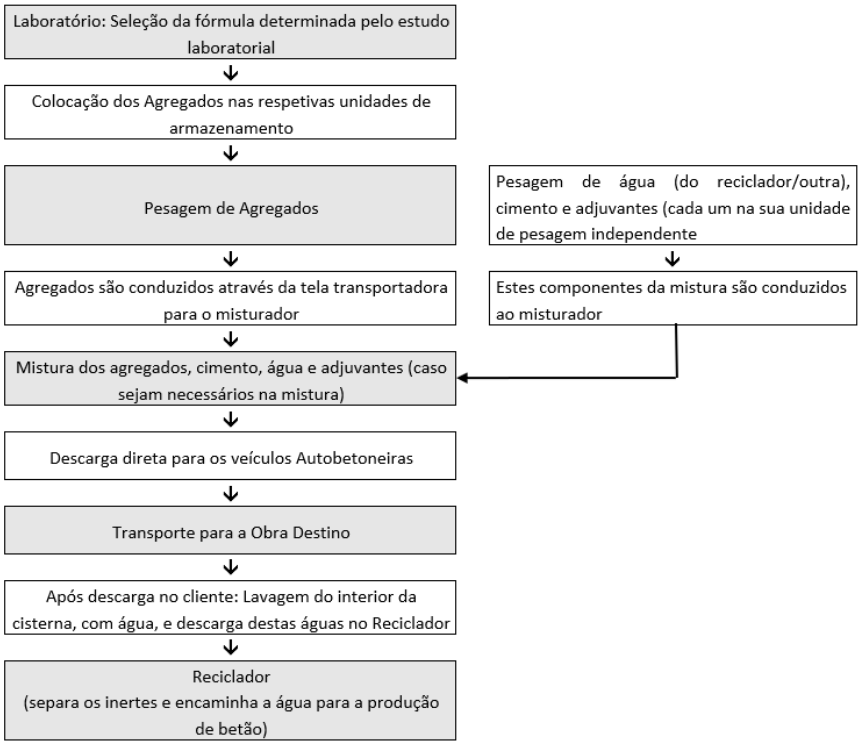


Figura 2 - Fluxograma de produção de misturas betuminosas a quente.

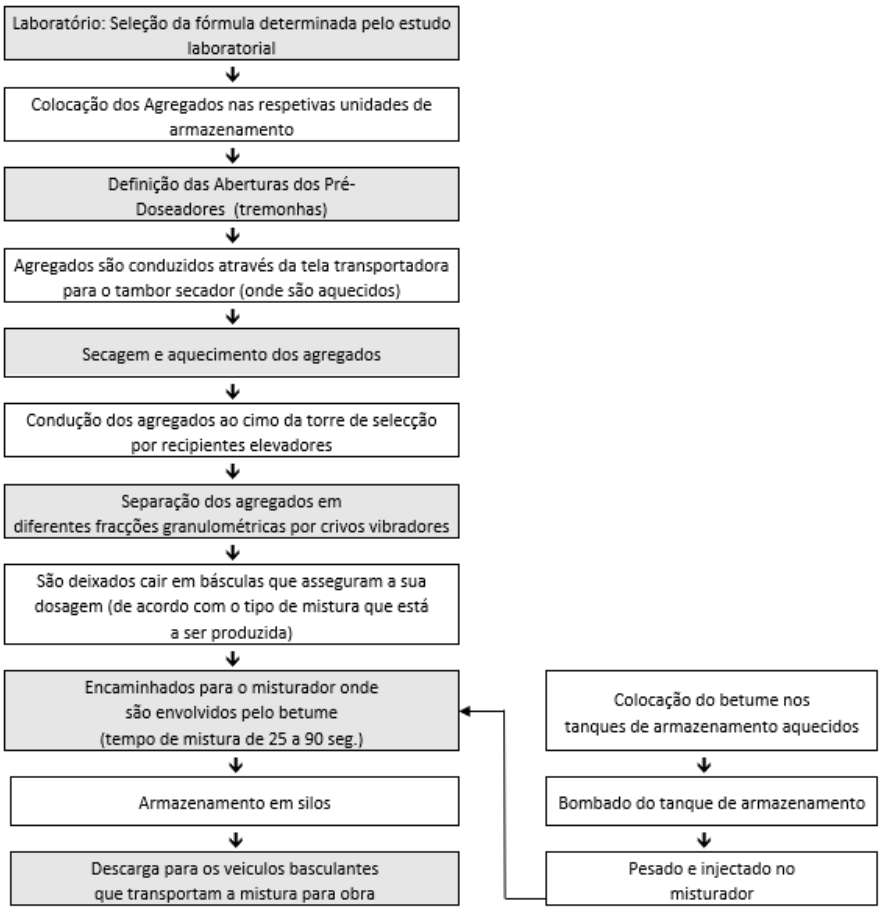
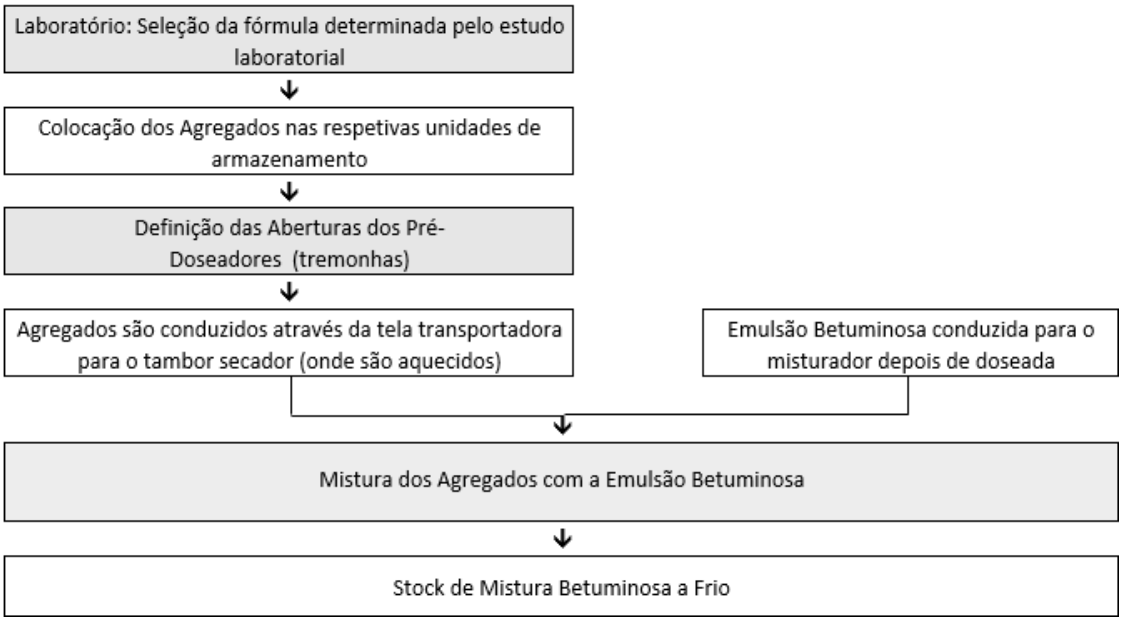


Figura 3 - Fluxograma de produção de misturas betuminosas a frio.



As DAPs serão obtidas no âmbito do programa nacional DAPHabitat, sendo como tal elaboradas em concordância com as Regras de Categoria de Produtos aplicáveis neste programa. Uma vez verificada e registada no programa nacional DAPHabitat, cada DAP será reconhecida através da ECOPlatform em programas de DAP para a construção em conjunto com materiais oriundos de diversos países europeus. A Declaração Ambiental de Produto (DAP) é requerida, quando disponível, pelo Regulamento dos Produtos da Construção (RPC) para a avaliação da utilização sustentável de recursos, e do impacte no ambiente das obras de construção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os casos de estudos descritos de ACV de três grupos de materiais semelhantes permitirá a validação prévia e o aperfeiçoamento necessários ao desenvolvimento da plataforma de *eco-design* de materiais de construção proposta neste artigo. Posteriormente, a mesma será implementada de forma a viabilizar a realização de estudos de ACV e do respetivo relatório de suporte à DAP de forma mais célere e sistemática para este setor. A plataforma considera as normas europeias e as Regras de Categoria dos Produtos aplicáveis e em vigor, permitindo também que a própria empresa inicie o processo de verificação e consiga o registo da DAP.

Uma vez finalizados os estudos de ACV, a empresa poderá aceder ao registo na plataforma eletrónica de eco-design e no respetivo módulo online a desenvolver para cada central de produção para implementar a análise e a comparação dos resultados de impactes ambientais dos seus produtos, o que facilitará a identificação dos *hot-spots,* das soluções de *eco-design* mais eficientes para cada tipo de produto, e das estratégias de descarbonização mais adequadas.

Os relatórios base a serem produzidos no final deste estudo incluirão ainda, para cada um dos grupos de materiais objeto de DAP, passaportes de circularidade e fichas de eco-design. Dessa forma, a utilização da plataforma eletrónica possibilitará a comparação fácil, rápida e eficiente de resultados obtidos para produtos semelhantes e/ou concorrentes que sejam objeto de DAP, permitindo que a empresa entenda de forma eficaz a sua cadeia de fabrico e os impactes ambientais causados por esta ou por potenciais mudanças que queira realizar, buscando sempre mitigá-los.

4 CONCLUSÕES

A plataforma eletrónica de eco-design de betão mostra-se desde o início como uma iniciativa de impacte positivo para as empresas e respetivos usuários, uma vez que está alinhada com os objetivos principais do Acordo de Paris. Contribui assim para a descarbonização do processo de produção de materiais de construção em grande escala pela indústria da construção civil.

A plataforma apresenta ainda um grande potencial de implementação noutras empresas e a sua eficácia poderá ser avaliada de maneira efetiva na etapa final do estudo proposto. Um ponto importante a ser considerado é a base de dados da mesma, que pode ser alvo de estudos futuros de forma que a plataforma possa ser divulgada e utilizada de forma eficaz a uma escala global, uma vez que inicialmente inclui em sua maioria dados europeus e ainda apresenta o uso limitado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FCT através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020). Os autores agradecem também aos fabricantes que disponibilizaram a informação necessária à elaboração deste documento.

REFERÊNCIAS

HORVATH, A. (2004). Construction materials and the environment. Annual Review of Environment and Resources (29). pp. 181-204.

INTERGOVERNMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Working Group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.”, Cambridge, UK e Nova Iorque, EUA, 2022. [Online]. Disponível em: www.ipcc.ch

SILVESTRE, J. D. (2012). Life Cycle Assessment from “cradle to cradle” of building assemblies – application to external walls. Ph.D. Thesis in Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME UNEP, “2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector”, Nairobi, 2022. Acessado: 23 de outubro de 2023. [Online]. Disponível em: www.globalabc.org.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MECHANICAL STRENGTH AND SHRINKAGE OF EARTH MORTARS STABILIZED WITH RECYCLED CEMENT

Andrea Balboa[a]; José Alexandre Bogas[b]; Antonio José Tenza-Abril[c]; Yosbel Pérez-Hernández[d]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, andrea.ferre.balboa@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, abogas@civil.ist.utl.pt

[c]Department of Civil Enginering, University of Alicante, Carretera San Vicente, s/n, 03080, Alicante, Spain, ajt.abril@ua.es

[d]Department of Civil Enginering, University of Alicante, Carretera San Vicente, s/n, 03080, Alicante, Spain, yph4@alu.ua.es

ABSTRACT

In recent decades, earth construction has become increasingly popular due to the growing environmental awareness in society. This is directly linked to the necessity of conducting further research into the development of more eco-friendly materials and techniques for the construction industry. One example of this is the use of earth mortars. The utilisation of stabilisers in earth construction materials is commonly employed for improving durability and strength, as well as enhancing water resistance. In order to avoid the use of non-sustainable stabilisers such as ordinary Portland cement (OPC), the use of low-carbon thermoactivated recycled cement (RC) is being studied as a more eco-efficient solution. Unstabilised and stabilised earth mortars with 12%, 16% and 20% OPC and RC are being characterised in terms of some fresh (consistency and fresh density) and hardened properties (bulk density, flexural and compressive strength and drying shrinkage), up to 28 days. The results showed that earth mortars stabilized with OPC demonstrated enhanced strength properties in comparison to those stabilized with RC. However, RC mortars presented an improvement on mechanical properties when compared to unstabilised mortars.

Key words: Earth mortar, recycled cement, earth stabilization, compressive strength, shrinkage

1 INTRODUCTION

The construction industry has a significant environmental impact, both in terms of greenhouse gases (GHG) emissions and consumption of natural resources (EGD, 2022). For this reason, the technical and scientific domain are looking for new alternatives that considerably reduce the environmental impact, while still meeting human needs, leading society to search for the development of sustainable materials and construction techniques. In this context, earth building materials are currently regaining popularity due to their ecological nature, high availability, low cost and low embodied energy (Schroeder, 2012). In fact, earth as a building material has numerous benefits, both in terms of sustainability and in terms of comfort and health (Jayasinghe *et al*., 2016). However, low integrity and high susceptibility to water action are major disadvantages of earth building materials (Alam *et al*., 2015;Bogas *et al*., 2023). Such problem can be minimised by stabilisation. Ordinary Portland cement (OPC) is currently used in earth stabilisation (Bogas *et al*., 2023; Miraki *et al*., 2022), especially in dry techniques, such as in compressed earth blocks (CEB). However, the incorporation of OPC is against the ecological nature of earth construction. Consequently, the development of more eco-friendly alternative stabilisers is currently focus of research. In this context, low-carbon thermo-activated recycled cement (RC) recovered from old cementitious materials has been explored as a new more

eco-efficient alternative to OPC (Bogas *et al*., 2020; Carriço *et al*., 2021; Bogas *et al*., 2022a). At the same time, GHG are reduced, fewer natural resources are consumed and construction waste is reused (Carriço *et al*., 2020a). In fact, the thermal activation of the waste cementitious material is carried out at lower temperatures so that the limestone decarbonation phase is avoided (Baldusco *et al*., 2019). The three main steps in the production of RC are (Bogas *et al*., 2022a): 1) separation of the cement fraction from the concrete waste; 2) particle reduction of the cement fraction; 3) thermal activation of the cement fraction into recycled cement. One relevant drawback of RC is its high water demand, which is attributed to the i) porous, rough nature (Carriço *et al*., 2020b) and high specific area of RC, being 15 times larger than that of the anhydrous cement (Baldusco *et al*., 2019); and ii) agglomeration of dehydrated cement paste particles that can trap the free water (Yu & Shui, 2013).

RC already proved to be a suitable stabilizer in earth construction, but studies have been limited to CEB (Bogas *et al*., 2023). However, the environmental issue is more serious in earth mortars for masonry or rendering, because greater volumes of binder are used than in mechanically stabilised CEB. Furthermore, earth mortars are wet mixes, with RC affecting fresh behaviour and clay stabilization in a different way. To the best of authors' knowledge, no studies have been conducted in this domain, justifying their investigation.

The main objective of this study is to evaluate the viability of RC as a stabilising agent in earth mortars, which can be defined as a mixture consisting mainly of raw earth, the composition of which includes a clay fraction of varying proportion and water To this end, unstabilised and stabilised earth mortars with 12-20% RC are characterised in terms of fresh properties (consistency and fresh density), mechanical strength (flexural and compressive strength) and drying shrinkage, and compared with mortars of equal composition produced with OPC. To further improve their sustainability nature, earth mortars also include 25% replacement of the earth by construction and demolition waste (CDW).

2 MATERIALS AND METHODS

Eight different compositions of earth mortars were produced, four stabilised with ordinary Portland cement (OPC), three with recycled cement (RC) obtained from grinding and heating laboratory-made cement paste, and one unstabilised mortar. Mortars are intended for use in masonry joints and renders for CEB walls, therefore it is essential that the composition of mortars and CEB are compatible. With regard to the earth fraction and the aggregates that constitute the earth mortars, the material was sieved under 2 mm, as recommended in ARS 681 (1996).

2.1 EARTH FRACTION

The earth fraction used to produce the mortars was mainly composed by a sandy soil from Mafra, provided by the Portuguese air force (FA soil). The soil was air dried, and pulverized before used. Its particle size distribution is shown in Figure 1, which was determined according to LNEC E 239 (1970). For the non-stabilised composition, a fine clayey powder (TV) supplied by the company Cobert SA, from Torres Vedras was also added to compensate the lack of fine material in FA soil and to improve the earth plasticity (Figure 1). This TV is a dry waste collected from the dedusting process during the manufacture of ceramic tiles, essentially composed by fine particles of silt and clay. From X-ray diffraction analysis, both FA and TV were mainly composed by illitic and kaolinitic clay minerals.

The values for the liquid limit, plastic limit and plasticity index of FA and TV were 23.7% and 47%, 18.4% and 25.7%, and 5.4% and 21.3%, respectively, determined according to NP 143 (1969). The particle density of FA and TV was 2633 kg/m^3 and 2630 kg/m^3, respectively. The presence of organic matter was determined according to XP P94-047 (1998), being <0.8% for FA and <1.5% for TV, respectively.

The optimum water content (12.8%) and maximum dry density (1840 kg/m^3) of FA was obtained from the standard effort Proctor test, following the ASTM D698 (2021).

2.2 FINE AGGREGATES

Natural fine sand (FS) of siliceous nature and the particle size distribution shown in Figure 1 was also incorporated in earth mortars to adjust their granulometry and to control their early age shrinkage. The FS had a particle density of 2600 kg/m^3 and a water absorption of 0.4%, determined in accordance with NP EN 1097-6 (2000).

Also, to improve the sustainability of earth mortars, 25% by volume of the earth mixture was replaced with fine CDW, considering earth as the mixture of FA, TV (if added), FS and CDW. The fine CDW was collected from the Portuguese recycling plant, *Vimajas*, and was composed by unbound aggregates, natural stone, concrete, mortar and ceramic, as well as other minor compounds, such as bituminous and glass. The particle density and water absorption of CDW was 2559 kg/m^3 and 4.3%, respectively. The particle size distribution of CDW is presented in Figure 1.

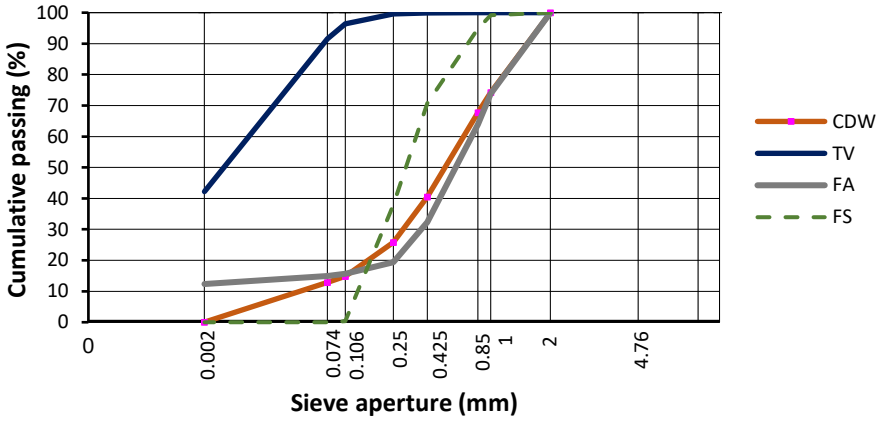


Figure 1 - Particle size distribution of the aggregates and soil used to produce the earth mortars.

2.3 STABILISERS - CEMENT AND RECYCLED CEMENT

OPC Type I 42.5R was used as the refence stabiliser and to produce the RC. The RC was retrieved from laboratory-made cement pastes cubes (15x15x15 cm) produced with OPC and 0.55 of water to cement ratio (w/c). The cement pastes were cured in a wet chamber for 90 days at 20 ± 1 ºC and 90% ± 5% relative humidity. After curing, the pastes went through a fragmentation and milling process. After crushing using a hydraulic press and a hammer, the fragments were milled in a Los Angeles Abrasion steel drum machine with 900 revolutions, at a speed of 31-33 rpm and using 12 metal balls weighing approximately 440 g each. The resulting material was then oven-dried at 70ºC for 12 hours to prevent it from sticking to the walls during the next milling process. Finally, the cement waste was milled in a planetary ball mill at 400 rpm for 5 minutes, until most particles were under 125 µm. Thermoactivation was carried out at 650ºC, following the procedure defined in Real *et al*. (2020). OPC and RC densities determined by helium pycnometry were 3.14 g/cm^3 and 2.83 g/cm^3, respectively. The final particle size distributions of OPC and RC are shown in Figure 2.

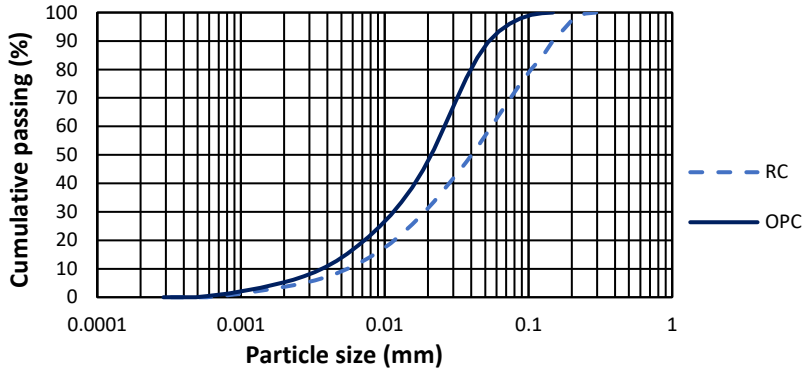


Figure 2 - Particle-size distribution of OPC and RC.

2.4 COMPOSITION AND PRODUCTION OF EARTH MORTARS

Eight earth mortar compositions were considered in this study, taking into account different types (RC, OPC) and amounts of stabiliser (12%, 16%, 20% by weight of dry earth). The range of stabiliser content was defined taking into account other authors (Azeredo *et al*., 2007;Gomes *et al*., 2019) and the recommendations of ARS 681 (1996). According to this document, earth mortars for bed joints should be produced with more 50% stabiliser than CEB, which usually contains 6-10% stabiliser by weight of dry earth (ARS 681, 1996; Venkatarama Reddy, 2012; Bogas *et al*., 2023). The 20% is an upper limit closer to usual amounts adopted in conventional lean cement mortars.

As RC has high water demand, mortars with OPC were produced with lower w/c than those with RC of similar workability. Therefore, in order to also compare mortars of equal w/c, one extra composition with 12% OPC, but the same mixing water of the mortar with 12% RC, was defined (OPC12Weq). Finally, an unstabilised mortar (SE) was also produced for comparison purposes. The compositions of the mortars are summarised in Table 1. Mortars are designated by the type of stabilizer followed by its percentage of incorporation, for example “RC12” (mortar with 12% RC).

Mix-design, namely the earth composition (FA,TV,FS,CDW), was optimized taking into account the earth particle size distribution range recommended in ARS 681 (1996), the optimal packing density based on reference fuller curves, and also trial experimental tests. The amount of water was adjusted to obtain a flow spread in the range of 160-175 mm, according to EN 1015-3 (2000).

Table 1 - Compositions of earth mortars produced.

Designation	Binder			CDW	FA soil	FS	Clay content	Water content	Binder /Earth	w/b	Consistency	Fresh density
	Type	(%mass)[a]	Kg/m^3	(%vol)[b]	(%vol)[c]	(%vol)[c]	(%vol)[c]	(%mass)[d]	(mass ratio)		mm	kg/m^3
RC12	RC	12	150	25	45.3	23	6.1	29.5	8.3	2.75	173	1889
RC16	RC	16	193	25	43.9	22	6	29.5	6.3	2.14	172	1901
RC20	RC	20	234	25	42.6	21	6	29.5	5	1.77	169	1904
OPC12	OPC	12	160	25	45.4	23	6.1	25.2	8.3	2.35	170	1950
OPC16	OPC	16	206	25	44	22	6	25.2	8.3	1.83	173	1962
OPC20	OPC	20	251	25	42.7	21	6	25	6.3	1.50	168	1967
OPC12Weq	OPC	12	150	25	45.4	23	6.1	29.5	5	2.75	222	1930
SE*	-	0	-	25	47.2	19	15.3	26	-	-	172	1887

Percentage of: a) the mass of earth (FA+TV+CDW+FS); b) the volume of earth (FA+TV+CDW+FS); c) the volume of solids; d) the mass of earth+stabiliser

*SE mortar also contain 9% by volume of TV in its composition

Mortars were produced according to a modified mixing process based on EN 1015-2 (1998). First, all dry material was mixed for 30 seconds at slow speed, then one third of the total water was added every 30 seconds, followed by 1 more minute mixing at low speed. Thereafter, the mixer was stopped and the mixture was manually mixed with a trowel for about 30 seconds. Finally, the mixture was mixed for another 2 minutes at low speed, followed by 2 minutes at high speed. In sum, mortars were mixed for a total of 6 minutes.

Prismatic specimens of 40x40x160 mm and 25x25x285 mm were produced for mechanical tests and shrinkage tests, respectively. After moulding, the specimens were covered with a plastic bag and kept in a wet chamber, at 20 ± 1 ºC and 95% ± 5% relative humidity. Stabilised earth mortars were only demoulded after 72 hours, due to their high w/c and longer setting time of RC (Bogas *et al*., 2022b). After demoulding, the specimens were kept in the wet chamber and covered with a plastic bag for 7 days. The specimens were then transferred to a dry chamber at 20 ± 2 ºC and 50% ± 5% relative humidity until testing. Unstabilised earth mortars were kept in the wet chamber inside the mould and covered with a plastic bag until 7 days and then moved to the dry chamber until 21 days. At this age, specimens were demoulded and kept in the dry chamber until testing.

2.5 EXPERIMENTAL TESTS

The experimental work involved the characterisation of the earth mortars in fresh state (consistency and fresh density) and hardened state (bulk density, open porosity, flexural and compressive strength and linear shrinkage).

The consistency was measured according to the flow table test of EN 1015-3 (2000), and fresh density was determined by the shock method described in EN 1015-6 (1998). The open porosity and apparent density were determined according to UNE-EN 1936 (2007), taking into account six fragments from the prismatic specimens.

The flexural and compressive strength tests were carried out according to EN 1015-11 (1999), after 3, 7 and 28 days. For each composition and age, three specimens of 40x40x160 mm were first subjected to 3-point bending tests, and then, the remaining six halves were tested for compressive strength. Unstabilised mortars were only tested at 28 days, due to their lack of sufficient cohesion.

Linear drying shrinkage was measured based on UNE 80112 (2016). For each composition, two prismatic specimens of 25x25x285 mm were produced and then protected from water evaporation until 7 days. Then, the specimens were demoulded and exposed in a controlled room with 20 ± 2ºC and 50% ± 5% RH. The drying shrinkage was measured periodically between 7 days and 28 days using a digital length comparator with a precision of 1 µm.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 FRESH BEHAVIOUR

All mortars were produced with consistency between 169-173 mm, within the target range, being suitable for bed joints and renders DIN 18946 (2013). As expected, mortars with RC were produced with higher amount of mixing water (about 17%) than those with equal content of OPC of similar consistency (Table 1). As discussed in introduction, this is attributed to the higher water demand of RC, essentially due to its porous nature and high surface area (Shui *et al*., 2009; Baldusco *et al*., 2019). This should affect the porosity (3.2) and mechanical strength of RC mortars (3.3). On the other hand, the OPC mortar, OPC12Weq, with equal water content to RC12, presented 29% higher flow spread.

Finally, the use of greater amounts of stabilizer had little effect on consistency for the same amount of mixing water (Table 1).

The fresh density of each mortar is presented in Table 1 and Figure 3. The fresh density slightly increased with the binder content, regardless of the type of stabiliser. This is because the w/c decreased, which compensated the slight reduction of binder/earth (Table 1). Moreover, due to their higher water content, RC mortars were produced with lower fresh density than OPC and unstabilised mortars of similar consistency. Even for the same water content, OPC12Weq had higher density than RC12, which should not be attributed solely to the different density of RC and OPC.

3.2 DENSITY AND OPEN POROSITY

The apparent density and open porosity of earth mortars are summarized in Figure 3. The apparent density followed the same trend found in fresh density, increasing with binder content and replacement of RC with OPC. Actually, the apparent density was 1559-1609 kg/m^3 and 1638-1684 kg/m^3 in RC and OPC mortars of equal consistency.

However, for both types of stabilizer, there was a greater increase of apparent density with the binder content than in fresh density. This is due to the bound water in binder hydration products, increasing the density. The difference between fresh and bulk density was slightly higher in RC mortars than in OPC mortars, due to their higher initial w/c (Figure 3). However, it was found that the apparent density of RC12 was very close to that of OPC12Weq of equal w/c. Moreover, the difference between fresh density and apparent density was slightly higher in OPC12Weq. This means that RC was effectively rehydrated, reaching, at least, similar hydration degree than OPC. Similar findings were reported by (Bogas *et al*., 2022b) in cement pastes.

As mentioned before, the water demand of RC was greater than that of OPC, resulting in mortars of higher open porosity than those with OPC of similar consistency (Table 1). As also expected, the open porosity decreased with the amount of stabiliser, regardless of the type of stabiliser. Noteworthy is the fact that the same open porosity (40%) was obtained in RC12 and OPC12Weq of equal w/c (Table 1). These findings are in accordance with those of Carriço *et al*., (2020) and Carriço *et al*., (2022), who indicate that mortars with RC can have the same total porosity of OPC mortars of equal w/b. The slightly lower compactness of RC12 found in the fresh state (3.1) was not confirmed after the specimen production, which involved a greater compaction effort.

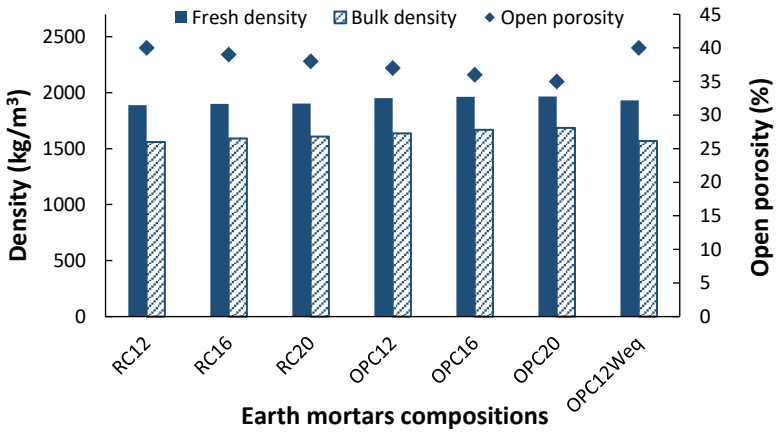


Figure 3 - Bulk density and open porosity values for all the earth mortars compositions.

3.3 FLEXURAL AND COMPRESSIVE STRENGTH

The average results of compressive strength and flexural strength are presented in Figure 4a and 4b, respectively.

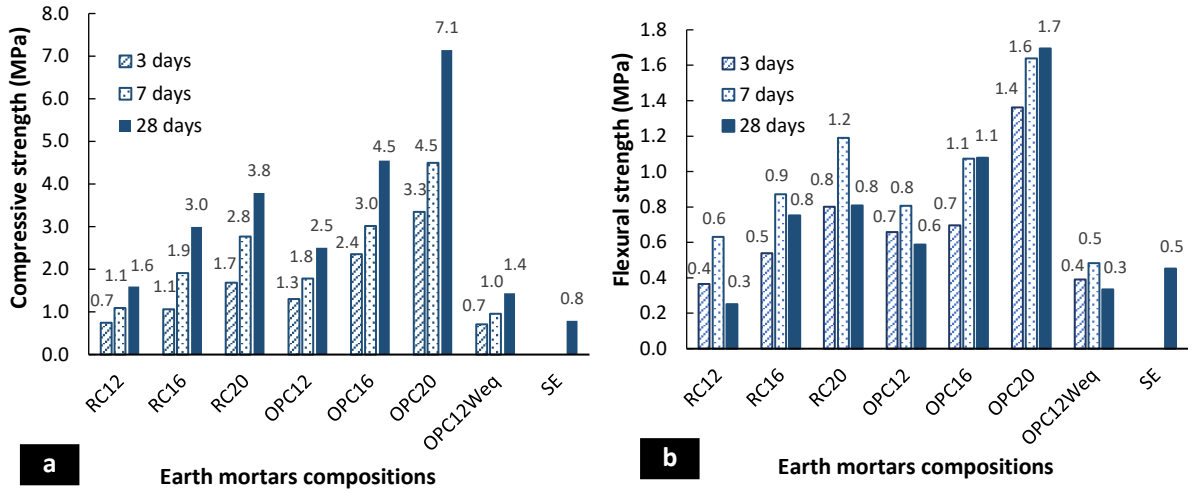


Figure 4 – a) Compressive and b) flexural strength of all the earth mortars compositions at 3, 7 and 28 days.

The average compressive strength at 28 days of stabilised mortars varied between 1.4 and 7.1 MPa, covering the strength classes M1 to M5 for masonry mortars EN 998-2 (2003) and CSI to CSII for rendering mortars according to EN 998-1 (2003). According to the ARS 676 (1996), all mortars fall within the maximum strength class of masonry earth mortars (≥2.5 MPa), except that with 12% RC, which falls within the middle strength class and the unstabilised mortar and OPC12Weq that fall within the lower strength class (≥0.5 MPa). Therefore, according to these classifications, all earth mortars have applications in rendering/plastering and masonry with the exception of the unstabilised mortar which is not suitable for use for masonry according to EN 998-2 (2003).

As expected the compressive strength increased with the binder content, and consequent reduction of w/c, regardless of the type of stabiliser. The compressive strength OPC mortars were 1.6-1.9 higher than those with RC of equal slump, due to their lower w/c. Carriço *et al*. (2022) found greater differences in conventional mortars with up to 3 times lower w/c, reporting 3-3.8 higher compressive strength in OPC than in RC mortars of equal workability. Due to the lower water demand, the EN 998-2 (2003) strength class of OPC mortars increased about one level compared to RC mortars.

However, comparing mortars of equal w/c, the RC12 had 14% higher 28 days compressive strength than OPC12Weq. This means, that as long as the mortars are produced with the same compactness, RC is capable of presenting a binding capacity, at least similar to that of OPC. In conventional mortars, Carriço *et al*. (2022) reported 23% lower compressive strength in RC mortars than in OPC mortars of equal w/c. This was essentially attributed to the poorer RC dispersion and higher void content of RC mortars of harsher applicability. In this study, RC mortars showed adequate applicability, leading to open porosity similar to that of OPC mortars (3.2). Moreover, RC mortars were able to develop 2 to 5 times higher compressive strength than unstabilised mortars, for 12-20% RC, respectively. This difference is expected to be higher in wet conditions, due to the significant strength reduction of unstabilised mortars. Therefore, the hydration capacity and efficiency of RC as earth stabiliser is demonstrated.

In addition, the increase of strength with the binder content was higher in OPC mortars, because lower w/c ratios were achieved with this binder. From 12% to 20% binder the strength increased 2.85 and 2.37 times in OPC and RC mortars, respectively. Finally, as expected, the compressive strength increased from 3 to 28 days. This is attributed to the hydration evolution and to the progressive drying of earth mortars, especially after 7 days, when mortars were transferred from the wet chamber to the dry environment.

As per the compressive strength, the flexural strength increased with the amount of stabiliser, regardless of the type of binder and testing age. At 28 days, the flexural strength of mortars with 12% stabiliser was 3.2 and 2.8 times higher than that of mortars with 20% stabiliser, for RC and OPC, respectively.

Contrary to compressive strength, the flexural strength tended to decrease between 7 days and 28 days. This is attributed to the effect of drying after 7 days, which causes a moisture gradient across the specimen. Due to surface shrinkage, tensile stresses are induced in the surface, reducing the flexural strength (Soleilhet *et al*., 2020). On the other hand, the strength increased up to 7 days, because specimens were cured in the wet chamber.

The different drying behaviour of mortars also contributes to the lower increase of 28 days flexural strength between 16% and 20% stabiliser, in both RC and OPC mortars. Finally, this phenomenon also explains the higher flexural strength of unstabilised mortars compared to RC12 and OPC12Weq.

As found in compressive strength, the flexural strength was higher in OPC mortars than in RC mortars of equal consistency. At 28 days, the strength was 1.4-2.3 times higher in OPC than in RC mortars. On the other hand, the flexural strength of OPC12Weq was slightly higher than that of RC12 of equal w/c. The same was not found at 7 days, which suggests that RC12 was more affected by the moisture distribution across the specimen than OPC12Weq. Nevertheless, it is confirmed that RC can perform similar to OPC in the mechanical strength of mortars of equal w/c.

Mortars with 12-16% RC presented satisfactory mechanical strength for low amounts of binder, of 150-200 kg/m^3 (Table 1). Considering that RC production may involve over 60% lower carbon emissions than OPC, the equivalent cement content of these mortars would be only about 60-80 kg/m^3.

3.4 DRYING SHRINKAGE

Figure 5 presents the mean values of drying shrinkage over time, considering two specimens for each composition. The 28-days drying shrinkage is also indicated in Figure 5. The unstabilised mortars are not presented because they showed excessive cracking during the tests.

The drying shrinkage was significantly affected by the type of stabiliser. In this case, the 28 days shrinkage was 1.7-2.4 times higher in RC than in OPC mortars. One reason is related to the higher w/c and paste volume of OPC mortars. However, the drying shrinkage of RC12 was also significantly higher than that of OPC12Weq of equal w/c. Therefore, the higher shrinkage of RC mortars is not only explained by their higher w/c. The same behaviour was reported by Carriço *et al*. (2022). In conventional mortars with w/c of 0.72, the authors found 54% higher 90-days shrinkage in RC mortars than in OPC mortars of equal w/c. This was attributed to the porous nature and lower stiffness of the RC particles, as well as the greater refinement of the pores in the RC mortars. In fact, due to the intraparticle porosity of RC, the interparticle porosity is reduced for the same w/c or total porosity, as shown by Bogas *et al*. (2020). Therefore, the microstructure of RC mortars is more refined than that of OPC mortars, which increases the capillary forces responsible for shrinkage.

Up to 12 days, the shrinkage rate was higher in OPC mortars than in RC mortars (Figure *5*). Moreover, shrinkage stabilized later in RC (>21 days) than in OPC (>14days) mortars. Therefore, the drying and shrinkage rates were lower in RC mortars, which confirms the more refined porosity of RC mortars.

The significant shrinkage of RC mortars requires more careful curing and application. This disadvantage, as well as RC's high-water requirement, suggests exploring the use of RC as a partial substitute for OPC in future works. Nevertheless, the 28-day linear shrinkage of all the stabilized earth mortars was lower than the 2.5% limit recommended by the in DIN 18947 (2013).

The drying shrinkage of OPC mortars increased with the amount of binder, as found by Sangma & Tripura (2020) in soils stabilised with cement. The lower w/c ratio was offset by the greater volume of paste in the mortars with higher OPC content. However, the RC mortars showed a different trend: the higher the binder content, the lower the shrinkage. In this case, shrinkage decreased with w/c, as found by Carriço *et al*. (2022).

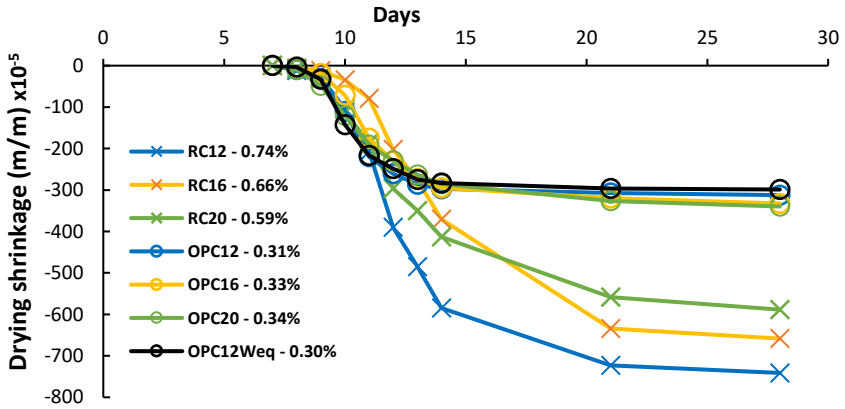


Figure 5 - Drying shrinkage for all stabilised earth mortars. Total shrinkage (%) is calculated according to UNE 80112 (2016)

4 CONCLUSIONS

This study explored the use of low-carbon thermoactivated recycled cement as stabiliser of earth mortars. Mortars with different binder contents were characterised in the fresh and hardened state, in terms of density, mechanical strength and shrinkage.

The high water demand of recycled cement resulted in mortars of greater open porosity, lower density and lower mechanical strength than those stabilised with ordinary Portland cement of similar consistency. However, these properties were little affected by the type of stabilizer in mortars of equal w/c. The rehydration capacity of RC was as high as that of OPC. In addition, the compressive strength of unstabilised mortars increased up to 5 times after the incorporation of RC. Therefore, the good efficiency of RC as earth stabiliser was demonstrated.

The flexural strength was significantly affected by the moisture distribution across mortar specimens, regardless of the type of binder.

Drying shrinkage was significantly affected by the type of stabiliser. The shrinkage in mortars stabilised with RC was about twice as that of OPC mortars. However, the rates of drying and shrinkage were lower in RC mortar. Moreover, the shrinkage limit recommended in DIN 18947 (2013) was not exceeded. Shrinkage was more affected by the w/c ratio in RC mortars than in OPC mortars.

In sum, RC showed similar hydration capacity and mechanical strength development to OPC. However, RC mortars have high water requirement and high shrinkage. Therefore, the partial replacement of RC with OPC should be explored.

5 REFERENCES

Alam, I., Naseer, A., & Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, *77*, 154–159. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046

ARS 676. (1996). Compressed Earth Blocks.Technical specifications for ordinary earth mortars. *ARS 676: 1996 Nairobi*.

ARS 681. (1996). Compressed Earth Blocks. Code of practice for the preparation of earth mortars. *ARS 681: 1996 Nairobi*.

ASTM D698. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), American Society for Testing & Materials (ASTM), 2021.*

Azeredo, G., Morel, J.-C., & Perazzo Barbosa, N. (2007). Compressive strength testing of earth mortars. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, *1*(1), 26–35. https://doi.org/10.2307/26203306

Baldusco, R., Nobre, T. R. S., Angulo, S. C., Quarcioni, V. A., & Cincotto, M. A. (2019). Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(8). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002725

Bogas, J. A., Carriço, A., & Real, S. (2022a). Thermoactivated Recycled Cement. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates* (Hosam Saleh, pp. 1–24). IntechOpen. https://doi.org/DOI: 10.5772/intechopen.98488

Bogas, J. A., Carriço, A., & Tenza-Abril, A. J. (2020). Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *138*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226

Bogas, J. A., Real, S., Carriço, A., Abrantes, J. C. C., & Guedes, M. (2022b). Hydration and phase development of recycled cement. *Cement and Concrete Composites*, *127*. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405

Bogas, J. A., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, *79*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107892

Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020a). Thermoactivated cementitious materials – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 250). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873

Carriço, A., Bogas, J. A., Real, S., & Pereira, M. F. C. (2022). Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. *Construction and Building Materials*, *333*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392

Carriço, A., Real, S., & Bogas, J. A. (2021). Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. *Cement & Concrete Composites*, *124*(104270). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270

Carriço, A., Real, S., Bogas, J. A., & Costa Pereira, M. F. (2020b). Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502

DIN 18946. (2013). Earth Masonry Mortar: Terms and Definitions, Requirements, Test Methods (in German). *German Institute for Standarization, Berlin*.

DIN 18947. (2013). Earth plasters: Terms and Definitions, Requirements, Test Methods (in German). *German Institute for Standarization, Berlin*.

EGD. (2022). *The European Green Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

EN 998-1. (2003). Specification for mortar for masonry - Part 1: rendering and plastering mortar. *European Committee for Standardization*.

EN 998-2. (2003). Specification for mortar for masonry. - Part 2: masonry mortar. *European Committee for Standardization.*

EN 1015-2. (1998). *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 2: Bulk Sampling of Mortars and Preparation of Test Mortars. British Standards Institution, UK.*

EN 1015-3. (2000). *Methods of test for mortar for masonry–Part 3: Determination of consistence of fresh mortar.*

EN 1015-6. (1998). *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.*

EN 1015--11. (1999). *Methods of test for mortar for masonry–Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization.*

Gomes, M. I., Faria, P., & Gonçalves, T. D. (2019). Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. *Construction and Building Materials*, *205*, 213–231. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.222

Jayasinghe, C., Fonseka, W. M. C. D. J., & Abeygunawardhene, Y. M. (2016). Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Construction and Building Materials*, *102*, 471–477. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.136

LNEC E 239. (1970). *Especificação LNEC: Análise Granulométrica por peneiração Húmida. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.*

Miraki, H., Shariatmadari, N., Ghadir, P., Jahandari, S., Tao, Z., & Siddique, R. (2022). Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *14*(2), 576–591. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.08.012

NP 143. (1969). *"Solos. Determinação dos limites de consistência.", Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1969.*

NP EN 1097-6. (2000). *"Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água," Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2000.*

Real, S., Carriço, A., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2020). Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement. *Materials*, *13*(18). https://doi.org/10.3390/ma13183937

Sangma, S., & Tripura, D. D. (2020). Experimental study on shrinkage behaviour of earth walling materials with fibers and stabilizer for cob building. *Construction and Building Materials*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119449

Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 72–109). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.72

Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, *23*(1), 531–537. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016

Soleilhet, F., Benboudjema, F., Jourdain, X., & Gatuingt, F. (2020). Role of pore pressure on cracking and mechanical performance of concrete subjected to drying. *Cement and Concrete Composites*, *114*. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103727

UNE 80112. (2016). *Test methods of cements. Physical analysis. Determination of contraction in air and expansion in water*.

UNE-EN 1936. (2007). *Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.*

Venkatarama Reddy, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (pp. 324–363). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324

XP P94-047. (1998). *"Soils: investigation and testing. Determination of the organic matter content. Ignition method" Association Française de Normalisation (AFNOR), 1998*.

Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, *49*, 841–851. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPRESSÃO 3D DE PLÁSTICOS RECICLADOS COMO SOLUÇÃO DE RENOVAÇÃO DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS

Lucas Lopes[a]; Manuela Almeida[a]

[a] Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, lucas_lopes@me.com

RESUMO

O parque construído apresenta diversas necessidades de renovação, sendo que uma das principais está relacionada com a reabilitação energética. Para além disso, a renovação deve ser abrangente e inovadora, tanto em relação aos materiais utilizados, visando um ciclo de consumo de materiais mais sustentável e circular, como no processo de fabrico, onde é essencial adotar técnicas de construção mais eficientes e com menos desperdício.

Neste contexto, este artigo apresenta uma solução de renovação energética de edifícios que utiliza a impressão 3D para produzir painéis de fachada feitos essencialmente com plástico reciclado, desenhados com a circularidade em mente. A solução de renovação desenvolvida visa incorporar resíduos plásticos, reaproveitando-os como material de isolamento para edifícios que necessitam de melhorar o seu desempenho térmico.

A solução de renovação apresentada neste artigo é capaz de melhorar significativamente o desempenho térmico de um edifício residencial multifamiliar típico em Portugal, reduzindo a transmitância térmica das paredes exteriores de 0,85 W/m²·K para 0,43 W/m²·K com o painel mais fino e para 0,30 W/m²·K com o painel mais espesso, o que corresponde a valores de 50% e 35% do valor inicial, evidenciando a sua mais-valia.

Palavras-chave: Impressão 3D, plástico reciclado, renovação térmica, sustentabilidade, desempenho térmico.

1 INTRODUÇÃO

Para atingir as metas estabelecidas para 2030 e 2050 relacionadas com a mitigação das alterações climáticas, é necessário superar desafios significativos (Camarasa et al., 2022; Saheb et al., 2018). Nesse contexto, a indústria da construção, responsável por aproximadamente 37% das emissões de CO_2 na Europa nos últimos anos (UNEP, 2022), deve não só reduzir as suas emissões a zero, mas também adotar práticas circulares.

Atingir essas metas em novas construções já é desafiador, porém consegui-las em edifícios existentes e altamente ineficientes é uma tarefa ainda mais complexa. Em Portugal, 35% das construções existentes têm mais de 50 anos e 75% são energeticamente ineficientes (Instituto Nacional de Estatística, 2023). Torna-se crucial promover a reabilitação energética destes edifícios para se conseguir atingir as metas de 2050 (Energy Agency, 2022). No entanto, estas ações de renovação vão exigir esforço e recursos significativos (Palma et al., 2022), tornando-se vital a adoção de soluções que promovam o carbono zero e a economia circular.

Paralelamente, enfrentamos uma crise ecológica devido às enormes quantidades de resíduos plásticos no meio ambiente (MacLeod et al., 2021). As contaminações da cadeia alimentar por microplásticos são inegáveis e de difícil reparação, enquanto apenas uma pequena parte dos materiais plásticos descartados é adequadamente reciclada (Gregory, 2009). A reciclagem de termoplásticos e sua reutilização na construção têm sido exploradas, e a utilização de resíduos plásticos para reabilitação térmica de construções vem sendo investigada.

Oktavia & Kususma (2020) desenvolveram uma solução de fachada com polipropileno, destacando a sua leveza, resistência térmica, transparência, reciclabilidade e circularidade. Moussa et al. (2018) usaram PET reciclado com cânhamo e cal em fachadas, alcançando uma resistência térmica de 4.5 $K{\cdot}m^2/W$. Loh et al. (2022) utilizaram polipropileno reciclado para fazer vazios no betão, resultando numa resistência térmica de 1 a 5.5 $K{\cdot}m^2/W$.

A utilização de matéria-prima circular, embora essencial, deve ser acompanhada de técnicas construtivas e de desenho com baixas ou zero emissões alinhadas com desenho para desmontagem (DfD) e desempenho construtivo para todo o ciclo de vida estimado por BIM (BWPE) para alcançar a neutralidade carbónica (Benachio et al., 2020; MacKenbach et al., 2020). Com isso em mente, técnicas construtivas de manufatura aditiva, mais especificamente a impressão 3D, são amplamente utilizadas com materiais termoplásticos e tem o potencial de ser uma opção sustentável com baixas a zero emissões de CO_2 (Gebler et al., 2014). Este método permite produzir formas complexas com alta precisão e baixo custo, principalmente em comparação com a injeção de molde, além de possibilitar um alto nível de customização e otimização (Jared et al., 2017). A impressão 3D com termoplásticos consome apenas eletricidade, que, se proveniente de uma fonte de baixa pegada de carbono, resulta numa solução de baixo impacto ambiental (Shanmugam et al., 2020).

A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D, tem sido explorada na construção, principalmente com materiais cimentícios (Lim et al., 2012). No entanto, a utilização de termoplásticos na impressão 3D para construção ainda tem espaço para desenvolvimento. Sarakinioti et al. (2018) propõem a impressão 3D de termoplásticos como solução de fachada, utilizando a geometria interna para passagem de água e controlo térmico. Grassi et al. (2019) sugerem o uso de plásticos impressos em 3D em fachadas para otimizar o controlo de exposição solar em climas quentes, criando elementos de sombreamento adaptados à orientação solar. Em geral, o uso de plásticos impressos em fachadas aproveita as vantagens da impressão 3D, como customização e otimização da forma (Strauß & Knaack, 2016).

Todavia, é evidente na literatura que a escolha de matéria-prima é limitada aos plásticos com resistência a UV e não tóxicos, como o PET-G, utilizado na vasta maioria das soluções similares. Também é evidente a preocupação com os pontos negativos da impressão 3D, como a fraca aderência entre camadas, que reduz o desempenho mecânico de objetos impressos em 3D em cerca de 70% em comparação com outros métodos de fabricação, e possíveis problemas de estanqueidade devido a pequenas falhas na adesão entre camadas que permitem a infiltração de água a longo prazo (Dizon et al., 2018; Keita et al., 2019).

Considerando todos os aspetos, a utilização de materiais termoplásticos reciclados como matéria-prima para a reabilitação energética do parque construído tem o potencial de ser uma solução com baixos níveis de emissão de CO_2 e integração de resíduos plásticos no ambiente construído. A aplicação de tecnologias de manufatura aditiva alinhadas com a fabricação digital permite uma otimização das soluções construtivas de modo a melhor aproveitar o material, reduzir os impactos das soluções construtivas e solucionar problemas do ambiente construído, tais como a ineficiência energética de construções antigas.

Com isso em mente, este artigo tem como objetivo demonstrar a solução de painel de renovação de fachada impresso em 3D com plásticos reciclados, desenvolvido no âmbito do projeto ZeroSkin+, e o seu desempenho térmico, de modo a verificar a viabilidade da técnica e do material como solução construtiva para a reabilitação energética de edifícios. A metodologia e os casos de estudo seguintes demonstram o potencial de tal material e técnica nos quesitos de desempenho térmico da solução.

2 METODOLOGIA

O caso de estudo foi desenvolvido de acordo com os objetivos do projeto ZeroSkin+ (ZeroSkin+, 2024), no qual o seu desenvolvimento fez parte do objetivo principal da investigação. O painel foi concebido para ser composto primariamente por plásticos reciclados e desenhado com a circularidade da solução em mente.

Quanto ao desempenho térmico da solução de renovação projetada, foi calculado através das conhecidas equações 1 e 2, a fim de determinar a transmitância térmica (valor U) total da solução. Foram utilizados os dados do desempenho térmico dos materiais empregados para obter o valor total de R e o valor de U de toda a solução de renovação, adicionando-se a resistência térmica de uma fachada representativa de um edifício em Portugal.

$$U_{value} = \frac{1}{R_t} \quad (1)$$

$$R_t = R_{se} + R_1 + R_2 + \cdots + R_n + R_{si} \quad (2)$$

onde:

U_{value} é o valor da transmitância térmica W/m^2·K;

R_t é o total da resistência térmica do painel plástico + fachada de referência em K.m^2/W;

R_{se} é a resistência térmica superficial exterior em K.m^2/W;

R_{si} é a resistência térmica superficial interior em K.m^2/W;

$R_{1\ \text{to}\ n}$ é a resistência térmica da camada em K.m^2/W.

Para a fachada de referência de uma edificação em Portugal, foi considerada uma solução com dupla alvenaria, utilizando tijolos ocos de 11 cm, com uma camada de isolamento de poliestireno expandido

(EPS) de 3 cm, rebocada em ambos os lados, resultando em uma espessura total de 30 cm. A fachada não é ventilada. A resistência térmica da solução de referência é de 1,19 K.m²/W, com um valor U de 0.84 W/m²·K (Santos & Matias, 2006).

A meta para o desempenho térmico em Portugal do painel integrado na fachada existente da construção deve cumprir as exigências da regulamentação portuguesa para o desempenho térmico das fachadas de edifícios. Assim, a transmitância térmica (valor U) da solução integrada deve ser de 0.35 W/m²·K ou inferior (Despacho Normativo n.o 21/2019 | DRE, 2019).

3 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo apresentado discute o desempenho do produto desenvolvido no âmbito do projeto ZeroSkin+ (ZeroSkin+, 2024), que se trata de um painel de renovação da envolvente opaca de uma edificação utilizando plástico reciclado impresso em 3D como material primário.

Similar a outras soluções identificadas na literatura (Grassi et al., 2019; Sarakinioti et al., 2018; Strauß & Knaack, 2016), o painel de fachada foi planeado com polietileno tereftalato glicol termoplástico (PETG) como material primário, correspondendo a 69% a 73% do material utilizado no painel. O PETG é conhecido pela sua biocompatibilidade, resistência aos raios UV, desempenho mecânico e disponibilidade no mercado (Latko-Durałek et al., 2019). Juntamente com o PETG, foi utilizado poliuretano termoplástico (TPU), um termoplástico flexível que representa 7% a 8% do peso total do painel. Este material foi usado como vedação e junta de dilatação entre os painéis e a fachada. Além das características elastoméricas (Frick & Rochman, 2004), o TPU é amplamente disponível no mercado, sendo utilizado na fabricação de roupas e calçados, o que contribui para a sua ampla disponibilidade como material reciclado. Para além dos termoplásticos, o painel impresso em 3D desenvolvido utiliza também placas de aglomerado de cortiça como material de isolamento térmico adicional, com o objetivo de reduzir o peso do painel e melhorar o seu desempenho térmico.

De modo a aproveitar a complexidade do desenho permitido pela impressão 3D, a fixação dos painéis de fachada foi planeada para ser Plug-&-Play, reduzindo emissões na montagem e desmontagem, e diminuindo a contaminação dos termoplásticos utilizados, garantindo a sua reciclabilidade no final do ciclo de vida. Nesse sentido, o painel foi projetado para ser acoplado a uma estrutura de suporte de aço fixada na fachada do edifício a ser renovado, conforme mostrado na Figura 1.

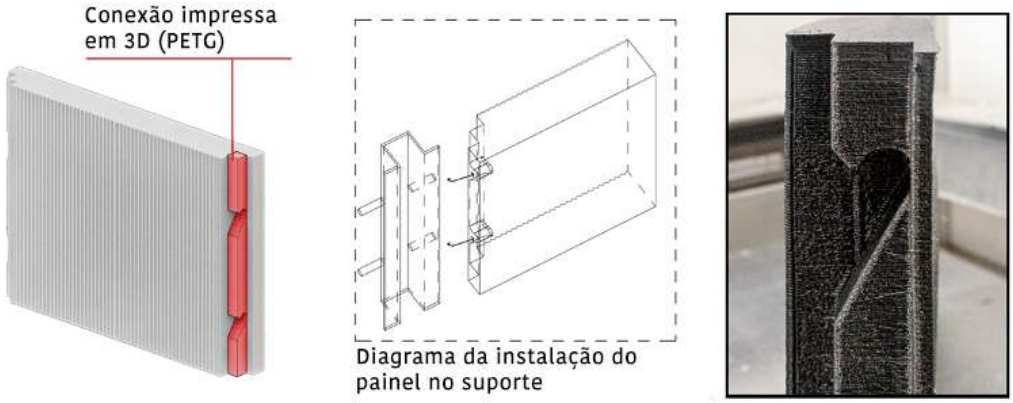


Figura 1 – Imagens ilustrativas de sistema de conexão do painel à estrutura de suporte.

O plástico impresso em 3D cria uma casca rígida que serve como invólucro para colocar outros materiais de isolamento. O painel não foi desenhado para ser inteiramente de plástico reciclado pois para se atingir o desempenho térmico desejado seria necessária uma elevada densidade e,

consequentemente, elevado peso. Um preenchimento interno de 25%, resultaria num painel com um peso superior a 50 kg/m². Contudo, a flexibilidade da impressão 3D, permite a criação de um painel misto e otimizado.

O painel desenvolvido tem três espessuras: 61 mm, 86 mm e 111 mm. Cada espessura pode acomodar diferentes camadas de isolantes, adaptando-se às necessidades do edifício a ser renovado, separadas por uma camada plástica que serve de barreira para a transmissão de calor por convecção quando o painel não tem isolamento. O número de espaços para a colocação de materiais de isolamento térmico varia de acordo com a espessura do painel, como mostrado na Figura 2.

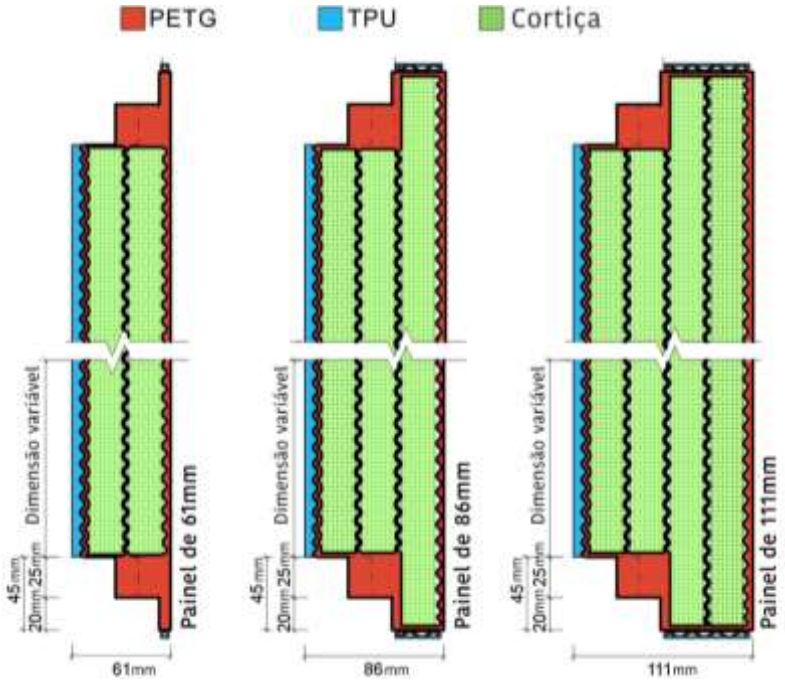
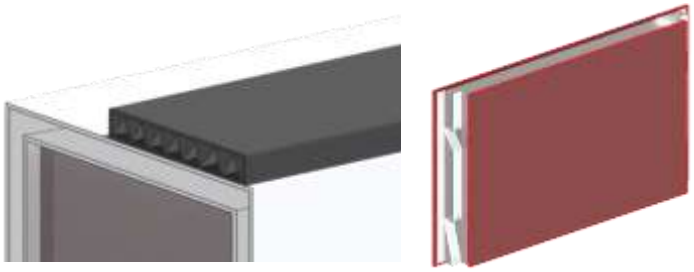


Figura 2 – Secção dos painéis impressos em 3D em milímetros. Materiais utilizados ilustrados por cor e textura.

Termoplásticos, como o PETG, têm um alto índice de retração, exigindo juntas de dilatação para os painéis. Foram utilizadas cintas e painéis de TPU com 5 mm de espessura para vedar as juntas, acomodar as expansões e retrações dos painéis rígidos e adaptar a solução às imperfeições na fachada da edificação a renovar, como representado na Figura 3.



(a) (b)

Figura 3 – (a) Secção da cinta de TPU em volta do painel de PETG. (b) Partes impressas em TPU destacadas em vermelho.

Os painéis são totalmente ajustáveis às dimensões necessárias. Essa adaptabilidade aproveita as vantagens da fabricação de painéis via impressão 3D. No entanto, o tamanho dos painéis deve ser cuidadosamente limitado, principalmente quanto as dimensões mínimas e cargas máximas para a conexão do painel a fachada. Além disso, o tamanho dos painéis deve respeitar a dimensão máxima da impressora 3D utilizada, garantindo que a parte rígida do painel seja impressa numa única peça, a fim de reduzir potenciais pontos fracos na performance mecânica e infiltração de água, problemas frequentes na impressão 3D. O tamanho mínimo de cada painel é de 230 mm por 110 mm, definido pelas dimensões dos elementos de conexão. O tamanho máximo do módulo é de 1100 mm por 800 mm, limitado pela área de impressão 3D máxima da impressora utilizada.

O material de isolamento considerado para a versão do painel apresentado neste caso de estudo foi a cortiça aglomerada. No entanto, o desenho do painel impresso em 3D permite o uso de outros materiais de isolamento e diferentes combinações em camadas de 20 mm. No caso do aglomerado de cortiça, o isolamento térmico representa entre 19% e 24% da massa da solução de renovação, o que é significativo ao considerar a quantidade de material consumido para a renovação da fachada do edifício.

Sem considerar o material de isolamento, cada metro quadrado da impressão 3D do painel demora entre 168h e 265h de impressão. Deve-se considerar que o tempo de impressão foi calculado com a impressora Builder Extreme 1500 Pro, equipamento utilizado nesta investigação. Quanto ao consumo de materiais, mesmo nas soluções mais finas e sem considerar o peso do isolamento, cada metro quadrado de painel pesa entre 13.63 kg/m^2 e 20.08 kg/m^2. A Tabela 1 mostra os dados de impressão e consumo de material.

Tabela 1 – Exemplo de quadro

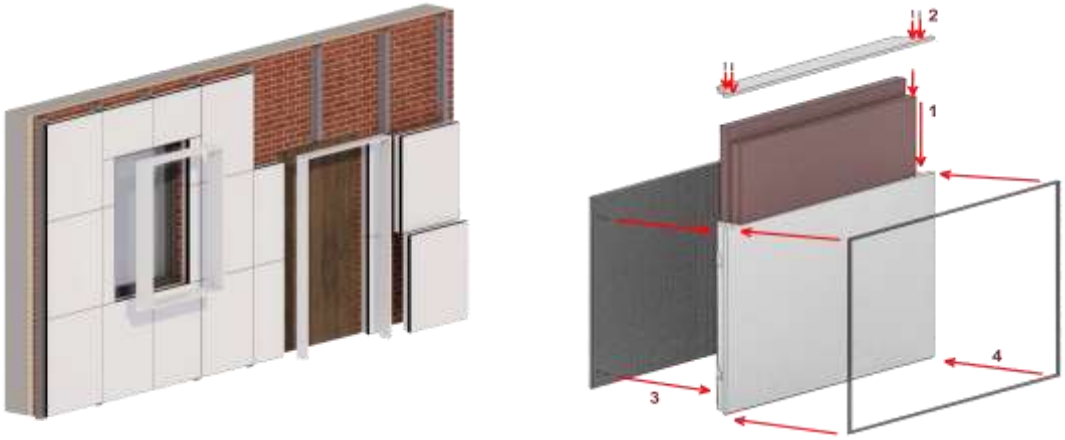
Espessura painel	Quantidade PETG	Quantidade TPU	Tempo de impressão total
61mm	12.24 kg/m^2	1.39 kg/m^2	168 h/m^2
86mm	15.36 kg/m^2	1.64 kg/m^2	240 h/m^2
111mm	18.21 kg/m^2	1.87 kg/m^2	265 h/m^2

Um dos aspetos principais do desenvolvimento dos painéis foi a circularidade da solução de renovação. O processo de montagem e fabricação foi concebido para permitir uma desmontagem e reciclagem fáceis, de forma a evitar a contaminação de materiais e reduzir os resíduos gerados pelo uso de adesivos e produtos similares. Portanto, o processo de fabricação foi dividido entre a impressão 3D das peças de PETG e TPU para evitar desperdícios desnecessários e a contaminação do material. A separação da fabricação também previne o desperdício gerado pelo descarte de material ao trocar os filamentos.

Os módulos dos painéis devem ser montados num processo passo a passo. A Figura 4a ilustra a solução encaixada na fachada renovada, mostrando que a montagem é suficientemente simples para ser realizada manualmente, mas também pode ser automatizada. Este método de montagem foi cuidadosamente projetado para assegurar a eficiência e a facilidade de instalação dos painéis, quer seja de forma manual ou automatizada.

Na Figura 4b, são detalhadas as fases da montagem do painel de renovação. Inicialmente, o material de isolamento é colocado dentro da casca rígida de PETG. Em seguida, a tampa é fechada e fixada com parafusos de poliamida (PA), garantindo que o material de isolamento fique devidamente protegido dentro do painel. Após esta etapa, o painel traseiro de TPU é fixado pelos pinos correspondentes,

previamente impressos com o modelo. Por fim, a cinta de TPU é esticada no lugar, facilitando tanto a montagem quanto a desmontagem.



(a) (b)

Figura 4 – (a) Representação da solução impressa em 3D com termoplásticos. (b)Processo de montagem do painel plástico. Montagem em etapas de 1 a 4.

Os painéis de reabilitação de fachada, uma vez prontos, seriam montados na edificação, servindo como uma camada adicional de isolamento térmico e reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento da construção renovada. Outro aspeto a considerar é que o termoplástico reciclado, impresso em 3D no painel, será o novo acabamento da fachada reabilitada, sem a adição de camadas extra de argamassa ou tinta, evitando assim a contaminação do plástico e comprometendo a sua futura reciclagem. No final do seu ciclo de vida, os painéis podem ser facilmente desmontados e separados para reciclagem adequada. O plástico reciclado utilizado pode ser novamente aproveitado em outros painéis, desde que a degradação do material permita a sua reciclagem e reutilização na mesma indústria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A principal função do painel de renovação de fachadas proposto na secção anterior é melhorar o desempenho térmico das edificações ineficientes, reduzindo assim as suas necessidades energéticas. Para avaliar a eficácia deste painel, é necessário medir a sua transmitância térmica em conjunto com uma fachada representativa das edificações construídas em Portugal.

A composição do painel de renovação considerado para o cálculo do desempenho térmico é apresentada na Figura 5. As camadas adicionais dos modelos de 86 mm e 111 mm incluem 4 mm de PET-G, 20 mm de cortiça aglomerada e um espaço de ar fechado de 1 mm para a acomodação do isolamento.

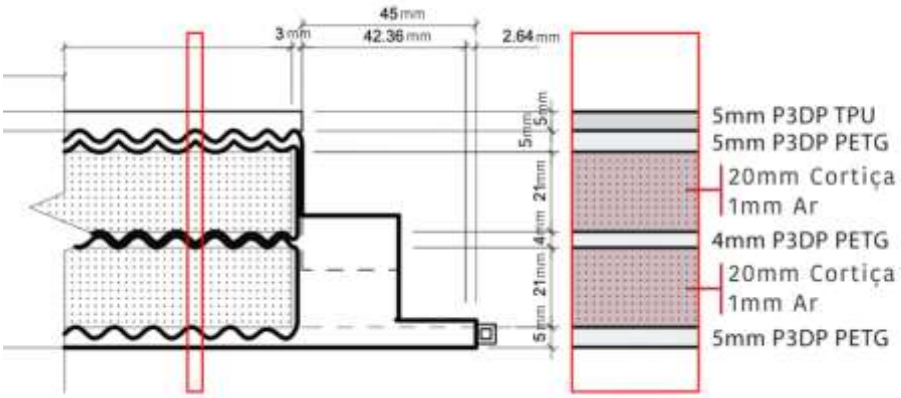


Figura 5 – Composição de camadas do painel impresso em 3D considerado no cálculo do desempenho da solução.

O desempenho térmico do PETG, impresso em 3D, com as configurações utilizadas, apresenta uma condutividade térmica de 0.079 W/m·K, resultando em um valor de resistência térmica (R-value) de 1.25 K·m²/W para 100 mm de espessura (Lopes et al., 2023). Este valor é considerado como o desempenho térmico do PET-G impresso em 3D para os cálculos subsequentes do módulo do painel. Portanto, para as espessuras da camada do PETG do painel plástico, foram consideradas uma condutividade térmica (λ) de 0.079 W/m·K e um valor R variando de 0.050 K·m²/W a 0.063 K·m²/W para as espessuras de 4 mm e 5 mm, respetivamente.

Os valores de resistência térmica e densidade das placas de cortiça aglomerada são definidos pelo documento oficial português ITE50 (Santos & Matias, 2006), que apresenta valores de condutividade térmica (λ) de 0.045 W/m·K, o que resulta em uma resistência térmica (R-value) de 0.484 K·m²/W para os 20 mm de cada placa considerada para a solução de renovação. Adicionalmente, foi considerada a adição de uma camada de 1 mm de espaço de ar fechado com uma condutividade térmica (λ) de 0.025 W/m·K para os espaços entre a cortiça aglomerada e a casca rígida. Para o TPU, o cálculo da condutividade térmica baseou-se na base de dados MatWeb para o poliuretano termoplástico elastomérico (MatWeb, 2024), resultando numa condutividade térmica (λ) de 0,159 W/m·K e a resistência térmica (R-value) de 0.031 K·m²/W. Adicionalmente, foi agregado o valor da resistência térmica e condutibilidade da fachada de referência.

Os resultados dos cálculos do desempenho térmico da solução estão apresentados no Quadro 2.

Tabela 2 – Exemplo de quadro

Espessura painel	**Resistência térmica do painel (valor R)**	**Transmissão térmica do painel (valor U)**	**Transmissão térmica da fachada exemplo (valor U)**	**Transmissão térmica do painel + fachada exemplo (valor U)**
61mm	1.14 K·m²/W	0.87 W/m²·K	0.84 W/m²·K	0.43 W/m²·K
86mm	1.63 K·m²/W	0.61 W/m²·K		0.35 W/m²·K
111mm	2.13 K·m²/W	0.47 W/m²·K		0.30 W/m²·K

O módulo de painel impresso em 3D, com espessuras de 86 mm e 111 mm, integrado na fachada de um edifício, cumpre os requisitos térmicos atuais da legislação portuguesa para fachadas de edifícios, que é de 0,35 W/m²·K. Embora o modelo mais fino, de 61 mm, apresente um desempenho abaixo do requisito, conseguiu reduzir o valor U em 48%, passando de 0,84 W/m²·K para 0,43 W/m²·K. Esta redução pode ser significativa num cenário em que a construção reabilitada tem um desempenho

térmico melhor do que o considerado inicialmente. Os painéis de 86 mm e 111 mm proporcionaram uma redução do valor U em 58% e 64%, respetivamente, atingindo os valores de 0,35 W/m²·K e 0,30 W/m²·K, superando assim os requisitos de desempenho térmico.

5 CONCLUSÕES

O painel plástico desenvolvido para a renovação térmica e energética do ambiente construído demonstra a viabilidade da integração de plásticos reciclados impressos em 3D nas soluções construtivas. A utilização do material reciclado alinhado com a impressão 3D permite otimizar o desenho dos painéis de acordo com as necessidades da construção, consumindo apenas a energia e os materiais necessários. O design modular da solução, focado na fácil desmontagem e reciclabilidade dos materiais integrados, visa a circularidade da solução, contribuindo para as metas planeadas para 2050.

A capacidade de otimização conforme as necessidades específicas das construções é o maior diferencial da solução desenvolvida em relação às soluções tradicionais de reabilitação energética de fachadas, como os ETICS. No que respeita ao desempenho térmico, foi alcançado um valor de U entre 0,43 W/m²·K e 0,30 W/m²·K para a solução integrada com a fachada representativa do ambiente construído em Portugal, sendo um resultado comparável ao de soluções de reabilitação de espessura semelhante. Adicionalmente, a solução propõe um ciclo de vida circular, com planeamento para a reciclagem após o fim do ciclo de vida da solução.

Apesar dos resultados alcançados, a solução desenvolvida ainda apresenta considerável margem para melhorias, testes e otimizações. Os resultados foram limitados pelo material e pela tecnologia disponíveis, o que significa que o tempo de impressão e o consumo de energia podem melhorar significativamente em futuras investigações, devido aos avanços no método de fabricação e à otimização do painel, material e processo de produção. Futuramente, resultados com melhor tempo de impressão e, consequentemente, menor consumo energético têm o potencial de viabilizar a incorporação de plásticos reciclados impressos em 3D na indústria da construção. Adicionalmente, outros fatores, como custo, resistência ao fogo, resistência à humidade e durabilidade ao longo do tempo, ainda precisam ser investigados e validados para que a solução desenvolvida se torne viável.

É importante notar que testes adicionais são necessários para avaliar e otimizar o desempenho térmico do painel nas áreas de conexão entre os painéis, onde a junta de conexão pode representar um risco de ponte térmica. A durabilidade e a resistência ao fogo do painel também devem ser avaliadas para determinar os requisitos básicos para uma solução de renovação de fachadas. Apesar das limitações, os resultados alcançados até agora abriram caminho para mais pesquisas sobre a integração de materiais plásticos reciclados em soluções de renovação de edifícios.

De qualquer modo, a solução integrada de renovação de edifícios propõe uma inovação na integração de resíduos numa economia circular e também abre caminho para futuras iniciativas para alcançar um ambiente construído mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *260*, 121046. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121046

Camarasa, C., Mata, É., Navarro, J. P. J., Reyna, J., Bezerra, P., Angelkorte, G. B., Feng, W., Filippidou, F., Forthuber, S., Harris, C., Sandberg, N. H., Ignatiadou, S., Kranzl, L., Langevin, J., Liu, X., Müller, A., Soria, R., Villamar, D., Dias, G. P., … Yaramenka, K. (2022). A global comparison of building decarbonization scenarios by 2050 towards 1.5–2 °C targets. *Nature Communications 2022 13:1*, *13*(1), 1–11. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29890-5

Despacho Normativo n.º 21/2019 | DRE (2019). https://dre.pt/dre/detalhe/despacho-normativo/21-2019-124750394

Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. In *Additive Manufacturing* (Vol. 20, pp. 44–67). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002

Energy Agency, I. (2022). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. www.iea.org/t&c/

Frick, A., & Rochman, A. (2004). Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC). *Polymer Testing*, *23*(4), 413–417. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.09.013

Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, *74*(C), 158–167. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.08.033

Grassi, G., Lupica Spagnolo, S., & Paoletti, I. (2019). Fabrication and durability testing of a 3D printed façade for desert climates. *Additive Manufacturing*, *28*, 439–444. https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.05.023

Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings- entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1526), 2013–2025. https://doi.org/10.1098/RSTB.2008.0265

Instituto Nacional de Estatística. (2023). *Construction and Housing Statistics*. www.ine.pt

Jared, B. H., Aguilo, M. A., Beghini, L. L., Boyce, B. L., Clark, B. W., Cook, A., Kaehr, B. J., & Robbins, J. (2017). *Additive manufacturing: Toward holistic design*. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.02.029

Keita, E., Bessaies-Bey, H., Zuo, W., Belin, P., & Roussel, N. (2019). Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*, *123*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105787

Latko-Durałek, P., Dydek, K., & Boczkowska, A. (2019). Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. *Journal of Polymers and the Environment*, *27*(11), 2600–2606. https://doi.org/10.1007/S10924-019-01544-6/FIGURES/7

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, *21*(1), 262–268. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010

Loh, T. W., Stehle, J., & Nguyen, K. T. Q. (2022). The thermal resistivity of concrete façade elements containing novel recycled plastic void formers: An experimental and numerical investigation. *Journal of Building Engineering*, *49*, 104101. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104101

Lopes, L., Reis, D., Paula Junior, A., & Almeida, M. (2023). Influence of 3D Microstructure Pattern and Infill Density on the Mechanical and Thermal Properties of PET-G Filaments. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 2268*, *15*(10), 2268. https://doi.org/10.3390/POLYM15102268

MacKenbach, S., Zeller, J. C., & Osebold, R. (2020). A Roadmap towards Circularity - Modular Construction as a Tool for Circular Economy in the Built Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *588*(5), 052027. https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052027

MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, *373*(6550), 61–65. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABG5433/ASSET/BB3AD5EB-E9B8-4B40-9244-9AD38C499B86/ASSETS/GRAPHIC/373_61_F3.JPEG

MatWeb. (2024). *Overview of materials for Thermoplastic Polyurethane, Elastomer, Polyester Grade*. https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=9f5318a1f93b403bbd5748abec70fac1

Moussa, T., Maalouf, C., Ingrao, C., Scrucca, F., Costantine, G., & Asdrubali, F. (2018). Bio-based and recycled-waste materials in buildings: A study of energy performance of hemp-lime concrete and recycled-polyethylene terephthalate façades for office facilities in France and Italy. *Science and Technology for the Built Environment*, *24*(5), 492–501. https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1438664

Oktavia, V., & Kususma, N. R. (2020). Plastic material as building façade. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *452*(1), 012116. https://doi.org/10.1088/1755-1315/452/1/012116

Palma, P., Gouveia, J. P., & Barbosa, R. (2022). How much will it cost? An energy renovation analysis for the Portuguese dwelling stock. *Sustainable Cities and Society*, *78*, 103607. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103607

Saheb, Y., Ossenbrink, H., Szabo, S., Bódis, K., & Panev, S. (2018). Energy transition of Europe's building stock. Implications for EU 2030. Sustainable Development Goals. *Annales Des Mines - Responsabilité et Environnement*, *N° 90*(2), 62. https://doi.org/10.3917/re1.090.0062

Santos, P. dos, & Matias, L. (2006). *ITE50* (LNEC, Ed.). ICT Informação Técnica.

Sarakinioti, M. V., Turrin, M., Konstantinou, T., Tenpierik, M., & Knaack, U. (2018). Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control. *Materials Today Communications*, *15*, 275–279. https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2018.02.027

Shanmugam, V., Das, O., Neisiany, R. E., Babu, K., Singh, S., Hedenqvist, M. S., Berto, F., & Ramakrishna, S. (2020). Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy. *Materials Circular Economy*, *2*(1), 11. https://doi.org/10.1007/s42824-020-00012-0

Strauß, H., & Knaack, U. (2016). Additive Manufacturing for Future Facades: The potential of 3D printed parts for the building envelope. *Journal of Facade Design and Engineering*, *3*(3–4), 225–235. https://doi.org/10.3233/FDE-150042

UNEP. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. www.globalabc.org.

ZeroSkin+ _ a building renovation project using recycled plastic by the University of Minho. (n.d.). Retrieved May 30, 2024, from https://civil.uminho.pt/zeroskin/index.html

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFEITOS DA ADIÇÃO DE EXCREMENTO BOVINO NO DESEMPENHO MECÂNICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM UMA TERRA ARGILOSA DO BRASIL E OUTRA ARENOSA DE PORTUGAL

Raphael N. Pachamama[a]; Paulina Faria[b]; Marco A. P. Rezende[a]; António Santos Silva[c]

[a] PPG-ACPS, Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil; raphael.n.pachamama@gmail.com; marco.penido.rezende@hotmail.com

[b] CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal; paulina.faria@fct.unl.pt

[c] Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1700-066 Lisboa, Portugal; ssilva@lnec.pt

RESUMO

O excremento bovino é um material utilizado há milênios pela humanidade como estabilizante em técnicas de construção com terra, sendo comum até à atualidade em comunidades tradicionais no Brasil. No entanto, esta estabilização ainda é pouco estudada cientificamente. Neste estudo foi avaliado o efeito da adição de excremento bovino em argamassas produzidas com uma terra argilosa do Brasil e outra areno siltosa de Portugal. Os métodos e ensaios utilizados para esta avaliação são os descritos na norma alemã DIN 18947 para avaliação de argamassas de terra para reboco não estabilizadas com ligantes convencionais. Nas argamassas produzidas com as duas terras a adição resultou na redução da retração linear por secagem e no aumento das resistências à flexão, à compressão e da aderência por cisalhamento. Assim, o excremento bovino demonstrou ter efeitos positivos em argamassas de terra para reboco produzidas tanto com uma terra de clima tropical como com uma terra de clima temperado mediterrâneo, merecendo ser mais estudado como bioestabilizante eco-eficiente.

Palavras-chave: Reboco de terra, bioestabilização, solos tropical e mediterrânico, estrume de vaca, DIN 18947.

1 INTRODUÇÃO

Considerando as consequências que vêm sendo observadas no planeta relacionadas com as alterações climáticas, buscar materiais e soluções que possam atender às demandas construtivas da humanidade, ao mesmo tempo em que são capazes de contribuir para a redução das emissões de poluentes na atmosfera, é cada vez mais fundamental e urgente.

A construção com terra é um saber ancestral e seu uso atravessa milênios, sendo amplamente utilizada até a atualidade. Além do imenso acervo de patrimônios edificados com terra em todo o mundo, evidenciando seu potencial e durabilidade, nas últimas décadas a construção com terra tem sido cada vez mais investigada a nível mundial. Essas investigações visam melhorar as técnicas de conservação, mas também suportar a utilização da terra em novas construções. Além disso, outro fato que demonstra a importância que os produtos com terra para a construção têm vindo a ganhar são as normas técnicas que vêm sendo publicadas em diversos países com destaque para a Alemanha (Schroeder, 2018). Desde 2013 o Instituto Alemão para Normalização vem publicando um conjunto abrangente de normas DIN que estimula o uso de bioestabilização em detrimento do uso de aglomerantes químicos irreversíveis como cimento, cal e gesso, cujo processo produtivo e descarte ao fim do ciclo de vida penalizam as vantagens da construção com terra.

Neste tipo de construção, as argamassas de terra são necessárias em várias etapas: produção de adobe e de outras técnicas que utilizam compósitos à base de terra plástica, assentamento de alvenarias, piso e contra piso, reparações, além de emboço e reboco para cobrir e proteger a superfície das paredes. As argamassas de terra são, no mínimo, uma mistura de terra e água podendo conter adição de agregados complementares para controlar a retração e, opcionalmente, de estabilizantes. Especialmente em aplicações em rebocos interiores, as adições não devem comprometer o vantajoso comportamento higroscópico da argila. Assim, a composição das argamassas pode variar de acordo com o tipo de terra utilizada, que é constituída por diferentes tipos e frações de argila, silte e areia, depois da remoção de agregados de maiores dimensões.

Apesar de contribuir significativamente para o bom desempenho da argamassa em termos de trabalhabilidade, resistência mecânica e aderência aos suportes, a argila existente na terra, que constitui o ligante dessas argamassas, é sensível à ação da água (Pachamama *et al.* 2024). Para melhorar o comportamento das construções com terra em relação à ação das chuvas, muitas adições foram historicamente utilizadas nas argamassas de reboco, tais como cal aérea, óleos vegetais, gordura e excremento animal (Mileto e López-Manzanaraes, 2017). Ainda hoje em comunidades rurais no Brasil (Pachamama, 2020) e em diversas outras regiões do mundo (Bamogo *et al.* 2020), o excremento bovino é tradicionalmente utilizado como estabilizante nas argamassas de terra desde a produção do piso e do adobe, até aos rebocos.

Apesar de ainda ser um campo carente de investigação, desde a década de 90 vêm sendo publicados algumas pesquisas sobre os efeitos da adição do excremento bovino na construção com terra. Essas publicações evidenciam que, na proporção correta, a adição desse excremento reduz a retração (Manette *et al.* 2015) e a absorção de água (Santos e Souza, 2018), aumenta a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a aderência (Yalley e Dotoyhy, 2013; Pachamama *et al.* 2020) e a durabilidade (Kulshreshtha *et al.* 2022; Pachamama *et al.* 2024).

Millogo *et al.* (2016) e Bamogo *et al.* (2020) esclarecem que o excremento bovino é rico em nitrogênio, fósforo, ácido fosfórico e potássio. Quando adicionado às argamassas de terra argilosa caulinítica, esses componentes reagem com a caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e a sílica (SiO_2) presentes na terra, resultando em aminas silicatadas insolúveis ($Si(OH)_4NH_3$). Este composto une os componentes da

mistura, proporcionando resistência à água e dureza. Segundo estes investigadores, as fibras presentes no excremento também limitam a retração das argamassas durante a secagem e reduzem a formação de fissuras, contribuindo para a melhoria do desempenho.

Ao contrário de outros materiais mais padronizados, os solos e as terras deles extraídas são diferentes de uma região para outra, o que se agrava quando se compara terras de continentes e climas diferentes. O mesmo também pode acontecer com o excremento bovino, pois a espécie, o clima e a alimentação das vacas são diferentes. Assim, neste estudo foram formuladas e comparadas argamassas para reboco utilizando uma terra brasileira (clima tropical) já utilizada em estudos anteriores (Pachamama *et al.* 2020) e uma terra portuguesa (clima temperado). Foi comparado o efeito causado pela adição de uma amostra de excremento bovino de Portugal nas argamassas produzidas com ambas as terras. Além disso, como a argamassa produzida com a terra ITA e os efeitos nela causados pela adição de um excremento bovino do Brasil já foram avaliados anteriormente (Pachamama *et al.* 2020), os resultados das argamassas com terra ITA e excremento bovino de Portugal da presente pesquisa também serão comparados com esse estudo anterior para avaliar a influência de excrementos das distintas regiões numa mesma terra tropical. Os rebocos foram avaliados em termos de retração linear por secagem, resistências à flexão, à compressão e à aderência através do ensaio de cisalhamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Terras e areia

Para produzir as argamassas de terra para reboco foram utilizadas uma terra do Brasil (extraída de solo de clima tropical) e outra de Portugal (de solo de clima temperado). A terra brasileira (ITA) (Figura 1a) foi coletada na zona rural de Itabirito, região metropolitana de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. A terra portuguesa (CAP) (Figura 1b) foi recolhida na região metropolitana de Lisboa, na Caparica. As duas terras foram desagregadas manualmente e em seguida foram peneiradas passando por uma malha com abertura de 2,79 mm. Após secagem ao ar e ao sol, as terras já peneiradas foram levadas ao laboratório para produção das argamassas e corpos de prova.

(a)

(b)

Figura 1 – Terra ITA (a) e terra CAP (b)

A caracterização física das terras foi determinada pela distribuição do tamanho das partículas, limites de Atterberg e densidade aparente. O tamanho das partículas foi determinado utilizando a EN 1015-1 (1998) e a NBR 7181 (2016) por sedimentação para a fração mais fina. Os limites de liquidez e plasticidade e a umidade higroscópica foram determinados pela NP 143 (1969); a densidade aparente foi determinada com base na EN 1097–3 (1998). Os resultados são apresentados no Quadro 1.

A caracterização mineralógica das terras foi realizada por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro de raios X Malvern PANalytical, modelo AERIS, com radiação Cu Kα filtrada por Ni com 40

kV e 15 mA e velocidade de 0,02 º/s variando de 5 a 66º 2θ. Os minerais foram identificados combinando as fases cristalinas com o Centro Internacional de Arquivos de Difração de Pó de Dados de Fração (ICDD PDF), e a análise semiquantitativa foi realizada por refinamento de Rietveld.

Quadro 1 – Caracterização granulométrica e limites de Atterberg das terras brasileira ITA e portuguesa CAP

Limites e granulometria	ITA	CAP
Limite de Liquidez (%)	54	33
Índice de Plasticidade (%)	23	5
Argila (<0.002mm)	70	15
Silte (0.002< d <0.06mm)	15	25
Areia (0.06< d < 2mm)	15	60
Umidade higroscópica (%)	14	2.8
Densidade (g/cm³)	1.06	1.14

A caracterização mineralógica das duas terras utilizadas na produção das argamassas é apresentada no Quadro 2. A terra ITA apresenta predominância de caulinita, seguida de quartzo e goetita; a terra CAP apresenta predominância de quartzo, seguido de feldspatos, moscovita e ilita.

Quadro 2 – Análise semiquantitativa (porcentagem em massa) por DRX das duas terras ITA e CAP

Fases minerais	ITA (%)	CAP (%)
Quartzo - SiO_2	22.1	51.2
Feldspato (microclina) - $KAlSi_3O_8$	-	9.7
Feldspato (albita) - $NaAlSi_3O_8$	-	17.5
Mica (muscovita) - $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$	-	9.6
Mica (ilita) - $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,H_2O]$	-	8.2
Montmorillonita - $(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	-	0.1
Caulinita - $Al_2Si_2O_5(OH)_4$)	62.7	0.7
Goethita - FeO(OH)	15.2	-

Para controlar a retração e fendilhação por secagem das argamassas de terra, foi utilizada uma areia siliciosa (A), composta basicamente por quartzo (SiO_2), lavada, de granulometria média, com diâmetro de grão entre 0,2-0,6 mm, comumente utilizada para produção de argamassas de reboco na região de Lisboa, Portugal. A densidade aparente da areia é de 1,40 g/cm³.

2.1.2 Excremento bovino

O excremento bovino (CD) utilizado foi coletado na zona rural de Moita, um município e pequena cidade da área metropolitana de Lisboa, Portugal. O CD foi produzido por animais alimentados no pasto e por isso continha muitas fibras vegetais. Foi coletado fresco no pasto (no mesmo dia em que foi excretado) e colocado para secar à sombra em recipiente plástico descoberto (Figura 2a), com o intuito de evitar que qualquer componente químico líquido (ou solúvel na água contida no CD) fosse perdido para o solo. Diariamente o CD foi revirado para uniformizar a secagem. Após sete dias o CD ainda estava bastante úmido, apresentava leve odor orgânico e alguns grumos que foram facilmente desagregados ao passar o CD em uma peneira com abertura de 4,8mm com auxílio de leve pressão manual sobre a malha para retirar gravetos e cascalhos indesejados. Em seguida o material foi passado na peneira com abertura de 2,79 mm da mesma forma. Depois de peneirado o material ficou bem homogêneo e com grande quantidade de fibras vegetais visíveis, cujo comprimento não ultrapassa 1 cm (Figura 2b). O CD foi adicionado à mistura de terra e areia (argamassa) no mesmo dia em que foi peneirado e as medidas de densidade e umidade foram determinadas pelos mesmo métodos utilizados na caracterização das terras. A densidade medida foi de 0,40 g/cm² e o teor de umidade de 61%.

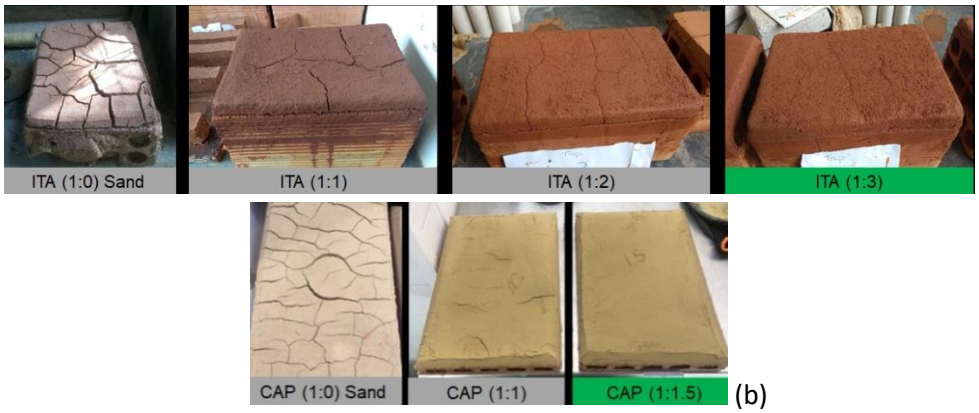
(a) (b)

Figura 2 – Excremento bovino sendo peneirado após 7 dias secando (a) e após peneiração (b)

Segundo Millogo *et al.* (2016), enquanto o CD seca é liberado calor, água, metano, dióxido de carbono e amônia. Depois de seco, os principais componentes do CD são fibras vegetais (essencialmente compostas por celulose, hemicelulose e lignina), microrganismos e compostos orgânicos de aminas (provenientes da amônia que evaporou). Além disso, há fragmentos de tecidos intestinais, potássio, ácido fosfórico, vestígios de enxofre, cálcio, ferro, magnésio, e também quartzo e argila ingeridos acidentalmente pelo animal junto com o capim de que se alimenta.

2.2 ARGAMASSAS FORMULADAS E CORPOS DE PROVA

Para definir o traço terra:areia das argamassas, foram experimentadas diferentes proporções de areia na produção de argamassas com uso de água necessária para obter espalhamento de 170 mm. Com cada terra foram produzidas argamassas nos traços volumétricos terra:areia 1:0, 1:1, 1:1.5, 1:2 e 1:3, com as quais se rebocou a superfície de tijolos cerâmicos vazados. Após 24 horas observou-se qual traço apresentou menor surgimento de fissuras na superfície do reboco (Figura 3). Para produzir as argamassas com a terra CAP, optou-se pelo traço volumétrico terra:areia 1:1.5. Já com a terra ITA, apesar de o traço 1:3 não ter evitado 100% do surgimento de fissuras, optou-se por usá-lo devido as conclusões obtidas num estudo prévio (Pachamama *et al.* 2020). Nesse estudo foi utilizado o traço 1:4 por conter completamente o surgimento de fissuras. No entanto, foi observado que a maior adição de areia reduziu a resistência mecânica das argamassas e também que a adição de CD reduziu expressivamente a retração das argamassas avaliadas. Portanto optou-se na presente pesquisa por utilizar o traço 1:3, contando com a redução da retração que seria, e foi, causada pela adição de CD.



(a) (b)

Figura 3 – Ensaio preliminar de retração com a terra ITA (a) e a terra CAP (b). Em verde, as proporções volumétricas de terra:areia dos rebocos que evitaram o surgimento de fissuras.

Para avaliar o efeito do CD, além das argamassas de referência sem adição (0% CD), foram formuladas mais duas argamassas com cada uma das duas terras: uma com adição de 10% e a outra com 20% de CD (em volume dos componentes secos: terra mais areia). Todas as composições das argamassas estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Composição, relação mássica água/componentes secos necessária para atingir espalhamento de 170 ± 5 mm no ensaio de consistência por espalhamento e densidade fresca das argamassas de terra.

Argamassa e traço volumétrico (terra:areia)	Terra T (% vol.)	Areia A (% vol.)	Adição de CD (% vol. T+A)	Água/componentes secos (T+A+CD)	Densidade fresca (g/cm³)
CAP REF (1:1,5)	40	60	0	20	1.45
CAP+10CD (1:1,5)	40	60	10	21.5	1.39
CAP+20CD (1:1,5)	40	60	20	23	1.36
ITA REF (1:3)	25	75	0	22	1.85
ITA+10CD (1:3)	25	75	10	24	1.79
ITA+20CD (1:3)	25	75	20	26	1.74

As argamassas foram produzidas em misturador mecânico no laboratório com base nas instruções da norma DIN 18947 (NABau, 2024). A água foi adicionada até a argamassa atingir o espalhamento de 170 ± 5 mm no ensaio de mesa de espalhamento (garantindo uma boa trabalhabilidade). A relação água/componentes secos (em massa) é apresentada no Quadro 3. As argamassas frescas foram caracterizadas pela consistência por espalhamento, de acordo com a EN 1015-3 (CEN, 1999) e na densidade fresca, de acordo com a EN 1015-6 (CEN, 1998c). Conforme exigido pela norma DIN, todas as argamassas frescas apresentaram densidade superior a 1,2 kg/dm³ (Quadro 3).

Para avaliar as argamassas depois de secas, foram produzidos dois tipos de corpos de prova. O primeiro tipo são os corpos de prova prismáticos com 40 mm x 40 mm x 160 mm (Figura 4a), padrão indicado na norma alemã DIN 18947 (2024). Para cada argamassa formulada foram produzidos 3 destes corpos de prova prismáticos em moldes metálicos para os ensaios de retração, resistência a flexão e a compressão. Estes corpos de prova foram produzidos e armazenados em laboratório, com umidade relativa (UR) de 63 ± 5% e temperatura de 26 ± 3ºC. Permaneceram no ambiente laboratorial desde a sua produção até a realização dos ensaios, aos 30 dias de idade. Todos os corpos de prova foram ensaiados após atingirem massa constante.

O segundo tipo de corpo de prova foi constituído por argamassa aplicada como reboco em paredes experimentais no exterior, coberto, do laboratório para ensaio de aderência por cisalhamento, baseado em Hamard *et al.* (2013). As pequenas aplicações de reboco tinham superfície de 5 cm x 4 cm e 2 cm de espessura. Antes das aplicações na parede, as superfícies foram umedecidas por pulverização de água. Foram produzidos seis corpos de prova de reboco para cada argamassa formulada, sendo três em parede de alvenaria de tijolo cerâmico vazado, assentados com argamassa de cimento, e três em parede de alvenaria de adobe, assentados com argamassa de terra (Figura 4).

(a) (b) (c) (d)

Figura 4 – Corpos de prova prismáticos (a), corpos de prova de reboco aplicado em alvenaria de tijolo cerâmico vazado (b) e em adobe (c), sendo testados com dispositivo artesanal com a adição de massas (d).

2.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Os ensaios foram realizados utilizando as normas europeias recomendadas pela DIN 18947 (2024). Para a retração linear por secagem foram utilizados três corpos de prova prismáticos e, conforme a norma DIN, a retração ocorrida durante a secagem foi avaliada em porcentagem pela diferença entre as dimensões do corpo de prova desmoldado e do molde metálico.

Para resistência à flexão e compressão foram utilizados os mesmos três corpos de prova prismáticos, seguindo a norma EN 1015-11 (2019). O ensaio de flexão foi realizado primeiro, rompendo 3 corpos de prova por argamassa avaliada. Em seguida, com as 6 metades obtidas, foi realizado o ensaio de compressão axial. Para o ensaio de flexão, uma célula de carga de 2 kN foi acoplada e configurada a uma velocidade constante de 0,2 mm/min em aplicação de carga vertical. Para o ensaio de compressão, a célula de carga de 2 kN foi mantida e a velocidade foi ajustada em 0,7 mm/min.

Para a resistência adesiva por cisalhamento de cada argamassa avaliada, foram ensaiados três corpos de prova de reboco aplicado sobre paredes de adobe e três sobre paredes de alvenaria de tijolo cerâmico vazado, utilizando o método definido por Hamard *et al.* (2013) e um dispositivo artesanal de madeira para suportar o aumento progressivo de massa de 250 g. A resistência ao cisalhamento adesivo (em N/mm^2) foi definida pela massa máxima suportada (em g) multiplicada pela aceleração gravitacional (g= 9,81 m/s^2) e dividida pela área de contato entre o reboco e a parede (em mm^2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RETRAÇÃO LINEAR POR SECAGEM

A Figura 5 mostra que as argamassas com terra portuguesa apresentam retração menor que as argamassas com terra brasileira. Isto é interessante e possivelmente se justifica pela composição final das argamassas (terra + areia) mas principalmente pelo teor de argila da terra utilizada. Enquanto as argamassas produzidas com CAP (1:1,5) apresentam aproximadamente 6% de argila em sua composição, as argamassas produzidas com ITA (1:3) possuem o dobro de areia adicionada (3 volumes) mas ainda assim apresentam 18% argila em sua composição, o que causa mais retração.

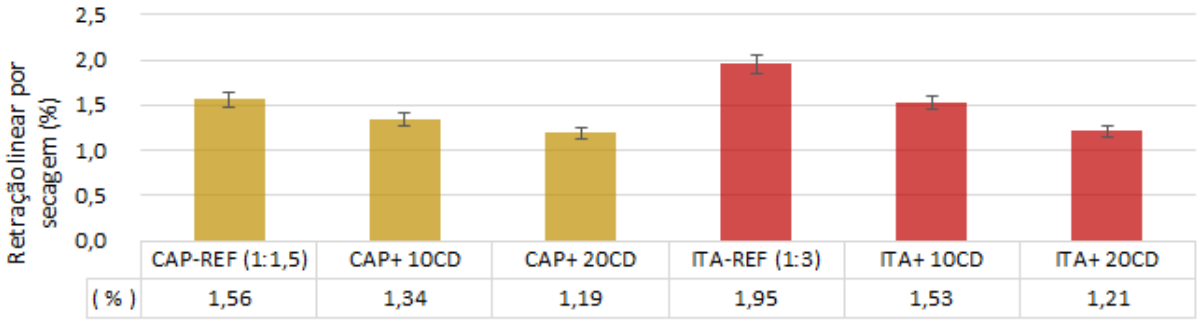


Figura 5 – Retração linear por secagem das argamassas avaliadas: média e desvio padrão.

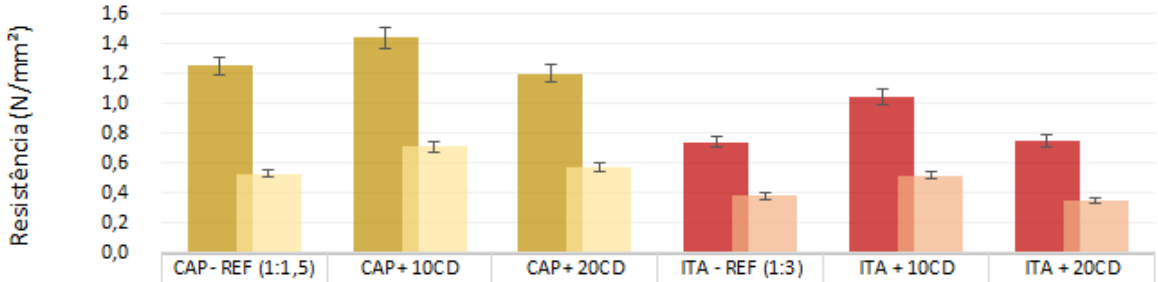
Nas argamassas produzidas com as duas terras, a adição de CD reduziu a retração linear, sendo a redução proporcional à adição. Isto é provavelmente justificado pelo elevado teor de fibras do CD adicionado às argamassas. Além disso todas as argamassas cumprem a norma DIN 18947 (2024), apresentando índices de retração inferiores a 2%, limite máximo da norma.

Outros autores também registraram redução da retração com adição de CD; Bamogo *et al.* (2020) quando adicionou 0 a 6% em massa de CD em rebocos de terra e Millogo *et al.* (2016) ao adicionar 0 a

3% em massa de CD na produção de adobe. Ambos utilizaram CD em pó seco e observaram a redução da retração mesmo com as fibras trituradas. Os autores atribuíram este facto às aminas de silicato, composto formado a partir da reação entre os componentes presentes no CD e as pequenas partículas soltas na terra, aglomerando-as e conferindo coesão e resistência.

3.2 RESISTÊNCIAS À FLEXÃO, COMPRESSÃO E ADERÊNCIA

Quanto aos resultados dos ensaios de resistência à flexão e à compressão (Figura 6), as argamassas com a terra tropical ITA apresentaram valores menores em comparação às de clima temperado. Isto pode estar relacionado à quantidade de areia que foi adicionada nesta argamassa: o dobro do que em CAP-REF. No entanto, ao observar os resultados da retração linear por secagem, na figura anterior (Figura 5) constata-se que a adição de CD reduz significativamente a retração das argamassas produzidas com a terra ITA. Neste sentido, para melhorar o desempenho ambiental e aumentar a resistência de argamassas produzidas com a terra ITA, a dosagem destas poderia ser otimizada, reformulado o traço terra:areia, reduzindo para 1:2 ou mesmo 1:1,5 (como as argamassas produzidas com terra CAP) e adicionando CD para reduzir sua retração.



	CAP - REF (1:1,5)	CAP + 10CD	CAP + 20CD	ITA - REF (1:3)	ITA + 10CD	ITA + 20CD
Compressão (N/mm²)	1,25	1,44	1,20	0,74	1,04	0,75
Flexão (N/mm²)	0,53	0,71	0,57	0,38	0,52	0,35

Figura 6 – Resistências à compressão e flexão das argamassas avaliadas: média e desvio padrão.

Lima *et al.* (2020) avaliaram as propriedades mecânicas de argamassas de terra produzidas com 3 diferentes terras que apresentaram predominância de 3 diferentes tipos de argila em sua composição. Em todas as argamassas produzidas foram adicionadas 3 proporções volumétricas de areia. Os rebocos de terra ilítica apresentaram maior resistência à compressão e flexão (0,88 N/mm² e 0,25 N/mm² respectivamente) que os rebocos de terra caulinitica (0,45 N/mm² e 0,18 N/mm² respectivamente). Isso pode justificar as argamassas com argila Ilita (presente em CAP) oferecerem maior resistência mecânica que as argamassas de terra com argila caulinita (presente em ITA).

Outra razão para as diferenças entre os resultados de ITA e CAP pode ser a origem geográfica e o clima. Existem muitos componentes e variedades microminerais que podem influenciar o comportamento das argamassas em relação à resistência à flexão e à compressão. Como ainda existem poucas pesquisas avaliando as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra com terras tropicais, torna-se difícil determinar de forma precisa que diferenças específica entre as argamassas de terra produzidas com terras tropicais e temperadas ocorrem, e neste sentido, identificar quais são os agentes responsáveis pelos diferentes comportamentos.

Walter *et al.* (2022) testaram a resistência à flexão e à compressão de corpos de prova prismáticos de argamassas de terra sem adição de areia, produzidas com 14 diferentes terras tropicais da Guiana Francesa e encontraram resistências à compressão de 0,21 N/mm² a 2,53 N/mm² e resistências à flexão de 0,3 N/mm² a 0,8 N/mm². Isso mostra a grande variação existente apenas entre as terras tropicais de uma pequena região tropical. Após realizar a caracterização química das terras, os investigadores

observaram que a resistência mecânica das argamassas com as terras tropicais avaliadas tem correlação direta com a presença de óxidos de ferro e de alumínio na terra. No presente estudo, a terra tropical ITA possui presença expressiva de óxidos de ferro, mas quando comparada com a terra CAP de clima temperado, a resistência mecânica é inferior àquelas temperadas. Portanto, há uma combinação de fatores que contribuem para gerar os diferentes comportamentos entre essas argamassas de terra, como a composição química e mineralógica das terras, distribuição granulométrica e tipo de argila.

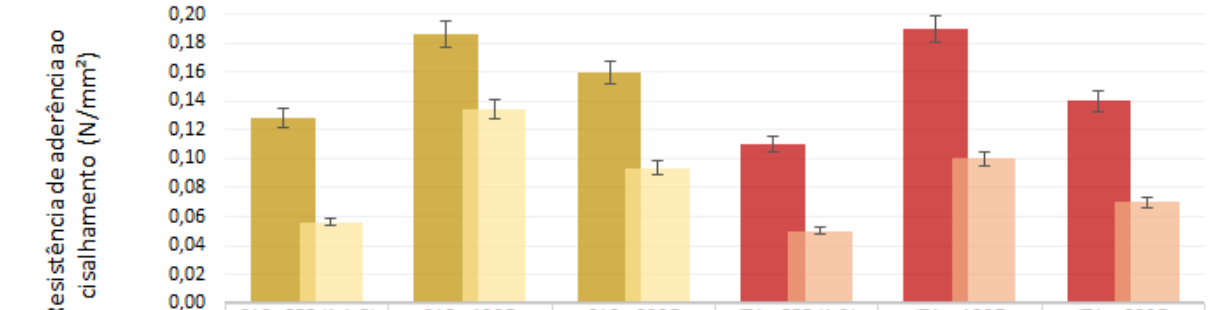
Em relação aos efeitos da adição de CD, a Figura 6 evidencia o aumento proporcionado na resistência em comparação às argamassas de referência, sendo a proporção de 10% mais eficiente que a de 20%. Apesar disso, na argamassa produzida com a terra CAP, mesmo a adição de 20% de CD proporciona resistência acima dos parâmetros determinados pela norma DIN 18947 (2024), que estipula que a resistência à flexão deve ser superior a 0,3 N/mm^2 e à compressão deve ser superior a 1 N/mm^2, valor superior ao mínimo de argamassas para reboco segundo a norma EN 998-1 (2016): 0,4 N/mm².

Em argamassas de terra produzidas com a mesma terra ITA mas na proporção volumétrica terra:areia de 1:4, Pachamama *et al.* (2020) também observaram o aumento da resistência à flexão e à compressão com 10% e 20% com adição de CD do Brasil. A argamassa de referência sem adição de CD apresentou resistência à flexão de 0,3 N/mm² e resistência à compressão de 0,6 N/mm². A adição de 10% de CD aumentou em 50% ambas as propriedades e a adição de 20% de CD diminuiu 10% a resistência. Na presente pesquisa os valores foram maiores, mas isso se justifica pela menor adição de areia (1:3) e, logo, um maior teor de argila presente na mistura. No presente estudo, a adição de 10% CD também aumentou em 50% as resistências à flexão e compressão da argamassa de terra ITA, e a adição de 20% CD não alterou significativamente a resistência da argamassa em comparação à de referência.

Millogo *et al.* (2016) também registraram o aumento da resistência mecânica ao adicionar até 3% em massa de CD em adobe. O aumento na resistência à compressão dos adobes foi proporcional ao aumento no teor de pó de CD adicionado, tendo seu melhor desempenho na adição de 3 %: 2,8 N/mm². Em outro estudo, Bamogo *et al.* (2020) ao avaliar a adição de até 6% em peso de CD em rebocos de terra, evidenciaram que a proporção de 6% foi a mais eficiente. Registrou-se aumento da resistência à flexão para 0,7 N/mm² e da resistência à compressão para 2,4 N/mm². Os pesquisadores atribuíram esse fato à formação do novo composto (amina de silicato) resultante da interação entre o CD e a terra. Segundo os autores, a formação deste composto aglutina partículas isoladas de terra e proporciona mais dureza e resistência.

Já em relação aos resultados para resistência de aderência ao cisalhamento (Figura 7), a diferença entre as argamassas produzidas com a terra CAP e com a terra ITA não é tão significativa, mas nota-se que os resultados na alvenaria de adobe são sempre superiores aos da alvenaria de tijolo cerâmico. Embora o ensaio tenha sido realizado utilizando um método diferente do definido na norma DIN 18947 (2024), todas as argamassas apresentaram resultado superior a 0,05 N/mm², conforme os parâmetros da norma.

A proporção de 10% CD aumentou em 100% a aderência dos rebocos com as duas terras na alvenaria de tijolo cerâmico e na de adobe aumentou em mais de 50%. Já a adição de 20% de CD também aumentou a aderência em relação às argamassas de referência, mas de forma menos expressiva. Este efeito da adição do excremento bovino possivelmente também se deve à formação da amina de silicato. Segundo Bamogo *et al.* (2020), devido aos pares de elétrons livres nos átomos de oxigênio e especialmente nos átomos de nitrogênio, as aminas de silicato se comportam como um adesivo. Parece que este caráter adesivo da molécula pode melhorar a aderência dos rebocos com terra.



	CAP- REF (1:1,5)	CAP+ 10CD	CAP+ 20CD	ITA - REF (1:3)	ITA + 10CD	ITA + 20CD
Adobe (N/mm²)	0,13	0,19	0,16	0,11	0,19	0,14
Tijolo cerâmico (N/mm²)	0,06	0,13	0,09	0,05	0,10	0,07

Figura 7 – Tensão de aderência ao cisalhamento das argamassas avaliadas: média e desvio padrão.

Pachamama *et al.* (2020), ao testar a aderência de rebocos de terra ITA com adição de CD, mas com adição de areia na proporção volumétrica de 4 em vez de 3 como no presente estudo, e utilizando um CD diferente (do Brasil) e mais seco do que no presente estudo obteve resistência a aderência no adobe de 0,10 N/mm² para a argamassa de referência, 0,17 N/mm² para argamassa com adição de 10% de CD e 0,12 N/mm² para argamassa com adição de 20% de CD. No presente estudo os resultados em alvenaria de adobe foram um pouco superiores e isto provavelmente se justifica pelo maior teor de argila (menos areia) nas argamassas, pela superfície mais rugosa do adobe e também pelo diferente método de ensaio. Em Pachamama *et al.* (2020) foi utilizado o método padrão de ensaio pull-off, enquanto no presente estudo foi utilizado o ensaio de resistência ao cisalhamento adesivo, de acordo com Hammard *et al.* (2013). Este método de ensaio foi escolhido por ser considerado mais adaptado e apropriado para ensaiar rebocos com terra, pois reduz falhas na preparação de amostras de adesão.

O método de ensaio de Hammard *et al.* (2013) é menos agressivo para a superfície de contato entre o reboco e o suporte, e foi desenvolvido para avaliação de rebocos produzidos e aplicados *in situ* em edifícios antigos para proteger paredes de taipa na França. Com este método, os investigadores encontraram resultados entre 0,018 e 0,047 N/mm² para resistência a aderência dos rebocos com terra avaliados. Usando este mesmo método, Lima *et al.* (2020) também avaliaram a resistência de aderência de rebocos produzidos com terras ilíticas e cauliníticas na relação volumétrica 1:3 terra:areia. Os rebocos foram aplicados sobre tijolos cerâmicos e obtiveram resistência de 0,07 e 0,04 N/mm², respectivamente. Assim como os resultados de resistência a compressão e flexão realizados por estes investigadores, os resultados deste ensaio também são semelhantes à resistência adesiva obtida em tijolos cerâmicos pelas argamassas de referência avaliadas na presente pesquisa, que também foram produzidas com terra caulinítica (ITA) e terra ilítica (CAP).

4 CONCLUSÕES

Na presente pesquisa, argamassas produzidas com uma terra tropical brasileira (ITA) foram comparadas com argamassas produzidas com uma terra portuguesa de clima temperado mediterrâneo (CAP) para investigar alterações entre argamassas de reboco de referência e também os efeitos de duas diferentes porcentagens de adição de excremento bovino.

Para a retração linear por secagem, a proporção de 20% (em massa dos constituintes secos - terra e areia adicional) de excremento bovino foi mais eficiente para evitar o surgimento de fissuras. Já para a resistência à flexão, compressão e aderência a proporção de 10% de excremento bovino foi mais eficiente que 20%. Como a adição de 20% também aumenta as propriedades das argamassas com ITA e CAP, não é problema utilizar esta proporção maior quando a terra utilizada para produzir as

argamassas for mais expansiva, possibilitando reduzir a adição de areia para conter a retração. Segundo a literatura, a otimização das argamassas de terra através da adição de excremento bovino é justificada pelas aminas de silicato formadas e pelos ácidos graxos contidos no excremento, que melhoram o desempenho mecânico ao aglutinar as partículas de terra e a aderência do reboco ao suporte.

Uma conclusão importante do presente estudo é quanto às argamassas de terra produzidas com a terra brasileira ITA. No outro estudo prévio dos autores citado ao longo de todo o artigo, foram avaliados os efeitos causados pela adição de um excremento bovino do Brasil em argamassas de terra produzidas com a mesma terra tropical ITA utilizada na presente pesquisa, porém no traço volumétrico terra:areia 1:4. Os resultados do referido estudo prévio evidenciaram aumento da resistência mecânica e aderência ao suporte, além de redução da retração. Comparando com os resultados do presente estudo, onde a terra ITA também foi utilizada na produção de argamassas de terra, porém com traço volumétrico 1:3 e com a adição de um excremento bovino de outra espécie, de outro continente e oriundo de outra realidade geográfica e climática, também teve os mesmos efeitos positivos.

Com os presentes resultados, e também validados pela literatura, este efeito positivo da adição de excremento bovino parece ser válido para argamassas de terra tanto de clima tropical como temperado. A terra tropical apresenta características diferentes e, portanto, desempenho diferente em relação à terra de clima temperado. Além disso, as terras tropicais não são tão profundamente investigadas para produção de rebocos com terra em comparação com as terras europeias. Portanto, é importante que sejam realizadas mais pesquisas sobre argamassas produzidas com terras tropicais para gerar valores adequados à realidade das terras de países tropicais, afim de compor os parâmetros de avaliação em normas técnicas nacionais para argamassas e rebocos de terra nestes países.

Agradecimentos: Os autores agradecem o financiamento ao CNPq, Brasil (201060/2022-1), à FCT, Portugal, pelo financiamento ao CERIS (UIDB/04625/2020, DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020, e à EU pelo projeto Erasmus+ BIO-FIBRE (2022-1-DK01-KA220-HED-000086641).

REFERÊNCIAS

Bamogo, H., Ouedraogo, M., Sanou, I., Ouedraogo, K.A.J., Dao, K., Aubert, J.-E., Millogo, Y. (2020). Improvement of water re-sistance and thermal comfort of earth renders by cow dung: an ancestral practice of Burkina Faso. Journal of Cultural Heritage, 46:42-51. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.009

DIN 18947 (2024). Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods (in German). NABau - Normenausschuss Bauwesen, Berlin.

EN 998-1 (2016). Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. CEN - European Committee for Standardization, Brussels.

EN 1015-1 (1998). Methods of test for mortar for masonry - Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis). CEN, Brussels.

EN 1015-3 (1999). Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN, Brussels.

EN 1015-6 (1998). Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. CEN, Brussels.

EN 1015-11 (2019). Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN, Brussels.

EN 1097-3 (1998). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 3: Determination of loose bulk density and voids. CEN, Brussels.

Hamard, E., Morel, J.-C., Salgado, F., Marcom, A., Meunier, N. (2013). A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. Journal of Cultural Heritage, 14(2):109-115. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005

Kulshreshtha, Y., Vardon, P.J., Meesters, G.M.H., Van Loosdrecht, M.C.M., Mota, N., Jonkers, H.M. (2022). What makes cow-dung stabilized earthen block water-resistant? Construction Technologies and Architecture, 1:540-548. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.540

Lima, J., Faria, P., Santos Silva, A. (2020). Earth plasters: The influence of clay mineralogy in the plasters' properties. International Journal of Architectural Heritage, 14(7):948-963. https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1727064

Manette N., Oyawa, W., Nyomboi, T. (2015). Potential of quarry dust and cow dung as stabilizers for black cotton soil eco-blocks for housing. Civil and Environmental Research, 7(8):117-124.

Mileto, C., López-Manzanaraes, F.V. (2017). The COREMANS Project. Intervention Criteria for Earthen Architecture. Ministerio de Educación, Cultura Y Deporte, Madrid.

Millogo, Y., Aubert, J.-E., Séré, A.D., Fabbri, A., Morel, J.-C. (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. Materials and Structures, 49(11):4583-4594. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6

NBR 7181 (2016). Solo – Análise granulométrica. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NP 143 (1969). Limites de consistência. IGPAI - Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa.

Pachamama, R.N., Rezende, M.A.P., Faria, P. (2020). Eco-efficient earth plasters: effect of cow dung and air lime on a kaolinitic clayish earth. International Journal of Development Research, 10(08):39323-39328. https://doi.org/10.37118/ijdr.19774.08.2020

Pachamama, R.N., Faria, P., Rezende, M.A.P., Santos Silva, A. (2024). Effect of cow dung additions on tropical and mediterranean earth mortars - Mechanical performance and water resistance. Materials, 17:2885. https://doi.org/10.3390/ma17122885

Santos, D.P., Sousa, J.G.G. (2018). Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de adobes com incorporação de adições naturais. 7º Congresso Brasileiro de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, Rio de Janeiro, Brazil, 102-113.

Schroeder, H. (2018) The New DIN Standards in Earth Building—The Current Situation in Germany. Journal of Civil Engineering and Architecture. 12:113-120. doi: 10.17265/1934-7359/2018.02.005

Walter, L., Medjigbodo, G., Claudot, L., Nait-Rabah, O., Linguet, L. (2022). Influence of metal oxides and particle size on earthen mortar built with tropical soils. Academic Journal of Civil Engineering, 40:1–10. https://doi.org/10.26168/ajce.40.2.34

Yalley, P.P.-K., Manu, D. (2013). Strength and durability properties of cow dung stabilized earth brick. Civil and Environmental Research, 3(13):117-125.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRODUCTION OF SUSTAINABLE PERVIOUS PAVING BLOCKS BY ALKALI ACTIVATION

Antonio Manuel Merino-Lechuga [a]; Ágata González-Caro [b]; Ghandy Lamaa [c]; Rui Vasco Silva [c]; Jorge de Brito [c]; José Ramón Jiménez [a]; José María Fernández-Rodríguez [b]

[a] Área de Ingeniería de la Construcción, Escuela Politécnica Superior de Belmez, Universidad de Córdoba, Av. de la Universidad S/N, 14240 Córdoba, Spain; ammlechuga@uco.es (A.M.M-L.); jrjimenez@uco.es (J.R.J.)

[b] Área de Química Inorgánica, Escuela Politécnica Superior de Belmez, Universidad de Córdoba, Av. de la Universidad S/N, 14240 Córdoba, Spain; q32gocaa@uco.es (Á.G-C.); um1feroj@uco.es (J.M.F-R.)

[c] Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Department of Civil Engineering, Architecture and Environment, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal; ghandy.lamaa@tecnico.ulisboa.pt (G.L.); rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt (R.V.S.); jb@civil.ist.utl.pt (J.d.B.)

ABSTRACT

This study examines the innovative application of accelerated carbonation curing to enhance the performance of non-structural precast alkali-activated fly ash pervious paving blocks. Blocks of dimensions 200 × 100 × 60 mm^3 were produced using a predefined technique and cured following a three-stage process: (i) thermal curing at 70 °C for 24 hours; followed by (ii) dry curing for 7 to 14 days in a climatic chamber (20 ± 3 °C and 65 ± 10% relative humidity), and finally (iii) carbonation curing at 5% CO_2, 23 ± 2 °C, and 60 ± 10% relative humidity for up to 7 days. Non-carbonated blocks served as control specimens. All blocks were evaluated according to the European standard EN 1338. The results clearly demonstrated the positive impact of accelerated carbonation curing. A 30% increase in compressive strength and a 60% increase in splitting tensile strength were observed for the 7-day CO_2-cured blocks when compared to the control counterparts. Additionally, carbonated blocks showed improved abrasion resistance, reducing mass loss due to abrasion from 8.2% to 5.6% after 7 days of CO_2 exposure. Microstructural enhancements were also observed in the carbonated blocks, leading to improved overall performance and compliance with paving standards. Specifically, there was a 2.3% increase in dry apparent density and a notable reduction in both water-accessible porosity and water absorption, decreasing by 8.4% and 4%, respectively, in the carbonated samples at 7 days compared to the non-carbonated samples. Further research is recommended to automate the production process, enhancing consistency and facilitating future standardisation.

Keywords: alkali-activated materials; accelerated carbonation curing; pervious paving blocks.

1 INTRODUCTION

Carbon dioxide (CO_2), a primary greenhouse gas, sharing up to 55% of the yearly emissions, is found to be significantly contributing to global warming and to climate change (Liu et al., 2021; J. Shi et al., 2021; Wilberforce et al., 2019). The production of one tonne of OPC emits between 0.6 and 1 tonne of CO_2, resulting in emissions of 0.2 to 0.4 tonnes of CO_2 per each cubic meter of concrete produced (Higuchi et al., 2014; Turner & Collins, 2013). Globally, OPC production reached 4.6 billion tonnes in 2015, increasing at a rate of 2.5% annually (Kaliyavaradhan & Ling, 2017).

Numerous studies have shown that using aluminosilicate-rich materials like fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as complete replacement of OPC in producing alkali-activated

materials (AAM) improves both the mechanical and microstructural properties (Bernal et al., 2010; Fernández-Jiménez & Palomo, 2005; Gruskovnjak et al., 2015; Lamaa, Suescum-Morales, et al., 2023; Lee & Lee, 2013; Palomo et al., 1999). Although coal-fired power plants have been decommissioned in several countries, there are still several (Bangladesh, China, India, Indonesia, Vietnam, Japan, etc.) that heavily rely on this type of energy production and thus produce noteworthy amounts of FA as a by-product. The environmental benefits of alkaline activation of this by-product are particularly significant, as this method eliminates the need for OPC, leading to a cement-free scenario. By utilising industrial by-products like FA and GGBFS, which would otherwise end up in landfills, alkali activation promotes sustainable practices. This approach not only reduces the environmental impact of waste disposal but also decreases the demand for traditional OPC production, known for its high carbon emissions.

Although intensive work has been conducted to replace OPC with AAM as precursors while introducing the accelerated carbonation curing method as a performance enhancer and carbon-capturing technique, this remains a broad and innovative area of study (Lamaa et al., 2023; Nedeljković et al., 2018; Palacios & Puertas, 2006). The mineralogical properties developed through accelerated carbonation curing in alkali-activated concrete act differently depending on their composition. Aluminosilicates rich in CaO exhibit behaviour similar to that of OPC, following the carbonation mechanism as shown in Equations (1) and (2). Meanwhile, aluminosilicates with low CaO content undergo the carbonation process as depicted in Equation (3), where M represents a monovalent (Na^+, K^+, NH^{4+}) or divalent (Ca^{2+}, Mg^{2+}) metal.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad \text{Eq. (2)}$$

$$MSiO_2 + CO_2 \rightarrow MCO_3 + SiO_3 \quad \text{Eq. (3)}$$

In the quest for a sustainable and eco-friendly future in construction, this study presents a fresh strategy by using accelerated carbonation curing strategically in the manufacturing process of alkali-activated pervious concrete paving blocks. In this research, the compressive strength, splitting shear strength and abrasion resistance according to EN 1338 (CEM, 2004) of draining pavement blocks subjected to accelerated carbonation were evaluated. Dry bulk density, water absorption and water accessible porosity were also evaluated according to standard UNE 83980:2014 (AEN, 2014). The infiltration time was evaluated by making an interpretation of standard ASTM C1701/C1701M-09 for this type of real draining pavement blocks.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

FA from a power plant in Portugal served as a binder, meeting necessary size requirements without pre-treatment. The skeletal density was determined (2431 kg/m^3), and FA underwent a 24-hour drying process at 105 °C to ensure uniformity. Three types of limestone aggregates were used: natural sand (NS); fine gravel (FG); and coarse gravel (CG), with oven-dried particle density of 2.62 g/cm^3 for NS, 2.43 g/cm^3 for FG, and 2.47 g/cm^3 for CG, respectively. Water absorption rates were 1.78% for NS, 2.64% for FG, and 3.14% for CG. All aggregates were dried at 105 °C before use to maintain consistent conditions.

The alkaline activator solution used in this research was formulated by mixing sodium silicate solution (Na_2SiO_3), sodium hydroxide (NaOH), and water. A commercially available reactive-grade sodium metasilicate solution was employed, containing 12.7% to 13.3% sodium oxide (Na_2O) and 26.2% to 26.8% silicon oxide (SiO_2). This solution consisted of 59.9% to 61.1% water, with a relative density ranging from 1.296 to 1.396 g/ml. Moreover, solid NaOH pellets, with a purity of 98% and a density of 2.13 g/ml, were used and dissolved in tap water.

In this investigation, tetraborate decahydrated or borax (containing 37% B_2O_3) served as a setting time retarder. It was dissolved in the alkaline solution to prolong the setting process, thereby enhancing the workability of the mix.

2.2 MIX DESIGN

The mass ratio of SiO_2 to Na_2O was set at 0.75 and the Na_2O content was 12% of the precursor's mass. The water-to-binder ratio (w/b) was maintained at 0.3. Additionally, to prevent flash setting, borax was added as a setting-time retarder with a content of 4% by weight of the FA's mass. Table 1 provides a detailed composition of the FA mix.

Table 1 - Mix formulation (kg/m^3).

Materials	Content
FA	240
Water	18.7
Borax	9.6
NS	500
FG	900
CG	800
NaOH	28.3
Na_2SiO_3 solution	81.8

2.3 PRODUCTION METHOD

The process began by mixing NS, FG, and CG in a mortar mixer for 30 seconds to ensure uniformity. Aggregate saturation water was then added, followed by a 3-minute resting period to allow complete absorption. FA was gradually introduced while mixing continued, and the alkaline solution was prepared simultaneously. Once the aggregate and FA mixture was homogeneous, the alkaline solution was added, and mixing continued for 2 minutes. Handmade metallic moulds were used to produce blocks with internal dimensions of 200 mm × 100 mm × 80 mm, incorporating a metal plate inside to achieve a final height of 60 mm. The blocks were formed in two layers, compacted using a vibrating hammer, and demoulded using a wooden extruder. This process yielded permeable pavement blocks, as shown in Figure 1, with final dimensions of 200 mm × 100 mm × 60 mm, with two blocks produced per mix batch.

2.4 CURING CONDITIONS AND TESTING METHODS

After demoulding, all blocks were thermally cured in an oven at 70 °C for 24 hours. Four different curing regimens were applied. Following the thermal curing process, all blocks were placed in a dry chamber (DC) at 20 ± 3 °C and 65 ± 10% relative humidity (RH) for 7 days. After this initial 7-day

period in the DC, three-fourths of the blocks were transferred to a carbonation chamber (CC) with conditions of 5% CO_2, 23 ± 2 °C, and 60 ± 10% RH. After spending 24 hours in the CC, one-fourth of the blocks were returned to the DC for an additional 6 days. On the third day in the CC, another one-fourth of the blocks were moved back to the DC for 4 more days. Finally, one-fourth of the remaining blocks were taken out of the CC after 7 days and subjected to testing alongside the entire batch.

Figure 1 - Manufacturing process of the pervious paving blocks.

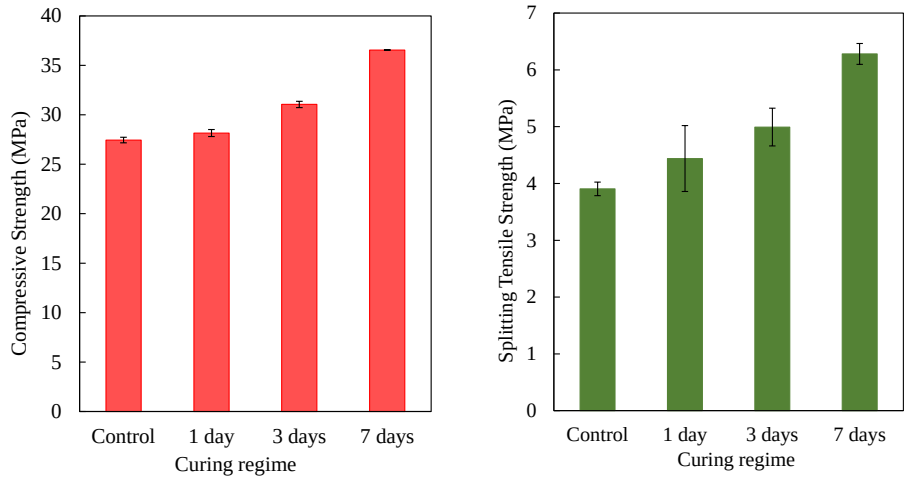
To check the mechanical performance of the blocks, compressive and splitting tensile strength tests were conducted. Abrasion testing was carried out to assess durability against wear, while changes in apparent dry density, water absorption, and water-accessible porosity were examined to understand alterations resulting from the carbonation process. Finally, to determine the block's water drainage potential, a water infiltration test was performed. Mean values of all results along with standard deviation are presented.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 COMPRESSIVE AND SPLITTING TENSILE STRENGTHS

The alkali-activated pervious paving blocks demonstrated remarkable performance, with the control specimens exhibiting average compressive and splitting tensile strengths values of 27.4 MPa and 3.9 MPa, respectively, as illustrated in Figure 2. These values indicate high-quality mechanical performance, exceeding observations from previous studies on OPC studies that showed an average compressive strength of less than 15 MPa (Aoul et al., 2022). Notably, after 7 days of CO_2 exposure, the blocks showed a substantial increase of over 30% in compressive strength and nearly 60% in splitting tensile strength, reaching average values of 36.6 MPa and 6.3 MPa, respectively. This notable performance can be attributed to the decomposition of highly reactive amorphous aluminosilicate phases of the alkali-activated FA in an alkaline environment. These phases subsequently aggregated into sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) polymeric chains, primarily in the form of Si-O-Si bridges, resulting in enhanced strength. Furthermore, the blocks showed a favourable response to accelerated carbonation. The high porosity of the mix facilitated extensive carbonation of the pervious paving blocks within 7 days of CO_2 curing. This caused the reactions to occur more rapidly than in less porous elements, as the primary challenge of accelerated carbonation is the dependency on CO_2 penetrating through the pores of the concrete matrix. Therefore, porous mixes, where the entire mass is accessible to CO_2, are more suitable for applying accelerated

carbonation technologies (Kaliyavaradhan & Ling, 2017; Pacheco-Torgal, 2018; C. Shi et al., 2012; Zhan et al., 2016).

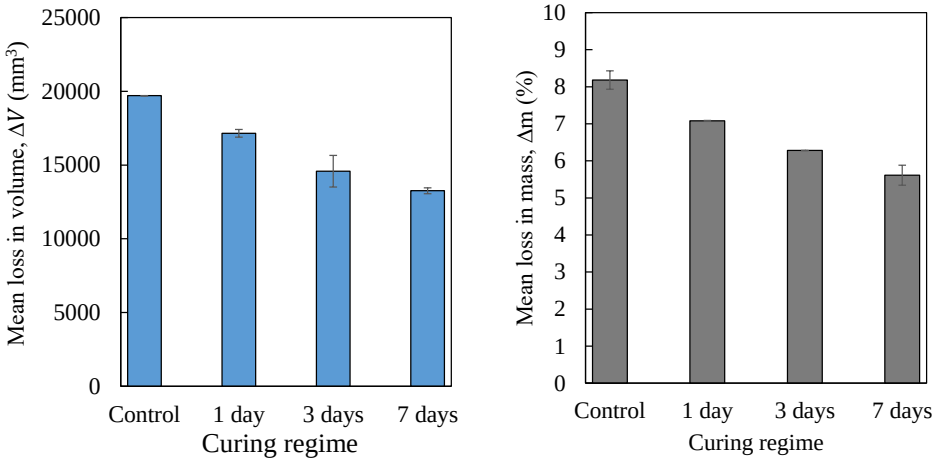


(a) (b)

Figure 2 - Compressive (a) and splitting tensile (b) strength results of the non-carbonated (control) and carbonated blocks at different CO_2 curing ages.

3.2 ABRASION RESISTANCE (BÖHME TEST)

This test is crucial for determining how pervious paving blocks withstand wear from traffic. A square sheet was cut from the blocks and tested on a Böhme disc abrader with abrasive sand over 16 cycles. The average mass loss for both carbonated and control samples was recorded (Figure 3a), with the mean loss in specimen volume (ΔV) calculated from these measurements (Figure 3b). Mass loss for carbonated and control samples was recorded, showing that longer exposure to forced carbonation decreased mass loss. The control specimen had an 8.2% mass loss, while the 7-day carbonated specimen had a 5.6% loss, indicating enhanced abrasion resistance due to carbonation. Carbonated pavers were classified under Marking I class 4 EN 1338 (CEM, 2004), suitable for high-wear areas, unlike the control paver, which was classified under Marking H class 3 EN 1338 (CEM, 2004).



(a) (b)

Figure 3 - Average loss in (a) volume (cm^3) and (b) mass (%) due to abrasion for control and carbonated blocks at different curing times.

3.3 DRY BULK DENSITY, WATER ABSORPTION AND ACCESSIBLE POROSITY

The analysis of Figure 4, detailing the properties of the blocks subjected to varying durations of CO_2 curing, reveals significant trends in dry bulk density, water absorption, and accessible porosity. The figure presents specific values for each property and illustrates the trends through linear regression. Although individual values may exhibit fluctuations due to the inherent complexity of the manufacturing process of pervious paving blocks, a discernible pattern emerges when observing the trends for each property. Notably, with increase in CO_2 curing time, there is a consistent rise in dry bulk density, accompanied by a simultaneous decrease in porosity and water absorption. Water absorption values show this trend, decreasing from approximately 6.5% for the non-carbonated (control) sample to about 6.2% for the 7-day carbonated sample. Similarly, accessible porosity for water decreases from around 14% for the control sample to 12.9% for the 7-day carbonated sample. Concurrently, the dry bulk density exhibits an upward trend, rising from 2.15 g/cm³ for the control sample to 2.20 g/cm³ for the 7-day carbonated sample. These findings suggest a consistent densification of the paving block samples as the duration of accelerated carbonation increases. While individual values may be subject to procedural variations, the overall trend validates the efficacy of the accelerated carbonation process in enhancing the physical properties of alkali-activated FA paving blocks, resulting in increased density and reduced water absorption.

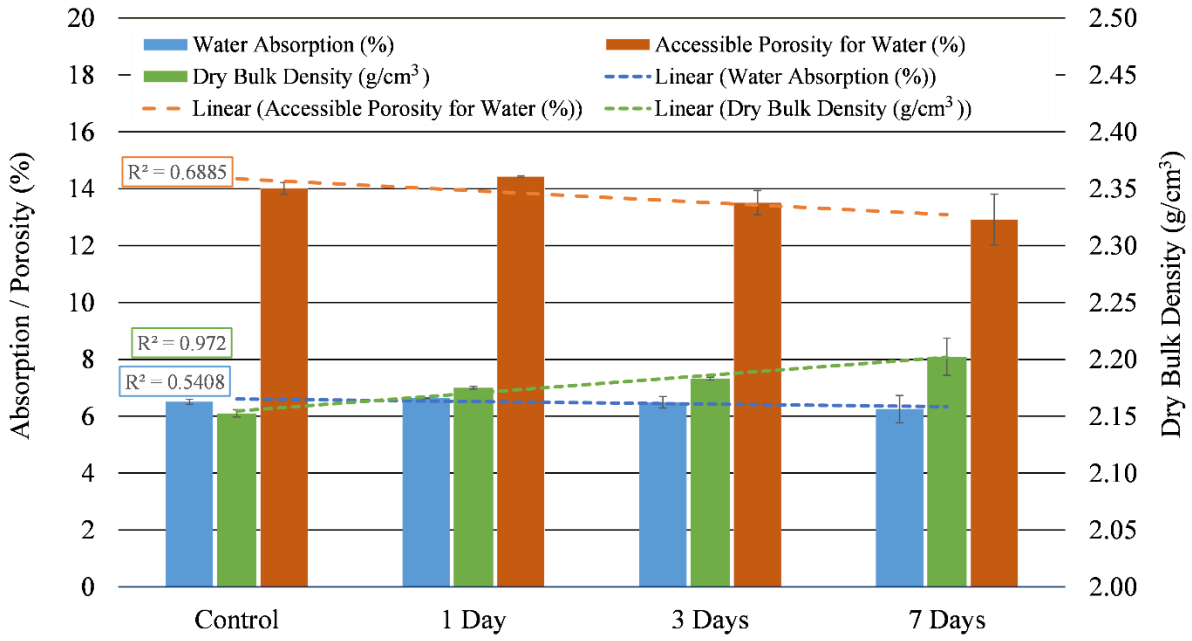


Figure 4 - Evolution of dry bulk density, water absorption, and accessible porosity in the paving blocks with increasing CO_2 curing duration.

3.4 WATER PERMEABILITY

The dynamic behaviour of water in paving blocks is illustrated by infiltration times under both normal and saturated conditions. As the CO_2 curing duration increases, a proportional increase in the time it takes water to penetrate the blocks is observed (Figure 5). This increase is attributed to sample densification, which reduces the size of the channels through which water flows. An interesting observation is that submerged samples exhibit slightly shorter permeation times, suggesting smoother water flow once the sample is fully saturated. Longer permeation times are observed in samples carbonated for 7 days compared to control samples, indicating greater densification. This

analysis underlines how the CO_2 curing process affects the structure of the blocks and their ability to facilitate water infiltration, demonstrating the relationship between densification and mechanical strength. These trends provide valuable insights into how the permeability of alkali-activated FA paving blocks evolves under different CO_2 curing conditions.

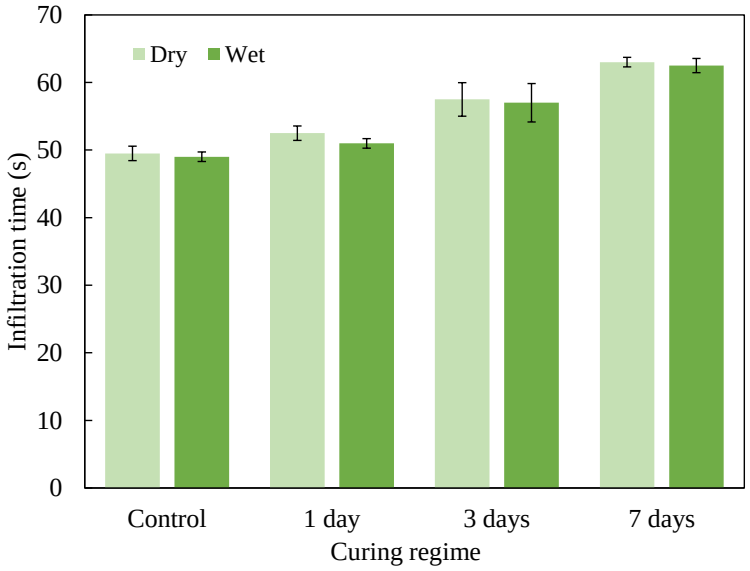


Figure 5 - Water infiltration time of the blocks with increasing CO_2 curing duration.

4 CONCLUSIONS

This study assessed the properties of pervious paving blocks using actual measurements rather than standard laboratory samples, providing valuable insights into their practical applications and functional potential in industrial settings. The carbonation curing process significantly enhanced the mechanical performance of the paving blocks.

There was an impressive increase of over 30% in compressive strength and nearly 60% in splitting tensile strength, achieving average values of 36.6 MPa and 6.3 MPa, respectively. In the abrasion test, the control specimen had a mass loss of 8.2%, while the 7-day carbonated specimen had a mass loss of 5.6%. Additionally, there was a proportional increase in the dry bulk density, increasing by 2.3% in the 7-day carbonated sample compared to the control. The study also observed a marked reduction in both water-accessible porosity and water absorption, decreasing by 8.4% and 4%, respectively, for carbonated samples at 7 days compared to non-carbonated samples, in line with the predicted effects of carbonation curing and carbonate precipitation.

Regarding the water infiltration *versus* time test, the former increased as the carbonation time of the samples increased (27%). A notable finding of the research was that, when the samples were submerged, the infiltration time decreased by 0.5 seconds for all samples, possibly due to the lack of water friction with the sample's dry components. Nevertheless, this is a marginal improvement with little to no practical implications.

The manufacturing process revealed areas for improvement. Further studies are recommended to refine the block production process to achieve more consistent results and to explore the most suitable methods for this purpose. Moreover, the study stresses the need for deeper investigation into accelerated carbonation of these materials, as well as the chemical properties affecting these

materials under both natural and accelerated carbonation conditions, as current research on this subject is limited.

REFERENCES

Aoul, T., Noguchi, M., Tariq Shafiq, M., Efurosibina Attoye, D., Habib Anwar, F., El-Hassan, H., Hamouda, M., Hinge, G., & Hung Mo, K. (2022). Meta-analysis of the performance of pervious concrete with cement and aggregate replacements. *Buildings, Vol. 12, Page 461*, *12*(4), 461. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12040461

Asociación Española de Normalización (2014) Concrete durability. Test methods. Determination of the water absorption, density and accessible porosity for water in concrete. AEN, Madrid

ASTM International (2009) ASTM C1701/C1701M-09. Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete. West Conshohocken, PA

Bernal, S. A., de Gutierrez, R. M., Provis, J. L., & Rose, V. (2010). Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research*, *40*(6), 898–907. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.02.003

CEM (2004) EN 1338. Concrete paving blocks - Requirements and test methods. CEM, Brussels, Belgium

Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, *35*(10), 1984–1992. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.03.003

Gruskovnjak, A., Lothenbach, B., Holzer, L., Figi, R., & Winnefeld, F. (2015). Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*, *18*(3), 119–128. https://doi.org/10.1680/ADCR.2006.18.3.119

Higuchi, T., Morioka, M., Yoshioka, I., & Yokozeki, K. (2014). Development of a new ecological concrete with CO_2 emissions below zero. *Construction and Building Materials*, *67*(PART C), 338–343. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.029

Kaliyavaradhan, S. K., & Ling, T. C. (2017). Potential of CO_2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview. *Journal of CO_2 Utilization*, *20*, 234–242. https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2017.05.014

Lamaa, G., Duarte, A. P. C., Silva, R. V., & de Brito, J. (2023). Carbonation of alkali-activated materials: A review. *Materials, Vol. 16, Page 3086*, *16*(8), 3086. https://doi.org/10.3390/MA16083086

Lamaa, G., Suescum-Morales, D., Duarte, A. P. C., Silva, R. V., & de Brito, J. (2023). Optimising the performance of CO_2-cured alkali-activated aluminosilicate industrial by-products as precursors. *Materials, Vol. 16, Page 1923*, *16*(5), 1923. https://doi.org/10.3390/MA16051923

Lee, N. K., & Lee, H. K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, *47*, 1201–1209. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.05.107

Liu, B., Qin, J., Shi, J., Jiang, J., Wu, X., & He, Z. (2021). New perspectives on utilization of CO_2 sequestration technologies in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, *272*, 121660. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121660

Nedeljković, M., Zuo, Y., Arbi, K., & Ye, G. (2018). Carbonation resistance of alkali-activated slag under natural and accelerated conditions. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *4*(1), 33–49. https://doi.org/10.1007/S40831-018-0166-4/FIGURES/16

Pacheco-Torgal, F. (2018). Introduction to carbon dioxide sequestration–based cementitious construction materials. *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials*, 3–12. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102444-7.00001-0

Palacios, M., & Puertas, F. (2006). Effect of carbonation on alkali-activated slag paste. *Journal of the American Ceramic Society*, *89*(10), 3211–3221. https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2006.01214.X

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, *29*(8), 1323–1329. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9

Shi, C., He, F., & Wu, Y. (2012). Effect of pre-conditioning on CO_2 curing of lightweight concrete blocks mixtures. *Construction and Building Materials*, *26*(1), 257–267. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.06.020

Shi, J., Tan, J., Liu, B., Chen, J., Dai, J., & He, Z. (2021). Experimental study on full-volume slag alkali-activated mortars: Air-cooled blast furnace slag versus machine-made sand as fine aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, *403*, 123983. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123983

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, *43*, 125–130. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.01.023

Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of the Total Environment*, *657*, 56–72. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.424

Zhan, B. J., Poon, C. S., & Shi, C. J. (2016). Materials characteristics affecting CO_2 curing of concrete blocks containing recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, *67*, 50–59. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.12.003

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ACCELERATED CO_2 CURING OF ALKALI-ACTIVATED PERVIOUS PAVING BLOCKS INCORPORATING SEASHELLS AS AGGREGATE

Ágata González-Caro [a]; Antonio Manuel Merino-Lechuga [b]; Ghandy Lamaa [c]; Rui Vasco Silva [c]; Jorge de Brito [c]; José Ramón Jiménez [b]; José María Fernández-Rodríguez [a]

[a] Área de Química Inorgánica, Escuela Politécnica Superior de Belmez, Universidad de Córdoba, Av. de la Universidad S/N, 14240 Córdoba, Spain; q32gocaa@uco.es (Á.G-C.); um1feroj@uco.es (J.M.F-R.).

[b] Área de Ingeniería de la Construcción, Escuela Politécnica Superior de Belmez, Universidad de Córdoba, Av. de la Universidad S/N, 14240 Córdoba, Spain; ammlechuga@uco.es (A.M.M-L.); jrjimenez@uco.es (J.R.J.).

[c] Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Department of Civil Engineering, Architecture and Environment, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal; ghandy.lamaa@tecnico.ulisboa.pt (G.L.); rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt (R.V.S.); jb@civil.ist.utl.pt (J.d.B.).

ABSTRACT

This study focuses on the manufacture of alkali-activated pervious paving blocks of 200 × 100 × 60 mm³ using a mixture of fly ash and coal mining tailings waste as precursors made with calcareous aggregates as the reference. A replacement in volume of 50% and 100% of natural sand with seashell sand was conducted. The accelerated carbonation curing method was used to improve the properties of the blocks. First, the blocks were subjected to thermal curing for 24 hours at 70 °C, then were placed in a dry chamber at 20 ± 5 °C and 60 ± 10% RH for 7 days. After these 7 days, they were moved to a carbonation chamber (5% CO_2, 20 ± 5 ºC and 60 ± 10% RH) for a varying duration between 1 and 7 days. Reference blocks were produced and placed in the dry chamber for 14 days. Once the curing process was completed, tests such as compressive strength, splitting tensile strength, and abrasion resistance were performed according to the European standard for conventional concrete pavement blocks EN 1338. A water permeability test was also performed. The results obtained revealed an increase in splitting tensile strength by 45% and compressive strength by 24% after 7 days of carbonation when compared to the reference non-carbonated blocks. When using 100% seashells, these values were of 37% at 7 days of carbonation for splitting tensile and 27% for compressive strength when compared with non-carbonated blocks. In terms of abrasion resistance, the mass loss for the non-carbonated blocks was 13% and reduced to 6% after 7 days of carbonation curing.

Keywords: pervious paving blocks; coal mining tailings; alkali-activated materials; CO_2 curing; seashell sand.

1 INTRODUCTION

The construction industry's long-standing reliance on ordinary Portland cement (OPC) as the primary building material has grown alongside the increasing global demand for housing and infrastructure. In 2020, OPC production worldwide reached 4.3 Gt, reflecting continuous growth driven by the expanding world population (Cao et al., 2020; Gijbels et al., 2020). Also, OPC has significant environmental drawbacks. In 2021, OPC production soared to 4270 million metric tonnes, resulting in around 2520 million metric tonnes of CO_2 emissions (Lamaa et al., 2024). Notably, this equates to 0.58 tonnes of CO_2 emitted for each tonne of OPC produced according to the International Energy Agency (IEA, 2024). To address environmental concerns, researchers have explored alternative materials like fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) as alkali-activated materials (AAM) to replace OPC

in concrete (Provis, 2018).

Using coal mining tailings (CMT) as a secondary raw material in the construction industry helps to reduce the consumption of finite natural resources. CMT, produced by separating coal from its inactive components, comes from excavation activities in coal and anthracite mines, including surrounding rocks (mining spoils) and by-products from coal washing (tailings). These residues are typically deposited near coal mines, altering the terrain and degrading the landscape. Some studies have extensively characterised the mining waste and investigated the combined use of CMT with OPC (Cadierno et al., 2014; Suescum-Morales et al., 2019). Cadierno et al. (2014) concluded that colliery spoils waste can serve the same functions as artificial ballast, being suitable for forming foundation and core layers in railway and road embankments, acting as a granular sub-base for light traffic areas, and for use in the upper layers of embankments. However, the presence of sulphur leachates may cause deterioration of the cement in concrete structures, so it is advisable to use sulphate-resistant cement. Suescum-Morales et al. (2019) concluded that coal mining tailings had a large amount of organic matter and were not recommended for use in soil-cement applications and a substantial amount of cement was needed to attain the minimum strength necessary for a soil-cement base layer. However, these disadvantages that arise when used with OPC are minimised when it is used as a precursor in alkali-activated materials. Conversely, FA is considered one of the best precursors for alkali activation, producing materials with performance similar to OPC. There is extensive research on this precursor (Amran et al., 2021; Fernández-Jiménez & Palomo, 2005; Lamaa et al., 2023).

On the other hand, shellfish farming is expected to grow from 17 million tonnes in 2019 to 107 million tonnes by 2030 (Bellei et al., 2023). Shell waste often ends up in landfills, where it has minimal market value and emits harmful gases as the organic material decomposes, posing risks to human health (Eziefula et al., 2018; Yoon et al., 2002). There are several studies using mollusc shells to produce building materials. The results generally result in a slight loss of compressive strength, but they are a good alternative to eliminate this waste from landfills and contribute to the circular economy. Martínez-García et al. (2017) studied the performance of mussel shells as aggregate in concrete. There was a 27% decrease in compressive strength when 25% natural sand was substituted with shell sand and a 24% decrease when natural gravel was substituted with shell gravel. This was explained by the high-water absorption capacity and by the flat and flaky shape of the mussel shells. There is very little research on the use of shells in precast pervious concrete. Nguyen et al. (2013) studied pervious concrete made with a partial replacement up to 40% of Credipula seashell as sand and gravel. They concluded that pervious concrete made with gravel (4/6.3 mm) and sand (2/4 mm) of seashells had 2.5% more tensile strength than those made with natural sand and gravel. The worst results were obtained when only gravel was used in these blocks. The seashell size influences the mechanical properties of concrete. The flakiness index of natural aggregates (4/6.3 mm) was 20.1 and that of gravel seashell (4/6.3 mm) was 73. This causes the shells to have a larger surface area and the cement to bind more poorly to the particles, affecting the strength.

This study focuses on the production of pervious paving blocks using a mixture of FA and CMT as precursors, with calcareous aggregates serving as the reference. The study examines the substitution of 50% and 100% of conventional sand with sand derived from *Acanthocardia tuberculata* seashells species. The research evaluates the impact of CO_2 on blocks over curing periods of 1, 3, and 7 days, thoroughly exploring the mechanical properties such as splitting tensile and compression strength, water stability and abrasion resistance in accordance with UNE EN 1338 (2004).

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

FA was sourced from EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. at the Sines power plant, with a density of 2431 kg/m^3. CMT were obtained from the Pozo San José mine in Fuente Obejuna, Córdoba, and ground in a ball mill for one hour, resulting in a density of 2709 kg/m^3. Moreover, three types of calcareous aggregates were supplied by Pavigesa S.L, Córdoba: sand (0-2 mm); sand-gravel (5-7 mm); and gravel (4-12.5 mm). Additionally, seashells from the *Acanthocardia tuberculata* species were sourced from a canning industry in Málaga, Spain, and ground in a ball mill to achieve a particle size similar to sand (0-2 mm).

A commercial solution of sodium silicate was used containing 12.7-13.3% sodium oxide (Na_2O) content, 26.2-26.8% silicon oxide (SiO_2) content and water in the range of 59.9% to 61.1%. In addition, to prepare the alkali activator solution, 98% pure solid-state sodium hydroxide (NaOH) pellets were added. Tetraborate decahydrate (i.e. borax) was incorporated at 4% of the binder's mass, by dissolving it in the alkaline solution for all mixes to avoid fast setting. Additionally, a water-reducing admixture was added at 2% of the CMT mass.

2.2 MIX DESIGN

The optimum mix for maximising the mechanical performance was determined in a preliminary study by varying the proportions of FA and CMT (Figure 1). Non-carbonated and carbonated samples of different families, distinguished by the FA and CMT blending proportions, were prepared and tested for compressive strength. The highest compressive strength of binary mixes was achieved by 50% FA and 50% CMT mixes, using natural calcareous aggregates. Consequently, this mix was designated as the reference mix for this study, adopting the optimal binder proportions for all produced mixes. The mass ratio SiO_2/Na_2O was 0.75 and the Na_2O content was 12% of the precursor mass. The water-to-binder (w/b) ratio was maintained at 0.3 for all mixes. Two mixes were studied: one with 50% substitution of natural sand by seashell aggregate (50%SS); and another with 100% substitution of natural sand by seashell aggregate (100%SS). Table 1 details the composition of each mix produced.

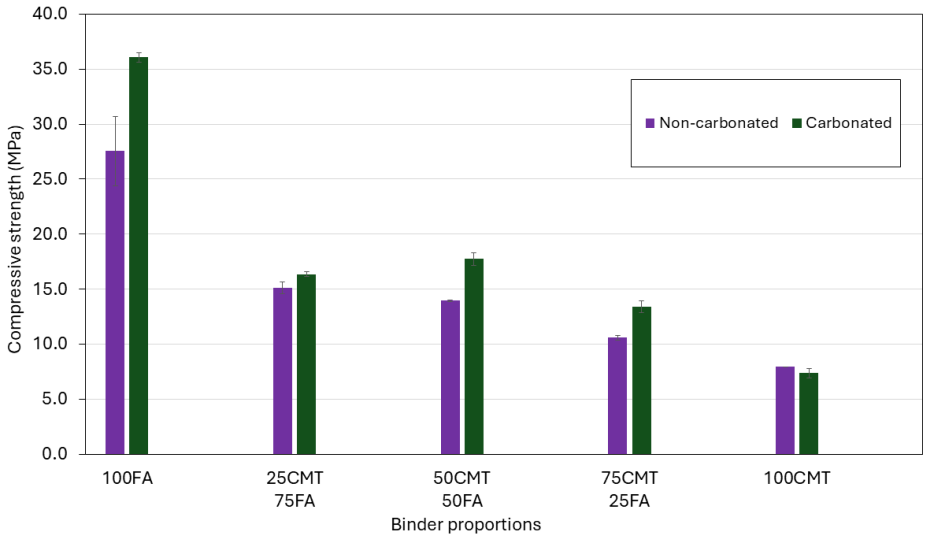


Figure 1 - Compressive strength results of different samples families with varying binder proportions cured under ambient and carbonation conditions.

Table 2 - Mix composition of blocks with varying sand replacement ratios (kg/m³).

Materials	0%SS	50%SS	100%SS
w/b	0.3	0.3	0.3
FA	120.0	120.0	120.0
CMT	120.0	120.0	120.0
Water	18.7	18.7	18.7
WRA	2.4	2.4	2.4
Borax	9.6	9.6	9.6
Natural sand	500.0	250.0	-
Sand-gravel	900.0	900.0	900.0
Gravel	800.0	800.0	800.0
Seashell aggregate	-	259.5	519.1
NaOH	28.3	28.3	28.3
Na_2SiO_3 solution	81.8	81.8	81.8

2.3 PRODUCTION AND CURING METHODS

Blocks were produced using a mortar mixer. Initially, natural aggregates were added and mixed at low speed for 30 seconds. After this, the saturation water was added, and the mixer was stopped for 3 minutes to allow absorption to occur. Next, the mixture of 50% FA and 50% CMT was added and mixed at low speed for another 30 seconds. Finally, the alkaline solution was added and mixed at a higher speed for 2 minutes.

A prismatic mould (200 × 100 × 80 mm³) with a 20 mm metal lid on top was used to create the pervious paving blocks, resulting in a block with a depth of 60 mm. The mould was initially half-filled with the mix and compacted using a vibrating hammer (HIKOKI model DH 40MC) with 1100 W and 10.5 J for 5 seconds. The second layer was then added to fill the mould completely, and a metal lid was placed on top before compacting again with the hammer to ensure the block reached a height of 60 mm. After mechanical compaction, the block was removed from the mould by extrusion using a wooden extruder, ensuring alignment with the mould. The block was pushed firmly through the mould by applying a force perpendicular to the wooden extruder. This process produced a 200 × 100 × 60 mm³ pervious paving block.

Two different curing conditions were implemented. After thermal curing at 70 °C for 24 hours, the blocks were placed in a dry chamber (DC) at 20 ± 5 °C and 60 ± 10% relative humidity (RH) for 7 days. Following this 7-day period in the dry chamber, the blocks were transferred to a carbonation chamber (CC) at 5% CO_2 (20 ± 5 °C and 60 ± 10% RH). Blocks were removed and tested at 1, 3 and 7 days of CO_2 curing. Reference blocks remained in the dry chamber for 14 days.

2.4 TESTING METHODS

The density of CMT and FA was measured with a gas pycnometer (MICROTRAC BELPycno Ver 1.14 L) using helium gas. Particle size distribution (PSD) was obtained with a Mastersizer S. Analyser (Malvern Instruments) using ethanol as a dispersant, sonicated for 5 minutes before analysis. The chemical

composition of all raw materials was analysed using X-ray fluorescence spectrometry (XRF) with a ZSX PRIMUS IV (Rigaku) operating at 4 kW.

Due to the lack of a specific standard regulating test methods for pervious paving blocks, the European standard for conventional concrete paving blocks (EN 1338:2004, 2004) was used as a theoretical foundation. Additionally, a water infiltration test not covered by the current standard was also conducted. This test measured the time a block takes to allow the infiltration of two litres of water from the surface to the bottom.

The abrasion resistance of the blocks was determined by the Böhme test in accordance with standard (EN 1338:2004, 2004). Squared samples were cut from the blocks and placed on the Böhme disc abrader. Standard abrasive material was spread on the test track, and the disc was rotated. The samples were then subjected to abrasive load for sixteen cycles.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 X-RAY FLUORESCENCE

Table 2 shows the chemical composition by XRF of FA and CMT. According to ASTM C618 (2015), FA and CMT meet the criteria for a standard pozzolan, as their combined oxide content (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) exceeds 70% of their total composition. This highlights the potential pozzolanicity of FA and CMT, which is crucial to enhancing the reactivity and performance of alkali-activated concrete. The high silica (SiO_2) content is likely to contribute to the material's reactivity, thereby improving the long-term strength and durability of the alkali-activated concrete.

Table 2 - Chemical composition of FA and CMT (%).

Oxides	FA	CMT
SiO_2	56.27	58.42
Al_2O_3	25.47	25.87
Fe_2O_3	6.90	6.46
K_2O	2.74	4.13
CaO	2.27	0.73
MgO	1.83	1.39
Na_2O	1.29	1.05
P_2O_5	0.44	0.17
SO_3	0.80	0.26
TiO_2	1.14	1.20
V_2O_5	0.05	-
Cr_2O_3	0.48	0.06
CuO	-	-
ZnO	0.02	-
SrO	0.10	0.01
Zr	0.03	0.04
MnO_2	-	0.11
BaO	-	0.04

3.2 PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

Figure 2 shows the PSD results of FA and CMT. The average particle size of FA is about 20 µm, with a secondary smaller peak around 0.37 µm. CMT exhibited a bimodal size distribution, with the majority of particles around 6 µm and a smaller peak at approximately 0.36 µm.

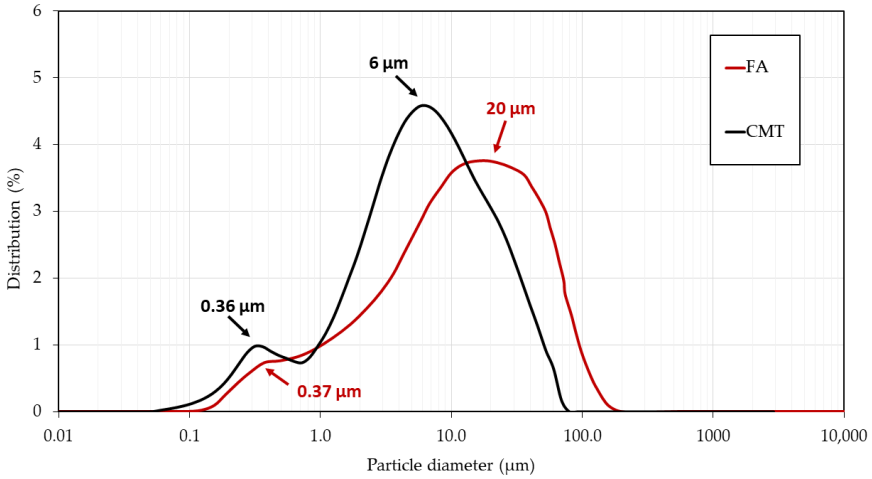


Figure 2 - Particle size distribution of FA and CMT.

3.3 MECHANICAL PERFORMANCE

3.3.1 Compressive and splitting tensile strength

Figure 3 shows the results of splitting tensile and compressive strengths of carbonated and non-carbonated blocks. Non-carbonated 0%SS specimens showed average splitting tensile and compressive strengths of 2.4 MPa and 14.3 MPa, respectively.

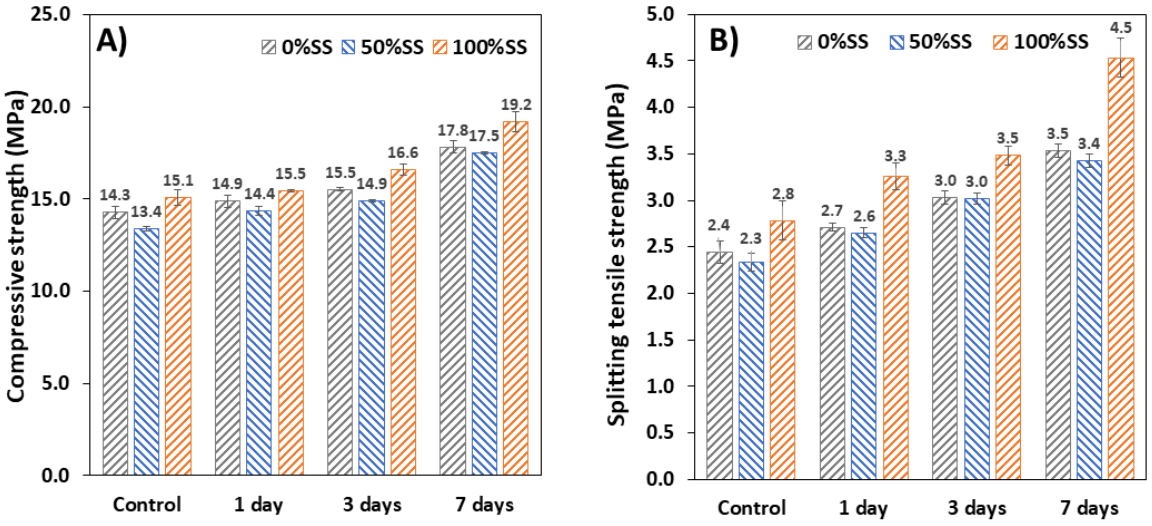


Figure 3 - A) Compressive and B) splitting tensile strengths results of non-carbonated (control) and blocks carbonated for different periods.

For 50%SS, these values were 2.3 MPa and 13.4 MPa, and for 100%SS, they were 2.8 MPa and 15.1 MPa, respectively. An unexpected phenomenon was observed in all 100% SS specimens, warranting further study. Generally, according to studies from the literature, the mechanical strength tends to decrease in elements made of mollusc shells. However, when there is an improvement in strength, it is usually attributed to the shape of the particle, which results in a smaller number of pores formed. With increased carbonation (from 1 to 7 days), both splitting tensile and compressive strengths improved for all specimens. After 7 days of carbonation, splitting tensile strength increased by 45%, 48%, and 60% for 0%SS, 50%SS, and 100%SS, respectively. Compressive strength increased by 24%,

30%, and 27% for the same groups, respectively. The presence of CO_2 likely caused decalcification of Ca-bearing phases, leading to the formation of carbonates and amorphous Si gel, which enhances polymer chain formation.

3.3.2 Abrasion resistance (Böhme test)

Figure 4 shows the abrasion resistance results of the carbonated and non-carbonated blocks. For the 0%SS specimens, the mass loss without carbonation was approximately 13.0%, which decreased to about 5.98% after 7 days of CO_2 exposure. The specimens with 100%SS exhibited the lowest mass loss of around 12.57% without carbonation and about 5.82% after 7 days of carbonation. Interestingly, the 50%SS specimens showed a greater mass loss than the 0%SS specimens, which was unexpected. These results indicate that carbonation positively impacts mass loss due to abrasion, reducing it and enhancing the cohesion between aggregates.

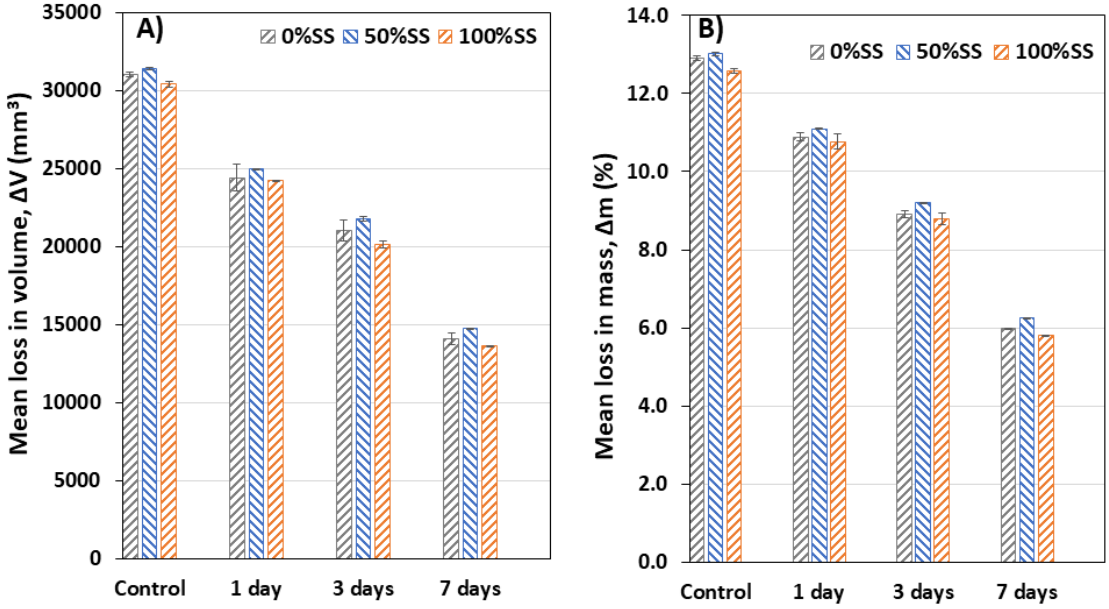


Figure 4 - Abrasion resistance results of carbonated and non-carbonated blocks showing A) the mean loss in mass after 16 cycles and B) the mean loss in specimen volume ΔV.

3.4 WATER PERMEABILITY

Figure 5 shows the water permeability results for all blocks. At 7 days of CO_2 curing, the lowest permeability (longest infiltration time) was achieved. This phenomenon may be attributed to the formation of silica tetrahedra and sodium carbonate (Na_2CO_3), which is a primary carbonation product in alkaline-activated precursors with low calcium content. The formation of both can fill smaller adjacent voids, and reduce pore interconnectivity, resulting in increased densification and thus lower infiltration rates.

4 CONCLUSIONS

This study evaluated the properties of full-scale alkali-activated pervious paving blocks exposed to accelerated carbonation for different durations. This approach offered insights into the practical applications and genuine functional potential of the novel alkali-activated materials used in an industrial context. The blocks were manufactured using an optimised mixture of fly ash and coal mining tailing as precursors. The reference blocks were made of calcareous natural aggregates. A replacement

of 50% and 100% of the natural sand by sand from shells of *Acanthocardia tuberculata* specie was studied.

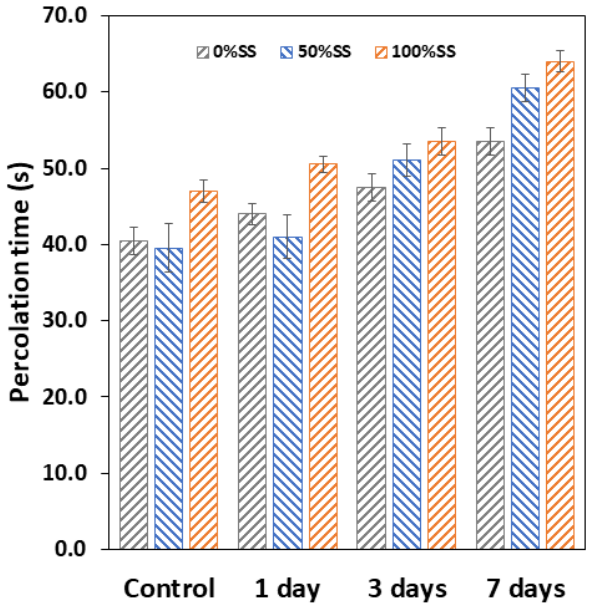


Figure 5 - Water permeability results of blocks with varying aggregates substitution ratio and curing conditions.

The results obtained showed an increase in compressive and splitting tensile strengths with prolonged exposure to accelerated carbonation curing. After 7 days of carbonation, the splitting tensile strength increased by 45% for the reference mix (natural sand only), 48% for the mix with 50% seashells as sand replacement, and 60% for the mix with 100% seashells fully replacing sand. Similarly, the compressive strength increased by 24% for the reference mix, 30% for the mix with 50% seashells, and 27% for the mix with 100% seashells. The increase in strength can primarily be attributed to the use of accelerated carbonation. The role of seashells in this process requires further detailed study, particularly in terms of their size and shape, to better understand the atypical increase in these strengths.

Accelerated carbonation also reduced the materials' water permeability, likely due to the formation of sodium carbonates and silica tetrahedra within the structure. Overall, coal mining tailings still require refinement before they can be effectively used as binders in the production of alkali-activated concrete. However, when mixed with fly ash, this precursor demonstrates satisfactory performance for use in precast non-structural pervious blocks. These materials are still in the early stages of research and show significant potential for optimisation and enhancement of properties.

REFERENCES

ASTM-C618; Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015; p. 5

Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. In *Construction and Building Materials* (Vol. 270). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857

Bellei, P., Torres, I., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2023). Potential use of oyster shell waste in the composition of construction composites: A review. Buildings, 13(6), 1546. https://doi.org/10.3390/buildings13061546

CEM (2004) EN 1338. Concrete paving blocks - Requirements and test methods. CEM, Brussels, Belgium

Cadierno, J. F., Romero, M. I. G., Valdés, A. J., del Pozo, J. M. M., González, J. G., Robles, D. R., & Espinosa, J. V. (2014). Characterization of Colliery spoils in León: Potential uses in rural infrastructures. Geotechnical and Geological Engineering, 32(2), 439–452. https://doi.org/10.1007/s10706-013-9725-4

Cao, R., Zhang, S., Banthia, N., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2020). Interpreting the early-age reaction process of alkali-activated slag by using combined embedded ultrasonic measurement, thermal analysis, XRD, FTIR and SEM. Composites Part B: Engineering, 186. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107840

Gijbels, K., Krivenko, P., Kovalchuk, O., Pasko, A., Schreurs, S., Pontikes, Y., & Schroeyers, W. (2020). The influence of porosity on radon emanation in alkali-activated mortars containing high volume bauxite residue. Construction and Building Materials, 230. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116982

Eziefula, U. G., Ezeh, J. C., & Eziefula, B. I. (2018). Properties of seashell aggregate concrete: A review. Construction and Building Materials, 192, 287–300. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096

Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. Cement and Concrete Research, 35(10), 1984–1992. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.03.003

IEA. Cement Roadmap. Available online: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement_Roadmap_ Foldout_WEB.pdf (accessed on 24 April 2024).

Lamaa, G., Duarte, A. P. C., Silva, R. V., & de Brito, J. (2023). Carbonation of alkali-activated materials: A review. Materials 2023, Vol. 16, Page 3086, 16(8), 3086. https://doi.org/10.3390/MA16083086

Lamaa, G., Kassim, D., Silva, B. A., Duarte, A. P. C., Brito, J. de, & Silva, R. V. (2024). Utilization of aluminosilicate industrial wastes as precursors in CO2-cured alkali-activated precast concrete pavement blocks. Construction Materials, 4(2), 353–381. https://doi.org/10.3390/constrmater4020020

Martínez-García, C., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., & López, D. C.-. (2017). Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. Construction and Building Materials. 139, 570–583. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091

Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L., & Baraud, F. (2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. Construction and Building Materials, 49, 151–160. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017

Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, 114, 40-48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009

Suescum-Morales, D., Romero-Esquinas, Á., Fernández-Ledesma, E., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019). Feasible use of colliery spoils as subbase layer for low-traffic roads. Construction and Building Materials, 229. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116910

Yoon, G. L., Kim, B. T., Kim, B. O., & Han, S. H. (2003). Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell. Waste management, 23(9), 825-834. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00159-9

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DE ÁGUA E AREIA DO MAR NA PRODUÇÃO DE BETÃO

Eduarda Nepomuceno[a]; José Silvestre[b]; José Sena-Cruz[a]; Lúcio Lourenço[c]

[a]Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, id8933@alunos.uminho.pt, jsena@civil.uminho.pt

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

[c]CiviTest, Rua da Indústria, n. 144, 4770-160 Jesufrei, VN Famalicão, Portugal, luciolourenco@civitest.com

RESUMO

A água é um recurso natural indispensável para a sobrevivência da humanidade e tem um papel crucial em diversas áreas de atuação. Contudo, a disponibilidade de água potável encontra-se cada vez mais ameaçada devido a diversos fatores como sejam as alterações climáticas, a poluição e/ou o crescimento populacional. Ao mesmo tempo, a produção de betão requer enormes quantidades de água potável, o que tem contribuído para o aumento da escassez deste recurso vital. Neste contexto, este estudo investiga a viabilidade de utilização de água e areia do mar diretamente na produção de betão, em duas perspetivas. Numa primeira, foi experimentalmente analisada a possibilidade do uso de água do mar como água da amassadura do betão, avaliando-se essa possibilidade por meio da caracterização das principais propriedades mecânicas do betão. Numa segunda, considerou-se, adicionalmente ao uso de água do mar, a possibilidade de utilização de areia do mar na composição do próprio betão. Foi realizada uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), do berço ao portão, a fim de comparar os impactes ambientais entre o betão convencional (com água potável) e os betões com as substituições propostas. Os resultados indicam que o uso de água do mar pode reduzir as resistências do betão, em comparação com o betão convencional, mas, por outro lado, é possível reduzir em até 58% a pegada hídrica do betão quando água e areia do mar são utilizadas.

Palavras-chave: Água do mar, alterações climáticas, avaliação do ciclo de vida (ACV), betão, impacte ambiental, pegada hídrica

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de extrema importância para a sobrevivência da humanidade e desempenha um papel crucial em diversas esferas de atuação. Contudo, a disponibilidade de água potável encontra-se cada vez mais ameaçada devido a diversos fatores como sejam as alterações climáticas, a poluição e/ou o crescimento populacional. Adicionalmente, nos últimos 40 anos o consumo anual de água cresceu cerca de 1% ao ano, e é estimado que a demanda por água continue a crescer nesta taxa, o que resultaria num aumento entre 20% e 30% até 2050 (United Nations, 2023). Este conjunto de fatores tem impacto significativo na quantidade e distribuição de água em diferentes regiões, resultando em escassez hídrica, secas prolongadas e outros fenómenos naturais adversos.

O setor industrial é responsável pelo consumo de cerca de 17% da captação total de água (United Nations, 2023), e o setor da construção está entre os que mais consomem, nomeadamente na produção de betão. Uma central de betão que produz cerca de 500 m³ por dia utiliza em média 10 mil litros de água diariamente, apenas para o processo de mistura do betão (Mack *et al.*, 2016), entretanto o consumo de água para a fabrico de betão vai além do processo de mistura; a extração de matérias-primas, como os agregados, a fabricação de cimento, a energia utilizada, entre outras etapas envolvidas, demandam quantidades de água mais expressivas. Além deste alto consumo, é projetado que, em 2050, 75% da demanda de água para fabrico de betão ocorrerá provavelmente em regiões de escassez hídrica (Miller *et al.*, 2018).

Em face do exposto, é cada vez mais necessário, por um lado, adotar medidas que visem reduzir o consumo excessivo de água potável e, por outro, promover a utilização sustentável dos recursos naturais disponíveis. Uma das possibilidades assumidas pela comunidade científica passa pela utilização de água do mar diretamente na composição de betão (Kaushik & Islam, 1995; Wegian, 2010; Younis *et al*., 2018). Relativamente às propriedades mecânicas do betão com água do mar (BAM), os autores apontam que nas idades iniciais, até os 7 dias, o ganho de resistência do BAM é mais rápido que do betão com água potável (BAP). Entretanto, entre os 14 e os 28 dias, a resistência do BAP supera a do BAM, apresentando resistências superiores. Diversas causas são apontadas para estas diferenças. Kaushik e Islam (1995) apontam como causa do ganho inicial de resistência do BAM o bloqueio dos poros por produtos de hidratação. Já as razões citadas para o melhor desempenho mecânico do BAP em relação ao BAM passam pelo efeito que a água do mar pode gerar no betão como a lixiviação (Kaushik & Islam, 1995) e a cristalização de sais (Wegian, 2010), além das características químicas da água do mar e do cimento, e do tipo de cura do betão (Younis *et al*., 2018). Apesar disso, alguns estudos apontam que no longo prazo, as resistências do BAP e do BAM tentem a se igualar (Li *et al*., 2021; Younis *et al*., 2018).

Entretanto, é necessário ir além do comportamento mecânico do material para que o mesmo possa ser empregado em larga escala. Neste contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta capaz de identificar impactes ambientais potenciais associados a um produto durante o seu ciclo de vida, desde a obtenção de matéria-prima, a produção, uso, manutenção e destino final. De acordo com a ISO 14040 (2006), um estudo de ACV é composto por quatro fases: (i) definição de objetivo e âmbito, (ii) análise de inventário, (iii) avaliação de impactes, e (iv) interpretação. Na fase de definição de objetivo e escopo são especificados a aplicação pretendida, o sistema de produto, a unidade declarada ou funcional, a fronteira do sistema e as limitações do estudo. De acordo com a EN 15804 (2019), a etapa de produto (A1 – A3) inclui, obrigatoriamente, a extração e tratamento de matérias-primas (A1), o transporte para o fabricante (A2), e a produção (A3). A fase de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a reunião dos dados de entrada/saída relevantes para alcançar os objetivos do estudo. A Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV) fornece informações adicionais

para avaliar os resultados do ICV, associando estes resultados a categorias de impactes, além de fornecer informações para a fase de interpretação. Na fase de interpretação, os resultados das fases anteriores são sintetizados e discutidos de maneira que possibilite conclusões, recomendações e tomada de decisão sobre o produto em análise.

Com intuito de determinar a pegada hídrica, Arosio, Arrigoni, e Dotelli (2019) investigaram o impacte do uso de água do mar e agregados marinhos na produção de betão em diferentes regiões da Itália. Os resultados obtidos indicam que a produção de agregados é o fator determinante no consumo de água, enquanto a água da amassadura corresponde apenas a uma percentagem da água consumida ao longo da cadeia de produção do betão. De acordo com os autores, para a produção de 1 m³ de betão, a substituição da água potável por água do mar pode reduzir a pegada hídrica em cerca de 12%, enquanto quando, além da água, há também a substituição dos agregados tradicionais por agregados marinhos essa redução pode chegar a 84%. Uma ACV desenvolvida por Yang *et al*. (2022) comparou os impactes ambientais de betão concebido com água do mar e areia do mar (SWSS-SCC – '*Seawater Sea-Sand Self-Compacting Concrete*' da literatura inglesa) com betão com água potável (SCC – '*Self-Compacting Concrete*' da literatura inglesa). O estudo revelou reduções de CO_2 equivalente entre 7% e 14% para a composição de betão SWSS-SCC comparado ao SCC. Além disso, a análise de sensibilidade realizada pelos autores indicou que quando a energia usada para produção do betão provém de uma fonte renovável como solar, eólica ou hidroelétrica, o consumo de energia pode reduzir até 30% na produção do betão com água e areia do mar.

Apesar disso, a água potável é usada em composições de betão para evitar a corrosão das armaduras em aço, e consequentemente a degradação da estrutura. Entretanto, com o avanço em estudos sobre o uso de reforços resistentes à corrosão, como os polímeros reforçados com fibras (FRP – '*Fiber Reinforced Polymer'* da literatura inglesa), por exemplo por (Kazemi *et al*., 2022; Khatibmasjedi *et al*., 2020; Soares *et al*., 2020; Xiong *et al*., 2021)), o uso de água do mar para produção de betão passa a ser uma possibilidade. Dong, Li, e Xian (2021) realizaram uma ACV para comparar os impactes ambientais de betão produzido com água e areia do mar reforçado com FRP (SWSSC) e de betão convencional com reforço em aço (SRC) em ambiente marinho. Os autores concluíram que, comparado ao betão convencional (SRC), o betão com uso de material marinho e reforço em FRP (SWSSC) apresentou reduções de 26,3% a 48,6% em oito categorias de impactes analisadas. Segundo os autores, a vida útil mais longa das estruturas reforçadas com FRP foi um dos fatores que contribuiu para as reduções do respetivo impacte ambiental.

O presente estudo é dividido em duas fases: (i) avaliação dos efeitos da substituição da água potável por água do mar na amassadura do betão, avaliando-se esses efeitos recorrendo a ensaios experimentais de caracterização mecânica, e (ii) realização de uma ACV para comparar os possíveis impactes ambientais de três composições distintas de betão.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

Na primeira fase deste trabalho foram consideradas, somente, duas composições de betão: (i) betão com água potável (BAP) e (ii) betão com água do mar (BAM). A única diferença entre ambas as composições é o tipo de água utilizada na amassadura. As quantidades incluídas em cada composição estão apresentadas no Quadro 1. A água do mar usada foi coletada diretamente do mar, mais especificamente na Póvoa de Varzim (região norte de Portugal). A salinidade do mar nesta região, isto é, a concentração de sal por unidade de massa de água é de cerca de 3,5% (Zweng *et al*., 2019).

Quadro 1 – Composição do betão por m³

Matéria-Prima	BAP	BAM	BAM-A
Cimento Portland CEM I 42.5 R	350 kg	350 kg	350 kg
Fíler	80 kg	80 kg	80 kg
Brita 5/15	812 kg	812 kg	812 kg
Areia	980 kg	980 kg	-
Areia do Mar	-	-	980 kg
Água Potável	130 l	-	-
Água do Mar	-	130 l	130 l
Superplastificante	1,4 l	1,4 l	1,4 l

2.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Para caracterizar as propriedades mecânicas das composições de betão atrás referidas, foram fabricados provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Antes de serem ensaiados, os provetes passaram por cura ao ar por 28 dias. Após este período, foram avaliados o módulo de elasticidade (E_{cm}), a resistência à compressão (f_{cm}) e a resistência à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) de acordo com as recomendações das normas EN 12390-13 (2013), RILEM TC 148-SSC (van Mier *et al*., 1997) e EN 12390-6 (2009), respetivamente. Foram ensaiados 7 provetes de cada composição: 4 para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão e 3 para determinar a resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 1 apresenta-se a configuração de ensaio utilizada para cada tipo de caracterização.

(a) Módulo de elasticidade

(b) Resistência à compressão

(c) Resistência à tração por compressão diametral

Figura 1 – Configurações de ensaio utilizadas para determinação das propriedades mecânicas do betão

3 AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL

Nesta fase do estudo, considerou-se uma terceira composição de betão (teórica), para além das já mencionadas anteriormente. Esta nova composição envolve a substituição da água potável por água do mar e da areia comum por areia marinha (BAM-A). As quantidades utilizadas foram mantidas iguais para as três composições, como apresentado no Quadro 1.

Para determinar o impacte ambiental da produção de betão, utilizou-se a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), reconhecida como uma ferramenta amplamente utilizada na avaliação dos impactes ambientais de produtos. Essa abordagem possibilita uma avaliação abrangente da produção de betão, desde a extração de matérias-primas até a sua produção final. Para realizar esta análise, empregou-se o software SimaPro e a base de dados Ecoinvent, permitindo assim uma análise completa que considerou diferentes categorias de impactes.

O objetivo deste estudo foi, assim, analisar e comparar os impactes ambientais da produção de betão convencional com duas alternativas, visando verificar se as substituições propostas têm efeitos positivos nos aspetos ambientais, principalmente no que diz respeito à pegada hídrica, como uso de água potável, mudanças climáticas, e poluentes aquáticos potenciais. Para isso, foram comparadas as três composições de betão: (i) betão com água potável (BAP), (ii) betão com água do mar (BAM) e (iii) betão com água e areia do mar (BAM-A).

A unidade declarada adotada neste estudo foi a produção de 1 m³ de betão, conforme as quantidades previamente apresentadas (ver Quadro 1). A fronteira do sistema incluiu todas as fases do produto (A1 – A3), desde a extração de matéria-prima até a produção do betão no local. A fim de otimizar as substituições propostas, a produção de betão foi localizada em regiões costeiras, eliminando assim a necessidade de transporte de água e areia do mar por longas distâncias.

Os dados necessários para o cálculo dos processos de produção foram obtidos recorrendo à base de dados Ecoinvent, abrangendo todas as entradas e saídas de materiais, energia e substâncias associadas à produção de 1 m³ de betão, desde a extração de matérias-primas até sua produção no local. Por meio do método EN 15804 +A2 disponível no SimaPro, foram avaliadas quatro categorias de impacte ambiental:

- Uso de água potável – avaliação do potencial de privação de água (WDP), indicando a quantidade relativa de água utilizada, baseada em fatores regionalizados de escassez hídrica [m³ world eq. deprived];
- Mudança climática – indicador de potencial de aquecimento global (GWP) devido às emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera [kg CO_2 eq.];
- Eutrofização aquática (água potável) – avaliação do potencial de eutrofização de água potável (EP-FW), considerando o enriquecimento de nutrientes em compartimentos de água doce, que pode levar a alterações e deterioração da qualidade da água [kg PO_4 eq.]; e
- Acidificação – indicação do potencial de acidificação (AP) de solos e águas devido à liberação de gases [mol H^+ eq.].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados obtidos nas duas fases do estudo são apresentados e discutidos separadamente.

4.1 FASE I: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO

O Quadro 2 apresenta os valores médios e os respetivos coeficientes de variação (CoV) dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica, obtidos aos 28 dias, para o BAP e BAM. Os resultados são, também, apresentados graficamente, na Figura 2, em termos de comparação percentual de cada propriedade entre o betão com água do mar (BAM) e o betão com água potável (BAP). A partir da avaliação dos resultados é possível observar que o BAP apresentou valores superiores aos obtidos pelo BAM, principalmente na resistência à tração por compressão diametral, onde o resultado do BAM é cerca de 34% menor que o BAP. As diferenças no módulo de elasticidade e resistência à compressão são menores, respetivamente 7% e 15% quando a água do mar foi usada ao invés de água potável (Figura 2). Os resultados obtidos são similares a estudos anteriores disponíveis na bibliografia (Kaushik & Islam, 1995; Wegian, 2010; Younis *et al*., 2018), onde aos 28 dias o BAP obteve uma resistência superior ao BAM. As principais causas, apontadas pelos autores, para estas diferenças são referentes às interferências que a água do mar pode causar no betão, como a lixiviação, a cristalização de sais, e, também, a característica química da água do mar e do cimento, além das diferentes condições de cura do betão.

Quadro 2 – Valores médios das propriedades do betão

Tipo de betão	E_{cm} [GPa] (CoV)	f_{cm} [MPa] (CoV)	$f_{ctm,sp}$ [MPa] (CoV)
BAP	25,4 (5%)	33,7 (7%)	3,1 (6%)
BAM	23,6 (4%)	28,6 (1%)	2,0 (14%)

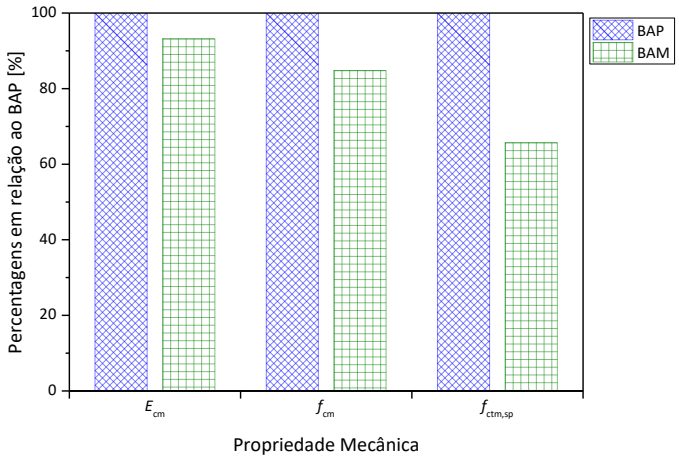


Figura 2 – Resultados relativos ao comportamento mecânicos do BAM em relação ao BAP.

4.2 FASE II: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A análise detalhada da utilização de água na produção de 1 m³ de diferentes composições de betão permite constatar informações relevantes sobre as contribuições relativas dos diferentes materiais que compõem o betão para o impacte ambiental. A Figura 3 apresenta os dados da utilização de água por material para cada composição de betão. Os resultados revelam que a areia e o cimento são os materiais que mais contribuem significativa necessidade de utilização de água na produção de betão, representando cerca de 52% e 24% do total, respetivamente. A água da amassadura representa, em m³ equivalente, cerca de 8% da demanda total de água. Este resultado destaca a importância desta etapa no consumo de água potável.

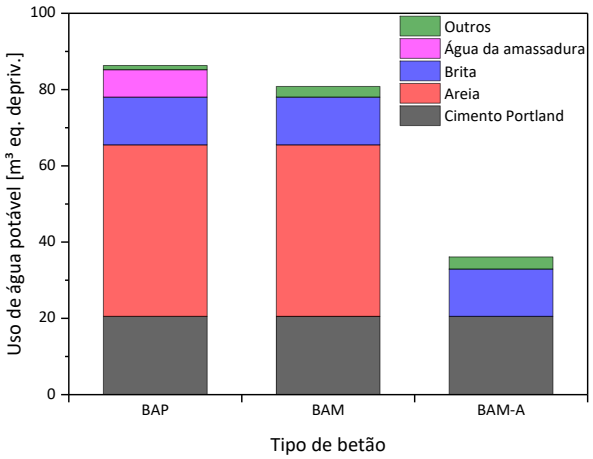


Figura 3 – Potencial de privação de água potável.

A substituição da água potável por água do mar contribuiu para uma redução de cerca de 6,5% na pegada hídrica do betão (BAM em relação a BAP). No entanto, é ainda significativa a necessidade de água potável para a produção de betão, uma vez que os demais componentes representam parcelas significativas do uso de água total. Por outro lado, a eliminação completa no uso de água potável na amassadura de betão e a substituição da areia comum por areia marinha teve como consequência a redução de aproximadamente 58% na pegada hídrica do BAM-A em relação ao BAP. A redução de utilização de água obtidas neste estudo são similares aos obtidos em estudos anteriores, como no caso apresentado por Arosio *et al*. (2019), onde a substituição da água potável por água do mar resultou em reduções entre 2% e 12% na pegada hídrica e, quando o uso de agregados marinhos foi considerado, as reduções variaram entre 36% e 84%.

A Figura 4 mostra as percentagens, em relação ao BAP, da contribuição do impacte ambiental em cada uma das categorias analisadas para as diferentes composições de betão estudadas. A avaliação dos resultados obtidos permite concluir pela redução do potencial de privação de água (WDP) nos betões que não utilizam água potável na sua composição, principalmente na composição BAM-A. Contudo, as diferenças entre as composições são menos acentuadas nas demais categorias de impacte consideradas.

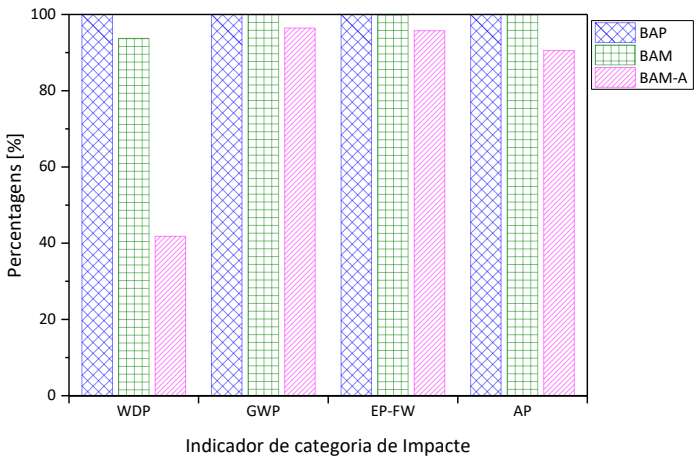


Figura 4 – Comparação entre os impactes ambientais por tipo de betão.

Os resultados obtidos na análise de impacte ambiental, calculados para a produção de 1 m³ de cada tipo de betão, são apresentados no Quadro 3. Observa-se que, ao considerar o betão com substituição de água potável por água do mar (BAM) ao invés do betão de água potável (BAP), não há mudanças nas categorias de mudança climática, eutrofização aquática e acidificação. Contudo, a substituição adicional da areia comum por areia marinha (BAM-A), conduziu a reduções de 4% para a mudança climática, de 4% para a eutrofização aquática e de 9% para a acidificação, em relação ao BAP. No que diz respeito ao uso de água, o BAM apresenta uma redução de aproximadamente 6,5%, enquanto o betão BAM-A mostra uma redução significativamente maior, em torno de 58%, como mencionado anteriormente.

Quadro 3 – Impacto ambiental para produção de 1 m³ de betão.

Categoria de impacte	Unidade	BAP	BAM	BAM-A
Uso de água	m³ world eq. depriv.	86,28	80,84	36,07
Mudança climática	kg CO_2 eq.	349,45	349,42	336,94
Eutrofização aquática	kg PO_4 eq.	0,042	0,042	0,040
Acidificação	mol H^+ eq.	0,916	0,916	0,829

Além dos resultados obtidos, é crucial considerar que em regiões onde a água potável é um recurso escasso, a substituição dessa água por fontes alternativas, como a água do mar, pode acarretar um impacte significativo. Nessas regiões, a água dessalinizada é frequentemente empregada na produção de betão. Embora essa prática reduza a pegada hídrica, é um processo intensivo em energia que resulta na emissão de gases de efeito estufa (Arrigoni *et al*., 2022). Ressalva-se, contudo, que, para que a utilização da água do mar seja mais vantajosa em termos de pegada hídrica e pegada de carbono, as centrais de betonagem devem estar a uma distância limite do ponto de captação da água do mar.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

No presente estudo, investigou-se a possibilidade de utilização de fontes alternativas para a produção de betão, nomeadamente a água e a areia do mar. O estudo foi divido em duas fases: inicialmente foram investigadas as propriedades mecânicas de duas composições de betão, produzido com água potável (BAP) e com água do mar (BAM). Posteriormente, foram investigados os impactes ambientais dos betões anteriormente caracterizados e de uma terceira composição de betão que considerou, além do uso de água do mar, o uso de areia do mar em substituição à areia comum. Com base no estudo realizado, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O uso de água do mar no fabrico de betão conduziu em valores de resistências mecânicas menores. O BAM apresentou resistência à compressão e à tração por compressão diametral cerca de 15% e 34% inferiores, em comparação com o BAP. Os resultados de módulo de elasticidade foram similares;
- A demanda de água para a produção de betão é resultado principalmente da produção de agregados, responsável por 66% do consumo de água total (52% areia e 14% brita), e do cimento (24% do consumo total). A água utilizada no processo de amassadura do betão representa cerca de 8% da necessidade total de água para produção do betão;

- A substituição de água potável por água do mar na composição de betão apresentou redução da pegada hídrica de 6,5%, enquanto a substituição adicional de areia comum por areia marinha resultou em redução de 58% na pegada hídrica;
- O uso de água e areia do mar para produção de betão (BAM-A) apresentou reduções entre 4% e 9% nas demais categorias de impacte ambientais avaliadas, nomeadamente mudança climática, eutrofização aquática e acidificação, em relação ao betão de água potável (BAP).

Os resultados indicam que a substituição da água potável por água do mar para a produção de betão pode levar à redução da sua resistência, embora esta substituição tenha consequências positivas na correspondente pegada hídrica do material, mostrando potencial para reduzir o impacte ambiental associado à produção de betão.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A investigação apresentada avaliou o efeito do uso de água do mar diretamente na composição de betão, com análise das propriedades mecânicas e dos impactes ambientais. Embora os resultados obtidos com a realização do presente trabalho tragam uma perspetiva positiva, a análise foi limitada ao âmbito do produto, isto é, até à produção de betão. Para uma visão mais abrangente, sugere-se explorar:

- Avaliação da durabilidade das propriedades mecânicas do betão produzido com água do mar e do betão produzido com água e areia do mar em comparação com o betão com água potável;
- A avaliação mecânica de estruturas de betão com água do mar (BAM) com reforço em barras de FRP. Adicionalmente, estudo de ACV considerando toda a vida útil da estrutura (do berço ao túmulo), comparada a estruturas convencionais de betão reforçado com aço;
- A avaliação de diferentes cenários sobre a distância limite do ponto de coleta de água e areia do mar até ao ponto de produção de betão para que o BAM-A seja favorável em termos ambientais ao BAP;
- A comparação dos impactes ambientais entre os três tipos de betão (BAP, BAM, BAM-A) para a mesma classe de resistência à compressão aos 28 dias, mantendo-se a unidade funcional baseada na resistência.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e sob o Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) sob a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), no âmbito da bolsa de doutoramento DFA/BD/6484/2020 (doi.org/10.54499/2020.06484.BD) atribuído à 1ª autora. O 2º autor agradece o apoio da FCT através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Arosio, V., Arrigoni, A., & Dotelli, G. (2019). Reducing water footprint of building sector: concrete with seawater and marine aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *323*(1), 012127. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012127

Arrigoni, A., Opher, T., Spatari, S., Arosio, V., MacLean, H. L., Panesar, D. K., & Dotelli, G. (2022). Environmental impacts of using desalinated water in concrete production in areas affected by freshwater scarcity. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, *33*, 27–31. https://doi.org/10.14311/APP.2022.33.0027

CEN. (2009). Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, EN 12390-6:2009. *Comité Européen De Normalisation*.

CEN. (2013). Testing hardened concrete. Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, EN 12390-13:2013. *Comité Européen De Normalisation*.

CEN. (2019). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, EN 15804:2012+A2. *Comité Européen De Normalisation*.

Dong, S., Li, C., & Xian, G. (2021). Environmental Impacts of Glass- and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bar-Reinforced Seawater and Sea Sand Concrete Beams Used in Marine Environments: An LCA Case Study. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 154*, *13*(1), 154. https://doi.org/10.3390/POLYM13010154

ISO. (2006). Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and framework, ISO 14040:2006(E). *International Organization for Standardization*.

Kaushik, S. K., & Islam, S. (1995). Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, *17*(3), 177–185. https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00015-5

Kazemi, H., Yekrangnia, M., Shakiba, M., Bazli, M., & Vatani Oskouei, A. (2022). Bond-slip behaviour between GFRP/steel bars and seawater concrete after exposure to environmental conditions. *Engineering Structures*, *268*, 114796. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114796

Khatibmasjedi, M., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Nanni, A. (2020). Durability of Commercially Available GFRP Reinforcement in Seawater-Mixed Concrete under Accelerated Aging Conditions. *Journal of Composites for Construction*, *24*(4), 04020026. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001035

Li, P., Li, W., Sun, Z., Shen, L., & Sheng, D. (2021). Development of sustainable concrete incorporating seawater: A critical review on cement hydration, microstructure and mechanical strength. *Cement and Concrete Composites*, *121*, 104100. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104100

Mack, Y. L., Oliveira, L. S., & John, V. M. (2016). Concrete Water Footprint Assessment Methodologies. *Key Engineering Materials*, *668*, 247–254. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.668.247

Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability 2018 1:1*, *1*(1), 69–76. https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5

Soares, S., Freitas, N., Pereira, E., Nepomuceno, E., Pereira, E., & Sena-Cruz, J. (2020). Assessment of GFRP bond behaviour for the design of sustainable reinforced seawater concrete structures. *Construction and Building Materials*, *231*, 117277. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117277

United Nations. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water*.

van Mier, J., Shah, S. P., Arnaud, M., Balayssac, J., Bascoul, A., Choi, S., Dasenbrock, D., Ferrara, G., French, C., Gobbi, M., Karihaloo, B., König, G., Labuz, J., Lange-Kornbak, D., Markeset, G., Pavlovic, M., Simsch, G., Thienel, K., Turatsinze, A., … Zissopoulos, D. (1997). RILEM TC 148-SSC: Test methods for the strain-softening response of concrete: Strain-softening of concrete in uniaxial compression. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, *30*, 195–209.

Wegian, F. M. (2010). Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, *3*(4), 235–243. https://doi.org/10.1080/19373260.2010.521048

Xiong, Z., Zeng, Y., Li, L. G., Kwan, A. K. H., & He, S. H. (2021). Experimental study on the effects of glass fibres and expansive agent on the bond behaviour of glass/basalt FRP bars in seawater sea-sand concrete. *Construction and Building Materials*, *274*, 122100. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122100

Yang, B. X., Xie, T. Y., Yu, Y., Zheng, Y., & Xu, J. J. (2022). Mechanical properties and environmental performance of seawater sea-sand self-compacting Concrete. *Advances in Structural Engineering*, *25*(15), 3114–3136. https://doi.org/10.1177/13694332221119863/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_13694332221119863-FIG11.JPEG

Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P., & Nanni, A. (2018). Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. *Construction and Building Materials*, *190*, 276–286. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.126

Zweng, M. M., Reagan, J. R., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). *World Ocean Atlas 2018, Volume 2: Salinity* (A. Mishonov, Ed.). NOAA Atlas NESDIS 82. http://www.nodc.noaa.gov/

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DA BIOMASSA DA ACÁCIA MANGIUM AO CONCRETO

Lucas Villeneuve Beschorner de Castro[a]; Aretuza Karla Araújo da Rocha[b]; Kelly Christina Ramos de Oliveira[c]; Gustavo Bruski de Vasconcelos[d]

[a]Universidade Federal de Roraima – UFRR, Campos Paricarana, bloco V, Av. Capitão Ene Garcez, 2413, Aeroporto, Boa Vista, Roraima, Brasil, englucasbeschorner@gmail.com

[b]Universidade Federal de Roraima – UFRR, Campos Paricarana, bloco V, Av. Capitão Ene Garcez, 2413, Aeroporto, Boa Vista, Roraima, Brasil, aretuza.karla@ufrr.br

[c]Universidade Federal de Roraima – UFRR, Campos Paricarana, bloco V, Av. Capitão Ene Garcez, 2413, Aeroporto, Boa Vista, Roraima, Brasil, kelly.oliveira@ufrr.br

[d]Instituto Federal da Bahia – IFBA, Campos Euclides da Cunha, Av. Renato Campos, nº 900, Nossa Srª da Conceição, BR 116, Km-220, Euclides da Cunha, Bahia, Brasil, gustavobruski@ifba.edu.br

RESUMO

A busca por construções sustentáveis na indústria da construção civil tem levado ao aproveitamento de resíduos agroindustriais como uma alternativa de baixo custo e de qualidade para melhorar o processo construtivo. Um desses resíduos é proveniente da queima da biomassa da acácia mangium em termoelétricas, gerando cinza volante e escória, utilizados para melhorar propriedades e reduzir o uso de cimento Portland no concreto armado. Este estudo analisa o desempenho da adição desses resíduos ao concreto em diferentes proporções (5% e 10%), comparando com um traço de referência apenas com cimento Portland. As propriedades mecânicas do concreto foram avaliadas aos 7, 28 e 60 dias, utilizando ensaios padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), incluindo compressão e compressão diametral. Os resultados mostraram que é viável produzir concreto com adição do resíduo da acácia mangium, embora as adições tenham impactado a trabalhabilidade devido à absorção de água, podendo comprometer a resistência à tração e compressão. Notavelmente, aos 60 dias, os corpos de prova apresentaram resistência maior do que aos 28 dias, sugerindo um comportamento cimentício tardio dos resíduos. Além disso, a adição de 5% de cinza volante e escória demonstrou valores superiores de resistência à tração em comparação com a adição de 10%. Estes resultados destacam o potencial dos resíduos da biomassa de acácia mangium na indústria da construção civil, enfatizando a necessidade de pesquisa contínua para práticas mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: Concreto, Biomassa da acácia mangium, Resíduos agroindustriais, Sustentabilidade ambiental.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a sustentabilidade tem se intensificado globalmente, impulsionando mudanças em diversas indústrias para mitigar impactos ambientais adversos. Na construção civil, um dos setores mais críticos em termos de emissões de dióxido de carbono (CO_2) é o uso de cimento Portland, uma problemática devido à sua contribuição significativa para a emissão de gases de efeito estufa. Este contexto estabelece a necessidade urgente de explorar materiais alternativos que possam reduzir a quantidade de dióxido de carbono associada à produção de concreto.

Pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de compósitos cimentícios que diminuam o uso de cimento Portland através da substituição e adição de resíduos agroindustriais. Esta abordagem não apenas promove a eficiência dos materiais, mas também contribui para a economia ao aproveitar subprodutos que, de outra forma, seriam descartados. Em paralelo, a adoção de fontes de energia renováveis surge como uma alternativa viável para substituir fontes convencionais de energia altamente poluentes, como as usinas movidas a combustíveis fósseis.

Na região do extremo Norte do Brasil, o estado de Roraima tem se destacado pelo uso inovador da biomassa de acácia mangium em suas usinas termelétricas. Esta espécie, além de possuir alto poder calorífico, facilita a reflorestação de áreas degradadas, proporcionando uma solução energética sustentável para a região. A queima da acácia mangium em usinas termelétricas gera cinzas volantes e escória, resíduos que têm potencial para serem reincorporados no concreto, reduzindo a quantidade de cimento Portland e melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade deste material.

O uso de acácia mangium para geração de calor em usinas termoelétricas em Roraima é interessante por diversos motivos, além do seu poder calorífico significativo de 4.619 kcal/kg. O aproveitamento dos resíduos gerados, como as pozolanas artificiais, mostra uma abordagem sustentável, aproveitando materiais que de outra forma seriam descartados. Essas pozolanas, derivadas das cinzas volantes e escórias granulares da caldeira e filtro do exaustor, apresentam propriedades cimentícias, o que as torna úteis em processos de beneficiamento de matéria-prima, contribuindo para a redução de resíduos e o uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

De acordo com Ramezanianpour e Jovein (2012), para ter uma redução no consumo de energia e na emissão de CO_2, na produção do cimento estão sendo usadas misturas compostas com alguns materiais cimentantes suplementares como o metacaulim, a sílica ativa, pozolana natural, cinzas e pedra calcária, entre outros.

Dossche et al. (2016) exploraram diferentes alternativas ao cimento que podem ser empregadas na composição do concreto, tais como cinzas volantes, escórias, fíler calcário, entre outras. Essas substituições representam uma abordagem inovadora e sustentável para a produção de concreto, destacando-se pelo potencial de redução de impactos ambientais e de custos.

Pesquisas anteriores corroboram essa visão, demonstrando que o uso de cinzas volantes como substituto parcial ao cimento, em proporções de até 40%, conduziu a um significativo aumento na resistência à compressão, quando comparado ao traço de referência, traço sem adição (Madandoust e Mousavi, 2012; Chopra *et al*. 2015). Esses estudos evidenciam não apenas a viabilidade técnica, mas também os benefícios econômicos e ambientais associados à incorporação de cinzas volantes e escória na produção de concreto.

Uysal e Yilmaz (2011) citaram que as adições minerais podem melhorar o empacotamento das partículas, como também reduzir a permeabilidade, tornando o uso de adições ao concreto bastante receptivo e aumentando a durabilidade.

Segundo Le *et al*. (2015), diferentes adições minerais tem em seus resultados vantagens e desvantagens na sua resposta da resistência mecânica. Porém, quando faz-se uma combinação de diferentes adições, pode acontecer aumento em suas vantagens se permitir uma maior percentual na substituição do cimento.

Anjos *et al*. (2015) analisaram a substituição parcial do cimento, em concretos autoadensaveis, nos teores de 60% e 70% por cinza volante e metacaulim, além da adição de 5% de cal hidratada sobre o total de finos da mistura. Os resultados de resistência à compressão mostraram que as composições com cal hidratada apresentaram maiores valores do que as composições sem a cal hidratada, visto que a cal contribuiu para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ao reagir com o material pozolânico que estava presente na mistura em teores elevados.

Nesta pesquisa, a decisão em adicionar 5% e 10% de biomassa da acacia mangium foi baseada na quantidade de resíduo fornecida pela empresa. A empresa forneceu uma quantidade significativa de resíduo de acacia mangium, o que motivou a seleção desses percentuais específicos. Ao utilizar 5% e 10% de adição de biomassa, buscamos maximizar a eficiência do processo de aproveitamento de resíduos.

Neste contexto, o presente estudo investiga a viabilidade de utilizar essas cinzas volantes e a escória, resultantes da queima de biomassa, como adições minerais ao concreto. As proporções de 5% e 10% dessas adições foram testadas para avaliar seu impacto nas características mecânicas e de durabilidade do concreto armado.

Foram realizados ensaios mecânicos de compressão e tração diametral, padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Resultados preliminares indicam equivalências nessas propriedades, sugerindo que o uso de tais resíduos pode contribuir efetivamente para a construção sustentável.

2 DADOS E MÉTODOS /CASO DE ESTUDO

O programa experimental foi dividido em etapas: a) resultado das caracterizações dos materiais constituintes; b) definição dos traços; c) produção dos traços. O Quadro 1 mostra a nomenclatura utilizada.

Quadro 1 – Nomenclatura dos Materiais

Material	Sigla (abreviação)
Referência	REF
Cinza volante da queima da acácia mangium	CV
Escória da queima da acácia mangium	ESC
Adição de 5% de cinza volante	CV 5%
Adição de 10% de cinza volante	CV 10%
Adição de 5% de escória	ESC 5%
Adição de 10% de escória	ESC 10%

Em todas as misturas, o número que segue à letra correspondente representa o percentual de adição de resíduo ao cimento Portland.

Exemplo: A mistura com a sigla CV 5% significa um ligante com adição de 5% de cinza volante ao concreto. A mistura com a sigla REF indica que foi usado apenas cimento Portland como ligante.

2.1 Materiais Utilizados

Apresentam-se, a seguir, os materiais utilizados na pesquisa.

O processo produtivo dos compósitos cimentícios, como abordado neste estudo, destaca-se pela sua composição cuidadosamente balanceada, que inclui cimento Portland, agregados, resíduos da biomassa de acácia mangium provenientes da usina termoelétrica (resíduos agroindustriais) e água. Cada elemento desempenha um papel fundamental, e sua integração é analisada e enquadrada dentro das funções normativas estabelecidas para garantir a qualidade e desempenho do produto final. Em todos os traços foi usado o mesmo lote com a intenção de evitar variações nas propriedades dos mesmos.

2.1.1 Cimento Portland

Dentre os inúmeros tipos de cimento Portland fabricados no Brasil, a escolha foi feita com base na maior disponibilidade no mercado local, optando assim pelo uso do Cimento Portland tipo CPIV-32.

2.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado no estudo é proveniente do Rio Branco, o principal rio do Estado de Roraima, e foi adquirido em uma loja de materiais de construção local. O agregado graúdo é proveniente de uma das pedreiras do Estado, e também obtido em uma loja de material de construção local.

2.1.3 Resíduos da biomassa da acácia mangium

Os resíduos provêm da termoelétrica que forneceu apenas um lote de biomassa de acácia mangium, utilizada como fonte de calor para a geração de energia, situada no município de Boa Vista, em Roraima. Os resíduos da caldeira e do filtro do exaustor foram entregues no escritório da empresa da termoelétrica, em sacos plásticos vedados, totalizando 2,76 kg de cinzas volantes e 4,34 kg de escória granular. Posteriormente, os resíduos foram secos em estufa a uma temperatura de 100 ± 5ºC por um período de 24 horas com o objetivo de remover a umidade.

2.1.4 Água

Na produção dos corpos de prova foi utilizado à água provida da Universidade Federal de Roraima – UFRR, campus Paricarana, oriunda de poços artesianos.

2.2 Caracterização dos Materiais

Nesta etapa serão discutidos os procedimentos de caracterização dos materiais, bem como o processo de produção dos corpos de prova. O método de pesquisa adotado foi experimental, descritivo e exploratório, com foco na investigação de alternativas sustentáveis com uso da biomassa e na tecnologia do concreto, incluindo seu processamento em composições de traços com a incorporação de resíduos. Os ensaios de distribuição granulométrica seguiram as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 248 (2013).

2.2.1 Agregados

Inicialmente, foram coletadas amostras de areia e brita de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 26 (2009). Para a análise granulométrica, o material foi previamente secado em estufa a uma temperatura

de 100±5ºC por 24 horas, conforme especificado na ABNT NBR 7214 (2015). Em seguida, as amostras foram submetidas a um processo de peneiramento, com a quantidade de 1495,16 gramas de areia e 5565,12 gramas de brita, obtidos por quarteamento manual da amostra original até alcançar a quantidade mínima exigida. A análise granulométrica foi conduzida para determinar o módulo de finura e classificar os agregados, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 248 (2003).

A massa específica foi mensurada para cálculo da dosagem do traço, sendo o ensaio de determinação da massa específica da areia realizado conforme a ABNT NBR 52 (2009) e a da brita de acordo com a ABNT NBR 53 (2009). A determinação da foi essencial para o cálculo do volume de cada material nas misturas realizadas. O resultado da massa especifica e da umidade estão apresentadas no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Massa Específica

Material	Massa Específica (g/cm^3)	Umidade (%)
Areia	2,65	17,52
Brita	2,71	4,86

2.2.2 Resíduos da acácia manguim

Para caracterizar o resíduo de cinza volante, o material foi submetido a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100±5ºC por 24 horas, conforme especificado na ABNT NBR 7214 (2015), a fim de eliminar a umidade. Posteriormente, por se encontrar em um estado grosseiro, foi triturado em um moinho de bolas metálicas durante 4 horas. A caracterização do resíduo da escória foi realizada utilizando o mesmo procedimento empregado na caracterização da cinza volante.

2.3 Traços do concreto

Os traços foram definidos com o intuito de produzir concretos com baixos teores de cimento Portland, utilizando duas adições pozolânicas, cinzas volantes e escória.

Previamente, os materiais passaram por processo de secagem, homogeneização, pesagem e separação por mistura. Para obtenção dos concretos, utilizou-se uma betoneira de 150 litros e potência de 0,5 cv., com a inserção inicial da água de amassamento e, posteriormente, dos ligantes.

Foi sugerida para o estudo uma composição de referência amplamente seguida pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil – SINAPI, a qual tem sido praticada nas composições de referência a nível local, assim, optou-se pelo uso do traço 1:2,7:3,0:0,65.

2.4 Abatimento

O ensaio de abatimento, também conhecido como slump flow test, é normatizado pela ABNT NBR 15823-2 (2017) e é fundamental para a avaliação de concretos, pois permite analisar sua capacidade de fluxo. Esse ensaio consiste na medição do espalhamento, em milímetros (mm), caracterizado pelo diâmetro do círculo formado após a consolidação do concreto quando retirado o tronco de cone.

No Quadro 3 é mostrado o resultado do abatimento de cada traço, verificou-se que todos os traços apresentaram baixa trabalhabilidade, principalmente os traços com maior quantidade de adição.

Quadro 3 – Abatimento dos traços

Traço	Abatimento (mm)
Referência	15
5% cinza volante	10
10% cinza volante	7,5
5% escória	10
10% escória	8

Embora tenhamos enfrentado desafios relacionados à trabalhabilidade, a adição de resíduos resultou na diminuição dessa propriedade na matriz de concreto devido à natureza absorvente de água desses materiais (Gopinath *et al*., 2018), especialmente em estágios avançados de cura, nos quais observa-se um comportamento pozolânico leve nesses materiais. De acordo com Akram *et al.*, (2009), é necessário uma dosagem de no mínimo 3% de superplastificante (SP) para manter o valor ideal de espalhamento nos concretos autoadensáveis com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

2.5 Moldagem dos corpos de prova

Para cada traço foram confeccionados 3 corpos de prova em moldes cilíndricos metal com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, moldes com dimensões normatizadas pela ABNT NBR 5738 (1993). O traço escolhido como referência foi um traço praticado nas composições de referência a nível local para edificações nos projetos estruturais e em canteiros de obras.

A sequência de mistura dos componentes do concreto consta no Quadro 4, onde também está indicado a ordem e o tempo da mistura.

Quadro 4 – Sequência de mistura dos componentes

Sequência de mistura na betoneira		
Ordem	Materiais	Tempo (seg)
1º	areia + 33% água	180
2º	Brita + 33% água	180
3º	Cimento + 33% água + resíduo	240

Para a moldagem, conforme mostrado na Figura 1, foram adicionadas duas camadas de concreto dentro dos moldes. Após cada adição, o concreto foi compactado com 12 golpes utilizando uma barra de aço. Em seguida, a superfície foi nivelada utilizando uma colher de pedreiro. Os moldes foram deixados para secar no local de produção por 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e transferidos para uma câmara de água, onde foram mantidos em condição saturada até atingirem as idades específicas para a realização de cada ensaio.

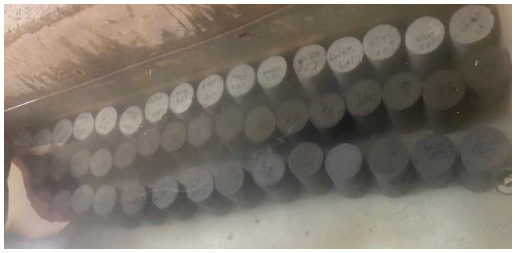


Figura 1 – Corpos de prova na cura (traços: referência, CV 10%, CV 5%)

2.6 Ruptura dos corpos de prova

Os ensaios de caracterização, tanto de compressão conforme a ABNT NBR 5739 (2007) quanto de tração de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011), foram conduzidos nos moldes confeccionados. Após a remoção dos corpos de prova da câmara úmida, estes foram transportados ao local de teste onde a temperatura era ambiente. Os ensaios foram realizados utilizando-se uma prensa elétrica digital com capacidade de carga máxima de 1000 kN e precisão de 1%. Para garantir uma distribuição uniforme da tensão, discos de neoprene foram inseridos em ambos os lados dos moldes. Os corpos de prova foram submetidos à ruptura nas idades de 7, 28 e 60 dias, sendo que cada idade contou com três exemplares testados. Esta metodologia visa assegurar a precisão dos resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos materiais

O ensaio de Granulometria por peneiramento, foi aplicado nos materiais finos. Os gráficos que representam a granulometria da areia e brita estão apresentados nas Figura 2 e 3 respectivamente, enquanto os gráficos da granulometria das cinzas volante e da escória, Figura 4 e 5 respectivamente. No eixo vertical (ordenadas), são indicados os diâmetros das particulas, enquanto o eixo horizontal (abscissas) mostra a abertura da peneira.

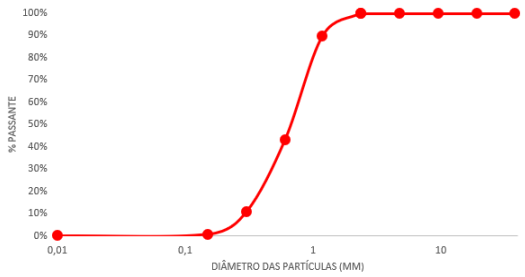


Figura 2 – Perfil granulométrico da areia

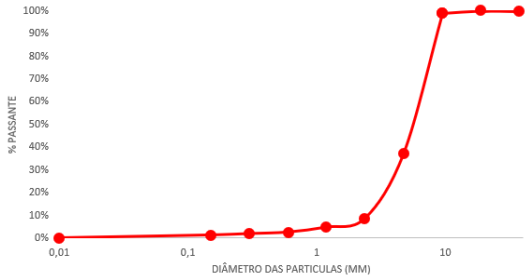


Figura 3 – Perfil granulométrico da brita

Em relação à granulometria dos materiais, areia e brita, Figuras 2 e 3, observa-se que:

- A curva granulométrica da areia, Figura 2, revela uma distribuição contínua dos tamanhos de grão, com mais de 90% dos grãos possuindo diâmetros entre 0,15 mm e 2 mm. Esta faixa de distribuição está em conformidade com as diretrizes estabelecidas para areia;

- Por outro lado, a curva granulométrica da brita, Figura 3, indica que 91,48% dos grãos têm diâmetros superiores a 2,36 mm, dos quais 61,55% excedem 4,75 mm de diâmetro. Esses resultados confirmam a adequação da brita aos critérios definidos pela classificação granulométrica.

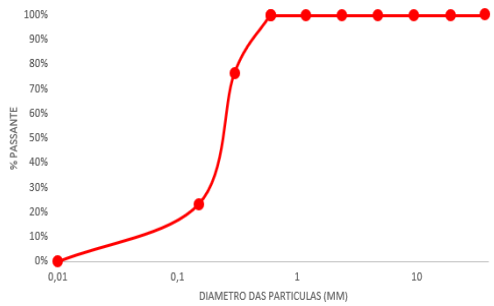


Figura 4 – Perfil granulométrico da cinza volante

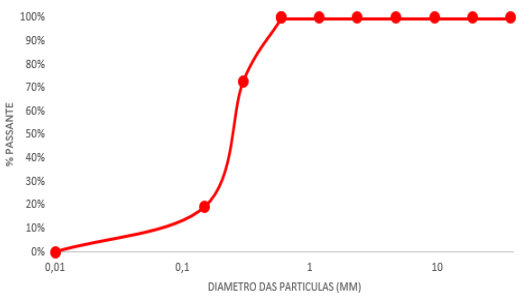


Figura 5 – Perfil granulométrico da escória

Em relação à granulometria dos resíduos da acacia manguim, cinza volante e escória, mostradas nos gráficos das Figuras 4 e 5, respectivamente, observa-se que:

- A análise da curva granulométrica da cinza volante, Figura 4, mostra um perfil de partículas com diâmetros predominantemente pequenos, onde 100% dos grãos apresentam diâmetros menores que 600 µm. Notavelmente, 23,19% destas partículas possuem diâmetros inferiores a 75 µm, correspondendo à granulometria de referência adotada na fabricação de cimento;

- Similarmente, a curva granulométrica da escória revela um perfil de partículas também com diâmetros predominantemente pequenos, onde 100% dos grãos são menores que 600 µm. Destaca-se ainda que 19,40% dessas partículas têm diâmetros abaixo de 75 µm, igualmente alinhado à granulometria referencial para a produção de cimento.

3.2 Resistência Mecânica

As Figuras 6 e 7 mostram as resistência à compressão e tração, respectivamente, dos traços de concreto aos 7, 28 e 60 dias. O valor final da resistência à compressão e à tração é a média aritmética da resistência de 3 (três) corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm).

Os resultados obtidos nas análises de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral são cruciais para avaliar as características mecânicas dos diferentes traços de concreto estudados. Estas análises compararam os traços de referência com aqueles que incluíam adições de cinza volante e escória, com testes conduzidos nas idades de cura de 7, 28 e 60 dias, conforme especificado para cada composição. Esses dados são essenciais para compreender as tendências de comportamento mecânico do concreto sob compressão e tração, e assim avaliar o desempenho das peças moldadas.

O estudo visou alcançar uma resistência característica à compressão de 20 MPa aos 28 dias de cura. Importante notar que os corpos de prova foram testados em condições de saturação. Neville (2016) discute que, em condições secas, a resistência dos corpos de prova pode ser aproximadamente 25% superior, devido à ação potencial de compressão biaxial no material. Assim, corpos de prova que atingissem uma resistência à compressão de 15 MPa aos 28 dias seriam considerados conforme os critérios estabelecidos.

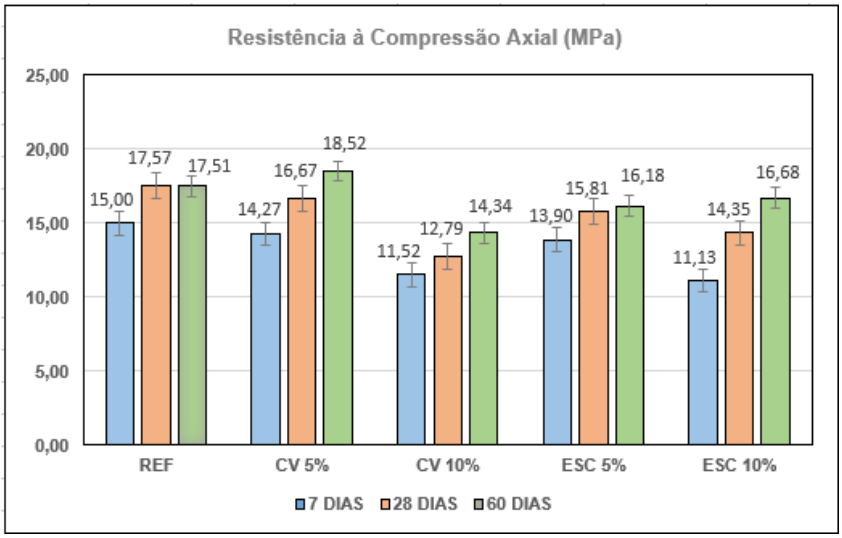


Figura 6 – Resistência à Compressão Axial

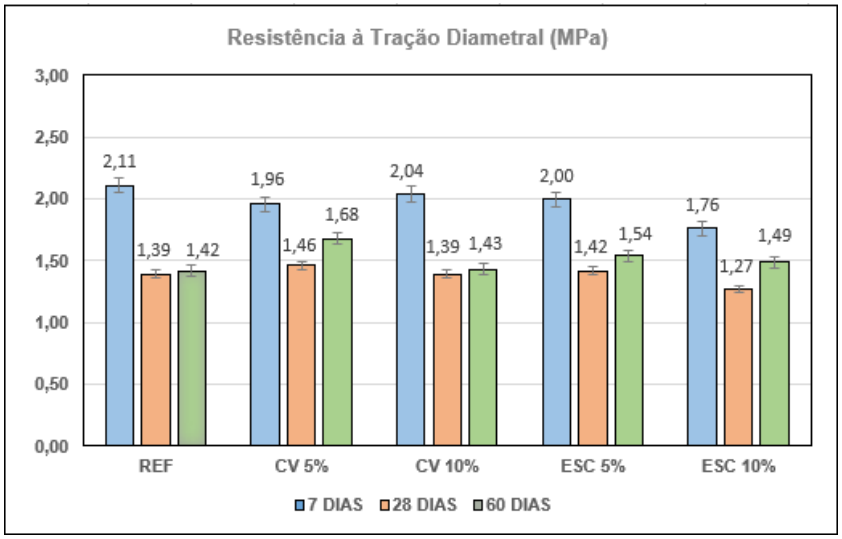


Figura 7 – Resistência à Tração Diametral

Em relação à resistência a compressão e tração dos concretos com a idade e com adição de resíduos, Figuras 6 e 7 respectivamente, observa-se que:

- Os resultados das análises de resistência indicam que os traços de referência, bem como aqueles com adições de 5% de cinza volante (CV) e 5% de escória (ESC), atenderam aos requisitos de resistência estipulados. Contudo, os traços com 10% de adição de CV e ESC não alcançaram os níveis desejados de resistência, o que pode ser atribuído à presença de vazios resultantes da reduzida trabalhabilidade. Apesar dessa discrepância, as resistências observadas para esses traços foram apenas marginalmente inferiores às do traço de referência, indicando um potencial para futuras otimizações dessas misturas;

- Observa-se que, enquanto o traço de referência mostrou um aumento de resistência relativamente estável entre as idades de 28 e 60 dias, os traços com adições de CV e ESC apresentaram um incremento de resistência superior a 1,50 MPa no período mais avançado. Isso sugere que as adições de cinza volante e escória podem ter um impacto positivo no desenvolvimento da resistência do concreto em idades mais prolongadas, potencializando assim a durabilidade e eficácia das misturas de concreto em aplicações de longo prazo;

- Pode-se constatar que o traço referência não apresenta crescimento entre as idades de 28 e 60 dias, de acordo com Moraes (2018) “O material apresenta atividade pozolânica, mas não se caracteriza como pozolana;

- Destaca-se que o traço com adição de 5% de cinza volante (CV) mostrou-se particularmente promissor, exibindo uma resistência superior à do traço de referência aos 60 dias. Este resultado indica um potencial significativo para o uso desse traço em aplicações de longo prazo devido ao seu desempenho aprimorado;

- Além disso, a comparação direta entre as diferentes idades dos ensaios é desafiadora devido à elevada suscetibilidade do ensaio de tração diametral a influências externas, que podem alterar os resultados. Como demonstrado na Figura 7, a resistência medida aos 7 dias de idade é superior à observada em idades mais avançadas, destacando a importância de considerar essas variações ao analisar a evolução da resistência dos materiais ao longo do tempo;

- Os resultados demonstram que os traços de concreto com adições de 5% de cinza volante e 5% de escória apresentaram desempenho levemente superior nas fases mais avançadas do teste. Estes traços

alcançaram os melhores resultados em termos de resistência, como evidenciado no gráfico que compila a média de resistência de cada traço nas idades de 7, 28 e 60 dias;

- Tal como evidenciado nos resultados de compressão, as análises de tração também revelaram um desempenho superior aos 60 dias. Este fenômeno é provavelmente atribuído ao efeito pozolânico que ocorre em idades mais avançadas, onde componentes como a cinza volante e a escória continuam o processo de cura, contribuindo assim para o aumento da resistência.

4 CONCLUSÕES

- Os resultados evidenciam a relevância deste estudo na construção sustentável, destacando que a inclusão de resíduos industriais como cinza volante (CV) e escória (ESC) não só pode reduzir o impacto ambiental da indústria da construção, mas também otimizar as propriedades mecânicas do concreto. No entanto, são necessárias mais pesquisas para compreender completamente os efeitos dessas adições em várias condições de aplicação e ambientes de uso;

- A adição de resíduos à matriz cimentícia resultou em uma perda perceptível de trabalhabilidade, que se agravou proporcionalmente com a quantidade de resíduo incorporado. Essa diminuição foi confirmada por meio do ensaio de abatimento, no qual o traço mais afetado apresentou uma redução de 50% na trabalhabilidade em comparação ao traço de referência (Quadro 3). A justificativa para essa perda significativa de trabalhabilidade está relacionada à capacidade dos resíduos de absorver a água de amassamento. Após o rompimento dos corpos de prova observou-se que o concreto apresentava maior porosidade em comparação ao traço de referência. Essa porosidade aumentada é um reflexo direto da perda de trabalhabilidade ocasionada pela adição dos resíduos;

- A utilização de cinza volante e escória como adições ao concreto mostra potencial para atender às demandas da indústria da construção civil em Roraima, apesar dos desafios enfrentados em relação à trabalhabilidade do concreto em certas proporções de adição. Recomenda-se estudos adicionais para explorar a influência das características específicas dos resíduos industriais nas propriedades do concreto e investigações sobre sua durabilidade em ambientes específicos de Roraima;

- Embora tenhamos observado um desempenho superior para misturas com menor proporção de adições de cinza volante em comparação com o traço de referência, é fundamental considerar que a absorção de água por parte desses resíduos pode comprometer a trabalhabilidade do concreto, potencialmente resultando na formação de vazios no material;

- Apesar dos desafios enfrentados, conseguimos dimensionar traços de concreto capazes de suportar as cargas solicitadas, contribuindo assim para ampliar o conhecimento sobre o uso de resíduos agroindustriais na produção de concreto e promovendo práticas sustentáveis na indústria da construção civil. Ao adotar medidas que visam reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular, podemos avançar em direção a um setor mais sustentável e resiliente, atendendo às necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações;

Para futuras pesquisas, algumas sugestões podem ser consideradas para aprimorar e expandir o conhecimento sobre a adição de resíduos na produção de concreto:

- Fazer o comparativo com adição de cinza proveniente de outros materiais, para certificação de desempenho desta adição;

- Fazer uma segunda queima dos resíduos, apos a moagem, garantindo uma melhor calcinação da cinza para que seja possível revelar um maior potencial pozolânico, fazendo a adição dos resíduos;

- Utilizando este mesmo traço com adição de um plastificante, visando uma melhora na trabalhabilidade e na redução dos vazios;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 20 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 7214: Areia normal para ensaio de cimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 8 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2**:** Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 5 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738:2015 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9p

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222:2011–Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 9p

Akram, T., Memon, S. A., Obaid, H. (2009). Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 23, n. 2, p.703-712. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012

Anjos, M. A. S., Camões, A., Jesus, C. Campos, P. (2015). Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - CONPAT. Lisboa, Portugal

Chopra, D., Siddique, R., Kunal. (2015). Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. Biosystems Engineering, [s.l.], v. 130, p.72-80. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005

Dossche, C., Boel, V., Corte, W., Heede, P. D., Belie, N. (2016). A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. Cement and Concrete Composites, [S.L.], v. 73, p. 192-202. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.011

Gopinath, S., Murthy, A. R., Ramya, D., Iyer, N. R. (2011). Optimised Mix Design for Normal Strength and High Performance Concrete Using Particle Packing Method. Archives of Civil Engineering, [S.L.], v.

57, n. 4, p. 357-371. Polish Academy of Sciences Chancellery. http://dx.doi.org/10.2478/v.10169-011-0026-0

Le, H. T., Muller, M., Siewert, K., Ludwig, H-M. (2015). The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. Materials e Design, [s.l.], v. 72, p.51-62. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.01.006

Madandoust, R., Mousavi, S. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 35, p.752-760. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109

Moraes, J. S. L. M.(2016). Aditivos para Concreto. Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva

Neville, A.M. (2016). Propriedades do Concreto. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman

Ramezanianpour, A. A., Bahrami, J. H. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. Construction and Buildings Materials, v. 30, p. 470-479

Uysal, M., Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Composites, [s.l.], v. 33, n. 7, p.771-776. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005Get rights and content

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Análise da reatividade de cinza de lodo de esgoto em matrizes cimentícias

Brendhy Torres de Queiroz[a]; Daniel Salustiano Costa Neto[b]; Mônica Batista Leite[c]; Raildo Alves Fiuza Junior[d]; Tamires Cordeiro Santana[e]; Tereza Simonne Mascarenhas Santos[f]

[a]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana - BA, Brasil), brendhytorres@hotmail.com

[b]Programa de Pós-Graduação em Química (Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, 147, 40170-115, Salvador - BA -, Brasil), salustianocosta@hotmail.com

[c]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana - BA, Brasil), mbleite@uefs.br

[d]Programa de Pós-Graduação em Química (Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, 147, 40170-115, Salvador - BA -, Brasil), raildofiuza@ufba.br

[e]Curso de Edificações (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Euclides da Cunha, Av. Renato Campos, n. 900, BR116, km 220, Euclides da Cunha - Ba, Brasil), tamires.cordeiro@ifba.edu.br

[f]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana - BA, Brasil), tereza.santos@uefs.br

RESUMO

O aumento global na quantidade de lodo de esgoto (LE) e as preocupações ambientais e de saúde pública destacaram a necessidade urgente de encontrar métodos seguros, sustentáveis e eficazes para seu uso ou reciclagem. A incineração do LE é considerada uma alternativa ao seu descarte em aterros, gerando cinzas de lodo de esgoto (CLE), que têm sido estudadas para o uso como materiais cimentícios suplementares (MCS). Assim, o objetivo deste estudo é conhecer a reatividade da CLE, queimada a 800 °C, em matrizes cimentícias, comparando seus efeitos com a cinza volante (CV). Foram realizados ensaios de DRX, análise termogravimétrica e resistência à compressão em pastas com 10 % de substituição de cimento por CLE ou CV. Os resultados mostraram que as pastas produzidas com CLE ou CV não apresentaram produtos de hidratação diferentes dos que foram identificados na pasta de referência. Apesar de a CLE não ser pozolânica, pode ter reagido com a portlandita liberada na hidratação do cimento, como indicam os resultados de resistência mecânica aos 56 dias, quando comparados com as pastas com CV.

Palavras-chave: CLE, pasta cimentícia, DRX, termogravimetria, resistência à compressão

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a segurança humana e ambiental tem motivado a implementação de medidas sanitárias há séculos, como ilustra a introdução de redes de esgoto em resposta à epidemia de cólera, assim como a criação das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) para atenuar os impactos dos efluentes não tratados nos ecossistemas aquáticos. Atualmente, um desafio premente é a gestão adequada dos resíduos provenientes desses tratamentos, particularmente o lodo de esgoto (LE), que se destaca pelo seu volume e pelos custos associados à sua gestão, conforme explorado por Von Sperling (2014).

A quantidade de LE gerado tem crescido significativamente, impulsionada pelo aumento populacional e desenvolvimento econômico, além da expansão dos serviços de tratamento de esgoto. Este crescimento foi documentado por Di Fraia *et al.* (2022), que indicam uma geração entre 5,82 e 8,00 milhões de toneladas anuais de sólidos secos em 27 países da União Europeia com base em dados do Eurostat (Eurostat, 2021), com projeções de atingir cerca de 10 milhões de toneladas até 2030. A situação ganhou contornos ainda mais críticos com a pandemia de COVID-19, após a detecção do vírus no LE, intensificando as preocupações ambientais e de saúde pública e sublinhando a necessidade urgente de desenvolver métodos seguros e sustentáveis para a reciclagem ou reutilização do LE, conforme relatado por Guo *et al.* (2023).

A incineração do lodo de esgoto (LE) surge como uma alternativa promissora à sua disposição em aterros sanitários, apresentando vantagens significativas como a redução de volume (até 90%) e massa (até 70%), eliminação de matéria orgânica, patógenos e odores, além de possibilitar a ativação de minerais e a imobilização de contaminantes metálicos. Este processo transforma o LE em um combustível renovável, com poder calorífico (12 – 20 MJ kg-1) comparável ao do carvão marrom (14,6 – 26,7 MJ kg-1), permitindo a geração de energia elétrica ou térmica. Contudo, a incineração também resulta na geração de grandes quantidades de cinzas de lodo de esgoto (CLE), um subproduto que necessita de gestão apropriada para evitar o acúmulo em aterros (Chang *et al.*, 2020; Collivignarelli *et al.*, 2019; Fontes *et al.*, 2016; Lynn *et al.*, 2015; Magdziarz *et al.*, 2016; Payá *et al.*, 2018; Świerczek *et al.*, 2021).

Visando valorizar as CLE, estudos recentes exploram seu uso como aditivos minerais na produção de matrizes cimentícias, contribuindo para a redução no consumo de cimento Portland e, consequentemente, na redução das emissões de CO_2 associadas à indústria cimenteira, que precisaria reduzir pelo menos 18 % das emissões de $CO_{2eq.}$ até 2050, a fim de diminuir as emissões totais em 50% (Scrivener *et al.*, 2016). Somado a isso, ressalta-se que as emissões resultantes da incineração do LE são quase 20 vezes menores em comparação com as da produção de cimento (Pavlík *et al.*, 2016). Além disso, a aplicação da CLE em argamassas, concretos convencionais, concretos de alto desempenho e blocos de concreto está sendo investigada, visando desenvolver materiais cimentícios suplementares (MCS) que possam atender às crescentes demandas globais e responder à variabilidade regional na disponibilidade de recursos (Chang *et al.*, 2022; Chen e Poon, 2017a; Haustein *et al.*, 2022; Juala *et al.*, 2022; Kappel *et al.*, 2018; Ottosen *et al.*, 2022; Rutkwoska *et al.*, 2021, 2022; Skibsted e Snellings, 2019; Vouk *et al.*, 2017; Zdeb *et al.*, 2022).

A incorporação de cinzas de lodo de esgoto (CLE) em misturas de cimento Portland tem demonstrado efeitos variáveis nas propriedades do material, dependendo da composição química e mineralógica das cinzas e do teor de substituição. Os estudos indicam que, embora a trabalhabilidade das misturas possa diminuir e o tempo de pega das pastas aumentar, há potencial para um incremento na resistência mecânica dos materiais cimentícios, efeitos esses que podem variar devido a quantidade de CLE utilizada (Al-Shanti *et al*., 2019; Basto *et al*., 2019; Juala *et al*. 2022; Liu *et al*., 2021; Oliva *et al*.,

2019; Vouk *et al.*, 2018). Contudo, apesar destas análises focadas nas propriedades macroscópicas, persiste uma lacuna significativa no entendimento do impacto das CLE sobre a hidratação e microestrutura dos materiais à base de cimento, uma área que requer atenção dada a diversidade nas composições químicas das CLE observadas nos estudos citados.

Diante disso, este estudo teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre a reatividade da CLE em matrizes cimentícias, comparando seu comportamento com o de uma cinza volante disponível comercialmente, incentivando, desse modo, sua utilização como MCS e contribuindo com o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS USADOS NAS PASTAS DE CIMENTO

Para a produção das pastas foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial - CP V ARI, atendendo às especificações da NBR 16697 e apresentando uma massa específica de 3,08 g/cm^3, e uma cinza volante comercializada na região do estudo, com massa específica igual a 1,98 g.cm^{-3}.

A cinza de lodo de esgoto, denominada de CLE800, foi proveniente da queima de um lodo de esgoto (LE) secundário coletado na Estação de Tratamento de Esgoto Jacuípe II em Feira de Santana, Bahia (Brasil), após tratamento em um digestor anaeróbio de fluxo ascendente (DAFA). Esse LE foi inicialmente desidratado naturalmente em um leito de secagem, conforme descrito por Costa Neto (2020), e, após secagem em estufa a 105 °C por 72 horas e trituração manual, foi submetido a um processo de incineração. Amostras de 60 g do lodo beneficiado foram queimadas a 800 °C por três horas em um forno mufla elétrico – modelo Q318S4, com taxa de aquecimento média de 10 °C min^{-1}, seguido de um resfriamento não forçado de aproximadamente 19 horas dentro da mufla.

A composição química do LE e da CLE800 foi determinada por análise elementar por espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDX), realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios-X por dispersão de energia, modelo EDX720 da marca Shimadzu, operando com fonte de ródio no modo semiquantitativo. Os resultados de composição química do LE, CLE e CV estão apresentados na Tabela 1.

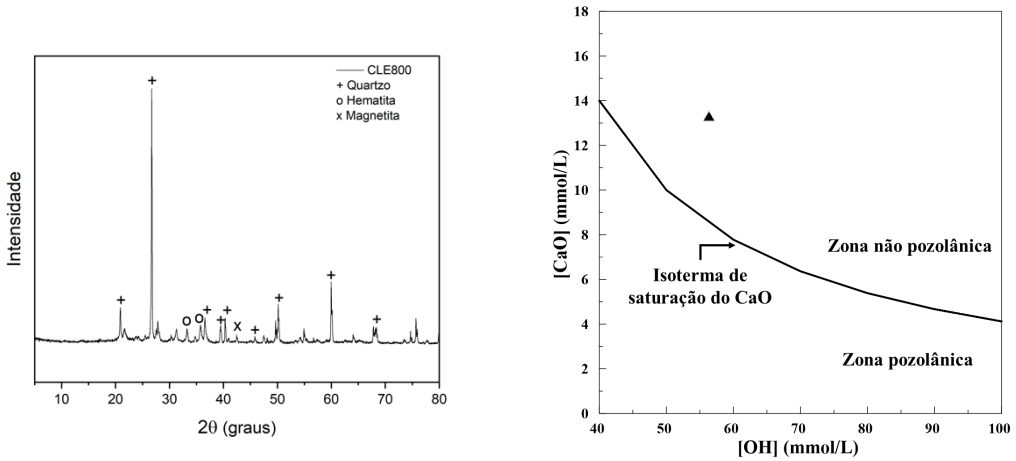
Tabela 1 – Composição química dos materiais estudados

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	SO_3	ZnO	P_2O_5	Outros	PF
LE	18,44	7,19	36,51	0,91	9,48	4,21	6,98	5,72	6,78	10,39	-
CLE	33,95	10,05	36,51	1,19	10,31	4,43	1,02	2,90	8,30	3,33	0,9
CV	53,33*	33,23*	4,96*	3,44*	2,06*	1,38*	1,26*	-	-	0,34*	2,0

Fonte: *Dantas (2019)

A composição mineralógica da CLE800 foi avaliada por meio de difração de raios – X, realizada em equipamento modelo XRD – 6000 da marca Shimadzu, operando com radiação CuKα numa faixa de ângulos 2θ de 2º a 80º, velocidade de 2º min-1, com fendas de 0,5º para espalhamento, 0,5º para recepção e 3 mm para saída, em uma tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. A amostra de CLE também foi avaliada quanto a pozolanicidade quanto a pozolanicidade, a partir da adaptação do método

estabelecido na NBR 5753 (ABNT, 2016). O difratograma da CLE800 e o resultado da análise de pozolanidade podem ser vistos na Figura 1.



(a) (b)

Figura 1 – Resultados de caracterização da CLE800 realizada por: (a) DRX e (b) Teste de pozolanicidade

Observa-se que quartzo, hematita e magnetita são os principais minerais presentes na CLE800, o que está em conformidade com o resultado de composição química. Além disso, a CLE800 é classificada como material não pozolânico em decorrência dos picos de difração bem definidos, típico de um material cristalino.

Para atingir o intervalo de espalhamento desejado para as pastas e promover uma melhor dispersão das partículas de cimento, optou-se por utilizar um aditivo superplastificante (SP), sendo escolhido o Vedacit Pro Aditivo Superplastificante Base Policarboxilato, da marca Vedacit, com uma densidade de 1,09 g cm^{-3} e pH variando de 4 a 6. Além disso, na produção das pastas, foi utilizada água destilada para evitar qualquer interferência da composição química da água nos resultados.

2.2 PREPARAÇÃO DAS PASTAS

A pasta de cimento de referência consistiu de 1 parte de cimento para 0,5 parte de água. As pastas produzidas com CV e com CLE800 seguiram a proporção de 1 parte de aglomerante para 0,5 parte de água, e apresentaram 10 % de teor de substituição do cimento, em massa. Para identificação das pastas foi adotada a nomenclatura: P – REF, para pasta de referência; P – 10CV, para as pastas com cinza volante; e P – 10CLE800, para a pasta com cinza de lodo de esgoto queimada a 800 °C.

As pastas foram produzidas com consistência constante e igual a 120 ± 10 mm, valor adotado por Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016), determinada por ensaio de mini-abatimento proposto por Kantro (1980). Para os ensaios de mini-abatimento e resistência à compressão, as pastas foram preparadas de acordo com o processo de mistura adotado por Melo (2005). A Tabela 2 apresenta os teores de aditivo SP utilizado em cada mistura para obtenção do espalhamento estabelecido e os respectivos valores de espalhamento alcançados.

Para entender sobre a interação química entre o cimento Portland e a CLE e o cimento Portland e a CV, foram feitos os ensaios de difração de raios X e análise termogravimétrica aos 7, 28 e 56 dias de idade. Para isso, foram produzidas pastas, cuja mistura foi manual, realizada em béquer de vidro com o auxílio de espátula de borracha. Após mistura, as pastas foram cuidadosamente armazenadas em sacos plásticos zip lock e mantidas em dessecador até a idade de teste para evitar carbonatação.

Tabela 2 - Teor de superplastificante utilizado nas misturas e seus correspondentes valores de espalhamento

Mistura	Teor de SP (%)	Espalhamento (mm)
P – REF	0,07	125,0 ± 2,7
P – 10CV	0,08	130,0 ± 2,4
P – 10CLE800	0,06	115,0 ± 0,4

O ensaio de DRX das pastas seguiu a mesma configuração do ensaio realizado com as CLE. Para realização de análises termogravimétricas, amostras de 10 – 15 mg de pasta foram acomodadas em cadinho aberto de alumina e submetidas a aquecimento de 25 a 35 °C, com isoterma em 35 °C, seguindo com aquecimento até 950 °C. Esse processo foi feito em equipamento da marca TA Instruments modelo SDT Q600, com atmosfera de N_2, fluxo de gás de 100 mL.min-1, e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}.

Pela curva termogravimétrica resultante e por sua primeira derivada foi possível calcular o teor de portlandita ($Ca(OH)_2$), ao considerar a desidroxilação; e o teor de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), pela descarbonatação. A identificação das temperaturas limites desses eventos foi feita para cada pasta por meio da curva de DTG.

Por padrão, as curvas de análises térmicas são plotadas a partir da massa inicial da amostra. Entretanto, as análises feitas com base nessa massa não permitem uma comparação adequada entre as pastas, pois suas composições iniciais são diferentes. Para lidar com isso, os cálculos de variação de massa foram realizados em uma mesma base de composição, a massa de cimento inicial, conforme proposto por Dweck *et al*. (2009).

A resistência à compressão das pastas foi avaliada aos 7, 28 e 56 dias, em corpos-de-prova moldados para esse fim. Todos os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 h para secagem inicial em local úmido e, após esse período, foram desmoldados e submetidos a cura úmida ao serem colocados submersos em um recipiente contendo água saturada com hidróxido de cálcio onde permaneceram até idade de teste.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 HIDRATAÇÃO DAS PASTAS PRODUZIDAS

A pasta de referência e as produzidas com substituição parcial do cimento por CV ou CLE800 foram avaliadas por meio dos ensaios de difração de raios X, análise termogravimétrica e resistência à compressão. A Figura 2 mostra os difratogramas das pastas após 56 dias de hidratação.

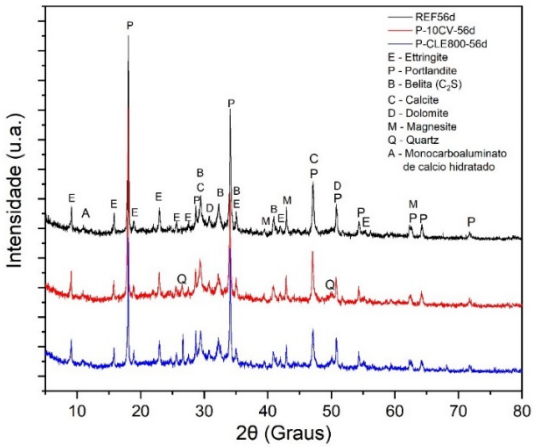
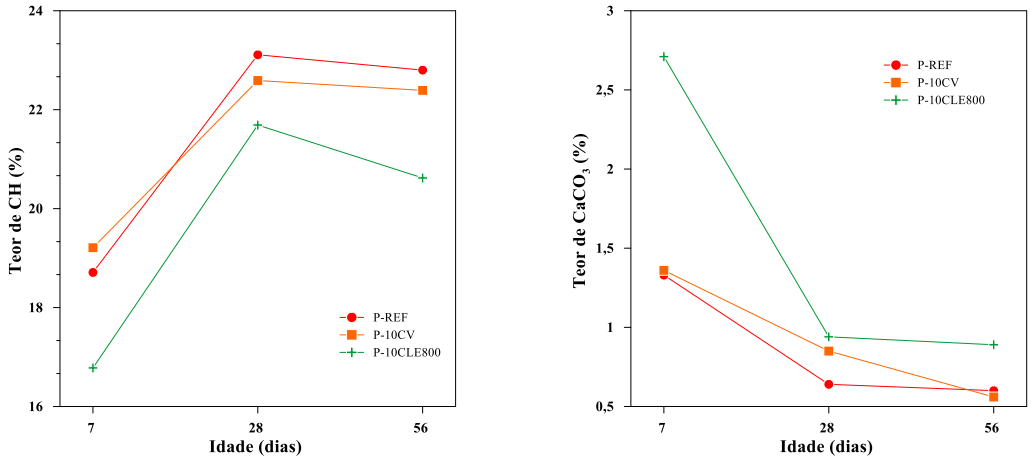


Figura 2 - Difratogramas de raios X comparando a P-REF com a P-10CV e P-10CLE800 aos 56 dias

A partir da análise dos difratogramas, foi possível observar que todas as misturas produzidas apresentaram picos bem definidos de etringita, portlandita, calcita, dolomita, belita, magnesita e monocarboaluminato de cálcio. Nas pastas em que o cimento foi substituído por CLE ou CV, observou-se a presença de quartzo, que está associado à composição das cinzas. Os teores de carbonato de cálcio e portlandita nas pastas produzidas foram determinados por análise termogravimétrica e podem ser vistos na Figura 3.



(a) (b)

Figura 3 - Evolução com o grau de hidratação do teor de: (a) portlandita e (b) calcita das pastas produzidas

Aos 7 dias de idade, a pasta P-10CV apresentou teor de portlandita 0,5 % superior ao teor apresentado pela P–REF, o que indica que na mistura com CV, os grãos de cimento se encontraram mais dispersos, facilitando o processo de hidratação. Esse comportamento pode estar associado a substituição de clínquer por grãos de uma adição mineral fina promover um aumento na relação água/clínquer, permitindo que haja mais espaço para formação de hidratados, além de os materiais finos fornecerem superfície extra para precipitação heterogênea e crescimento dos produtos de hidratação (Lothenbach *et al.*, 2011; Scrivener *et al.*, 2015).

Com relação à P–10CLE800, notou-se que seu teor de portlandita foi 2,0 % inferior ao apresentado pela P–REF, o que pode estar associado ao efeito de diluição do cimento. Alguns estudos têm mostrado que a incineração do LE em altas temperaturas pode levar a sinterização de partículas, com aumento de seu diâmetro médio (Basto *et al.*, 2019; Oliva *et al*., 2019). Logo o efeito de diluição na P–10CLE800 pode se relacionar com partículas de maiores tamanhos compondo a CLE800. Além disso, o início das reações de hidratação do cimento pode ter sido prolongado pela presença de P_2O_5 na CLE800, como observado por Mejdi *et al*. (2020), Piasta e Lukawska (2016) e Zdeb *et al*. (2022).

Entre 7 e 28 dias, o teor de portlandita em todas as pastas estudadas aumentou, como consequência do aumento do grau de hidratação do cimento e da baixa reatividade da cinza volante e da CLE800. Apesar das diferentes taxas de crescimento, é notório que as pastas com CV ou CLE sofrem influência do efeito de diluição do cimento aos 28 dias, visto que o teor de CH da P–REF foi superior aos teores observados em todas as demais misturas.

Após os 28 dias de idade, todas as misturas apresentaram comportamento similar: declínio no teor de portlandita. A maior redução foi observada na P–10CLE800, que mostrou redução de 1,1 % comparado ao teor observado aos 28 dias. Por outro lado, a P–10CV apresentou uma redução de 0,3 % no teor de CH comparado ao teor apresentado aos 28 dias. Essas reduções podem estar relacionadas ao envolvimento do CH em reações químicas, formando produtos que não puderam ser vistos no DRX por sua pequena quantidade ou por se encontrarem no estado amorfo.

Com relação ao carbonato de cálcio, sua presença nas misturas cimentícias pode ser decorrente da queima incompleta das matérias-primas do clínquer; da composição química de adições minerais, como fíler calcário, adicionadas ao cimento; como também da carbonatação da portlandita liberada durante a hidratação do cimento.

Aos 7 dias de idade, a P–CLE800 apresentou teor de calcita superior ao observado na P–REF, sendo este cerca de 1,4 % maior que o observado na P–REF . Observou-se que o teor de calcita da P–10CV, por sua vez, foi muito próximo ao teor da P–REF. A carbonatação observada aos 7 dias de idade pode estar associada a reação do CO_2 com o $Ca(OH)_2$ resultante da hidratação do cimento durante a cura ou durante procedimentos de preparo das pastas para análise. Já os diferentes graus de carbonatação pode ter relação com a quantidade e distribuição de poros nas misturas.

O aumento no tempo de hidratação levou a um declínio dos teores de calcita em todas as misturas avaliadas, o que pode indicar o consumo desse composto para formação de produtos de hidratação. Após 28 dias, dois comportamentos puderam ser identificados: 1°) o teor de calcita se manteve aproximadamente constante nas misturas P–REF e P–10CLE800; 2°) o teor de calcita continuou reduzindo na P–10CV.

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O efeito mecânico das interações químicas entre cimento, CV e CLE pôde ser observado por meio da resistência à compressão das pastas, cujos resultados estão na Tabela 3. Os índices que acompanham os valores médios de resistência à compressão correspondem aos resultados da análise estatística para um nível de confiança de 5 % ($p < 0,05$). Misturas com o mesmo índice não apresentam diferença significativa na resistência à compressão. Além disso, esses índices seguem uma ordem quantitativa decrescente, de forma que o índice "a" é atribuído à mistura com o maior valor de resistência à compressão.

Tabela 3 - Resultados de resistência à compressão das diferentes misturas aos 7, 28 e 56 dias de idade

Misturas	fc ± s (CV) (MPa)		
	7 dias	**28 dias**	**56 dias**
P-REF	34,67 ± 1,11 (1,23) [a]	47,21 ± 1,57 (2,47) [a]	47,58 ± 1,22 (1,49) [a]
P-10CV	30,44 ± 0,15 (0,02) [c]	40,06 ± 1,31 (1,73) [b]	43,64 ± 2,03 (4,13) [b]
P-10CLE800	31,77 ± 0,40 (0,16) [b]	37,25 ± 0,78 (0,61) [c]	42,19 ± 0,50 (0,25) [b]

Aos 7 dias de idade, foi possível observar que tanto a P–10CLE800 quanto a P–10CV apresentaram valores de resistência à compressão inferior ao observado na P–REF. O menor valor foi observado na mistura P–10CV, cerca de 12,2 % inferior a resistência da P–REF. A mistura com CLE apresentou valor médio de resistência à compressão 4,4 % superior ao alcançado pela mistura com CV, o que também foi observado nos estudos de Chen e Poon (2017b).

Entre 7 e 28 dias, todas as misturas analisadas tiveram ganho de resistência à compressão, em virtude do aumento do grau de hidratação do cimento. A pasta produzida com cinza volante apresentou maior ganho de resistência comparado à mistura produzida com CLE800. As pastas P–10CV e P–10CLE800 apresentaram ganho de resistência de 31,6 e 17,2 %, respetivamente. Comparado a P–REF, seus valores de resistência à compressão aos 28 dias foram 15,1 e 21,1 % inferiores, respetivamente. Entre 28 e 56 dias, notou-se que as pastas P–10CLE800 e P–10CV apresentaram ganho de resistência de 13,3 e 8,9 %, respetivamente.

Aos 56 dias, todas as pastas em que o cimento foi parcialmente substituído apresentaram valores médios de resistência à compressão inferiores ao observado na P-REF. O menor declínio foi observado na P–10CV, igual a 8,3 %. A pasta produzida com CLE800 apresentou uma redução na resistência à compressão de 11,3 %, e, de acordo com a análise estatística, não foi possível observar diferença significativa entre as misturas produzidas com cinza volante e CLE800 para o teor de substituição de 10 % da massa de cimento. Resultados equiparáveis de resistência à compressão de misturas produzidas com CV e CLE para um mesmo teor de substituição também foram identificados nos estudos de Chen e Poon (2017a,b) e. Zhou *et al*. (2020).

O ganho de resistência com o tempo para as misturas contendo cinzas pode estar relacionado a diversos fatores: (a) à redução da relação água/cimento pela porosidade (CLE) ou aglomeração das partículas (cinza volante), contrabalançando o efeito de diluição; (b) à liberação de água para a matriz, permitindo a hidratação adicional do cimento remanescente; (c) ao intertravamento entre os grãos da CLE e do cimento devido a forma irregular das CLE; (d) ao preenchimento de espaços vazios da matriz por partículas mais finas que as do cimento, como no caso da cinza volante; (e) à reações químicas (Chen e Poon, 2017a; Donatello *et al*., 2010; Krejcirikova *et al*., 2019).

No que tange as reações químicas, no caso da cinza volante, tais reações podem se tratar de reações pozolânicas, o que não é o caso da CLE800, que foi classificada como material não pozolânico. A reação entre cimento e CLE não pode ser vista como simplesmente pozolânica (Zhou *et al*., 2020), pois estudos mostraram que as CLE podem reagir em matrizes cimentícias formando compostos capazes de contribuir com a melhoria na resistência mecânica (Dyer *et al*., 2011, Chang *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, foi possível concluir que mesmo não sendo um material pozolânico, em idades mais avançadas, a CLE800 pode ter reagido quimicamente com a portlandita liberada durante a hidratação do cimento Portland, ou ainda, pode ter havido a formação de produtos envolvendo a fase alumina da CLE. Contudo, os produtos dessas reações não puderam ser identificados no difratograma das pastas, por sua pequena quantidade ou por sua natureza amorfa. Além disso, nos difratogramas das pastas com CV ou CLE observou-se a presença de quartzo cristalino, o que confirma a baixa atividade química dos materiais, e ainda influenciam no efeito de diluição das misturas, o que também foi observado no estudo de Yang *et al.* (2024). Estes autores também verificaram em seu estudo que as misturas produzidas com CLE apresentaram picos de calcita mais intensos, e indicaram um possível envolvimento de fases de alumina da CLE na formação de calcita e a ação do $CaCO_3$ da composição da CLE em sua estabilização.

Os resultados de análise química das pastas são compatíveis com os resultados observados para a resistência à compressão, uma vez que, nas idades iniciais de hidratação, a resistência à compressão da mistura produzida com CLE800 atingiu valor superior ao observado para pasta produzida com CV e, após 28 dias de idades, os resultados de resistência à compressão não apresentaram diferença significativa. Em seus estudos, Chang *et al.* (2022), Zhou *et al*. (2020) e Dyer *et al*. (2011) também observaram que a CLE, embora não seja um material pozolânico, ao ser misturada em matrizes à base de cimento podem dar origem a compostos que irão contribuir com a resistência mecânica em idades mais avançadas.

De modo geral, o comportamento observado nas misturas contendo CLE foi comparável ao observado nas misturas contendo cinza volante, a qual já é comercializada e utilizada na construção civil. Isso demonstra a viabilidade de utilizar a CLE como material cimentício suplementar. Para que se isso se concretize, entretanto, é necessário realizar mais estudos que avaliem os aspectos que influenciam a reatividade da CLE em matrizes cimentícias, como por exemplo o estudo redução de tamanho de partículas nas cinzas obtidas em diferentes temperaturas de incineração, e avaliar a influência da reatividade da CLE sobre as propriedades requeridas para argamassas e concretos.

REFERÊNCIAS

Al-Shanti, S.; El-Dieb, A. S.; Maraqa, M. A. (2019). Characterization of sewage sludge ash as affected by different incineration temperature and time. In: Proceedings of the SCTM5 the 5th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2016). NBR 5753: Cimento Portland – Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2012). NBR NM 18: Cimento Portland — Análise química – Determinação de perda ao fogo.

Basto, P. de A.; Savastano Junior, H.D; de Melo Neto, A. A. (2019). Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. Cement and Concrete Composites, 104: 103410. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103410

Chang, Z.; Long, G.; Xie, Y.; Zhou, J. (2022). Recycling sewage sludge ash and limestone for sustainable cementitious material production. Journal of Building Engineering, 49: 104035. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104035

Chang, Z.; Long, G.; Zhou, J.; Ma, C. (2020). Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. Resources, Conservation and Recycling, 154: 104606. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606

Chen, Z.; Li, J. S.; Poon, C. S. (2018). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. Journal of Cleaner Production, 171: 1447–1459. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.140

Chen, Z.; Poon, C. S. (2017a). Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. Construction and Building Materials, 154: 791-803. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.003

Chen, Z.; Poon, C. S. (2017b). Comparing the use of sewage sludge ash and glass powder in cement mortars. Environmental technology, 38(11): 1390-1398. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1230652

Collivignarelli, M. C.; Canato, M.; Abbà, A.; Miino, M. C. (2019). Biosolids: what are the different types of reuse?. Journal of Cleaner Production, 238: 117844. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844

Cordeiro, G. C.; Alvarenga, L. M. S. C. de; Rocha, C. A. A. (2016). Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. Construction and Building Materiais, 111: 766-773. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.178

Costa Neto, D. S. (2020). Reutilização de lodo de esgoto para produção de catalisadores e aplicação no processo Fenton heterogêneo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

Dantas, C. L. D. E. R. (2019). Tratamento hidrotérmico em fibras de sisal e sua influência no comportamento de compósitos cimentícios. Dissertação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

Di Fraia, S.; Massarotti, N.; Uddin, M. R.; Vanoli, L. (2022). Conversion of Sewage Sludge to combined heat and power: Modeling and optimization. Smart Energy, 5: 100061. https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100061

Donatello, S.; Freeman-Pask, A.; Tyrer, M.; Cheeseman, C. R. (2010). Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. Cement and Concrete Composites, 32(1): 54-61. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.002

Dweck, J.; Cunha, A. L. C. da; Pinto, C. A.; Gonçalves, J. P.; Büchler, P. M. (2009). Thermogravimetry on calcined mass basis—hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 97(1): 85-89. https://doi.org/10.1007/s10973-008-9761-0

Dyer, T. D.; Halliday, J. E.; Dhir, R. K. (2011). Hydration chemistry of sewage sludge ash used as a cement component. Journal of materials in civil engineering, 23(5): 648-655. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000221

Eurostat website: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do Acessado em março de 2021

Fontes, C. M. A.; Toledo Filho, R. D.; Barbosa, M. C. (2016). Sewage sludge ash (SSA) in high performance concrete: characterization and application. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 9(6): 989 - 1006. https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000600009

Gu, C.; Ji, Y.; Zhang, Y.; Yang, Y.; Liu, J.; Ni, T. (2021). Recycling use of sulfate-rich sewage sludge ash (SR-SSA) in cement-based materials: Assessment on the basic properties, volume deformation and microstructure of SR-SSA blended cement pastes. Journal of Cleaner Production, 282: 124511. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124511

Guo, S.; Dong, R.; Chang, Z.; Xie, Y.; Chen, G.; Long, G. (2023). Performance and microstructure of sustainable cementitious materials mixed by municipal sewage sludge ash, slag, and fly ash. Construction and Building Materials, 367: 130028. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130028

Haustein, E.; Kuryłowicz-Cudowska, A.; Łuczkiewicz, A.; Fudala-Książek, S.; Cieślik, B. M. (2022). Influence of cement replacement with sewage sludge ash (SSA) on the heat of hydration of cement mortar. Materials, 15(4): 1547. https://doi.org/10.3390/ma15041547

Juala, R.; Ballim, Y.; Mulopo, J. (2022). Assessment of local sewage sludge ash as a supplementary cementitious material-effects of incineration temperature and cooling rate of the ash. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 64(1): 37-47. http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2022/v64no1a4

Kantro, D. L. (1980). Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. Cement and Concrete Aggregates, 2(2): 95-102. https://doi.org/10.1520/CCA10190J

Kappel, A.; Viader, R. P.; Kowalski, K. P.; Kirkelund, G. M.; Ottosen, L. M. (2018). Utilisation of electrodialytically treated sewage sludge ash in mortar. Waste and Biomass Valorization, 9(12): 2503-2515. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0215-z

Krejcirikova, B.; Ottosen, L. M.; Kirkelund, G. M.; Rode, C.; Peuhkuri, R. (2019). Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar. Journal of Building Engineering, 21: 396-403. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.021

Liu, M.; Zhao, Y.; Yu, Z. (2021). Effects of sewage sludge ash produced at different calcining temperatures on pore structure and durability of cement mortars. Journal of Material Cycles and Waste Management, 23(2): 755-763. https://doi.org/10.1007/s10163-021-01174-y

Lothenbach, B.; Scrivener, K.; Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. Cement and concrete research, 41(12): 1244-1256. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001

Lynn, C. J; Dhir, R. K.; Ghataora, G. S.; West, R. P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. Construction and Building Materials, 98: 767–779. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122

Magdziarz, A.; Dalai, A. K.; Koziński, J. A. (2016). Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes. Fuel, 176: 135-145. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.069

Mejdi, M.; Saillio, M.; Chaussadent, T.; Divet, L.; Hamou, A. T. (2020). Hydration mechanisms of sewage sludge ashes used as cement replacement. Cement and Concrete Research, 135: 106115. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106115

Melo, K. A. De. (2005). Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário.183 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Naamane, S.; Rais, Z.; Taleb, M. (2016). The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. Construction and Building Materials, 112: 783-789. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.121

Oliva, M.; Vargas, F.; Lopez, M. (2019). Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. Journal of cleaner production, 223: 1029-1041. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.147

Ottosen, L. M.; Thornberg, D.; Cohen, Y.; Stiernström, S. (2022). Utilization of acid-washed sewage sludge ash as sand or cement replacement in concrete. Resources, Conservation and Recycling, 176: 105943. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105943

Pavlík, Zbyšek; Fořt, J.; Záleská, M.; Pavlíková, M.; Trník, A.; Medved, I.; Keppert, M.; Koutsoukos, P. G.; Černý, R. (2016). Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. Journal of Cleaner Production, 112: 409-419. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.072

Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Soriano, L. (2018). Sewage sludge ash. In: DE BRITO, Jorge; AGRELA, Francisco (Ed.). New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete. Woodhead Publishing, p. 121 152.

Piasta, W.; Lukawska, M. (2016). The effect of sewage sludge ash on properties of cement composites. Procedia engineering, 161: 1018-1024. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.842

Rutkowska, G.; Chalecki, M.; Żółtowski, M. (2021). Fly ash from thermal conversion of sludge as a cement substitute in concrete manufacturing. Sustainability, 13(8): 4182. https://doi.org/10.3390/su13084182

Rutkowska, G.; Ogrodnik, P.; Żółtowski, M.; Powęzka, A.; Kucharski, M.; Krejsa, M. (2022). Fly Ash from the Thermal Transformation of Sewage Sludge as an Additive to Concrete Resistant to Environmental Influences in Communication Tunnels. Applied Sciences, 12(4): 1802. https://doi.org/10.3390/app12041802

Scrivener, K.; Juilland, P.; Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, 78: 38-56. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025

Scrvivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M. (2016). Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions for a Low-CO_2. Cement and Concrete Research, 114: 2-26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015

Skibsted, J.; Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cement and Concrete Research, 124: 105799. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799

Świerczek, L.; Cieślik, B. M.; Konieczka, P. (2021). Challenges and opportunities related to the use of sewage sludge ash in cement-based building materials–A review. Journal of Cleaner Production, 287: 125054. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125054

Von Sperling, M. (2014). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4ª edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Vouk, D.; Nakic, D.; Štirmer, N.; Cheeseman, C. R. (2018). Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary cementitious material. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(3): 1458-1467. https://doi.org/10.1007/s10163-018-0707-8

Vouk, D.; Serdar, M.; Vučinić, A. A. (2017). Use of incinerated sewage sludge ash in cement mortars: case study in Croatia. Tehnicki vjesnik/Technical Gazette, 24(1): 43-51. DOI: 10.17559/TV-20150901095705

YANG, Y.; WU, Z.; HU, X.; Z, J.; LONG, W.; DONG, B. Performance and microstructure of sintered sludge ash-modified cement paste. Journal of Building Engineering, v. 91, p. 109503, 2024.

Zdeb, T.; Tracz, T.; Adamczyk, M. (2022). Physical, mechanical properties and durability of cement mortars containing fly ash from the sewage sludge incineration process. Journal of Cleaner Production, 345: 131055. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131055

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM USO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Alan Sousa de Moura[a]; Heloina Nogueira da Costa[a]; Antônio Eduardo Bezerra Cabral[a]

[a]Universidade Federal do Ceará, Av. Humberto Monte, S/N, Campus do Pici – Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: ousaalan834@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste artigo é avaliar o efeito do uso do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como material cimentício suplementar na resistência à compressão e na durabilidade do concreto. O RCV foi beneficiado e caracterizado físico-química e microestruturalmente. A atividade pozolânica foi avaliada pelo método Chapelle modificado e pelo método da resistência à compressão relativa. A substituição de cimento Portland (CP) por RCV no concreto foi realizada nos teores de 5%, 10% e 15%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 1, 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Aos 28 dias, foram medidos parâmetros de durabilidade (absorção de água, índice de vazios e penetração de água sob pressão). O RCV apresentou atividade pozolânica com índice de desempenho de 91,7% e índice Chapelle de 557 mg de $Ca(OH)_2$. O teor de substituição de 10% de RCV apresentou o melhor resultado na resistência à compressão (45,1 MPa aos 91 dias), superando o concreto de referência. Teores de 10% e 15% de RCV estiveram associados a aumentos na absorção de água, índice de vazios e penetração de água sob pressão.

Palavras-chave: Resíduo de Cerâmica Vermelha, Material cimentício suplementar, Atividade Pozolânica, Desempenho Mecânico, Durabilidade**.**

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais residuais na fabricação de produtos à base de cimento Portland apresenta potencial para diminuir as emissões de dióxido de carbono atmosférico. Assim como, reduzir o consumo de energia e contribuir para a mitigação do impacto ambiental associado ao descarte desses materiais. Além disso, pode resultar em melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto.

A indústria da construção gera um impacto ambiental significativo, sendo responsável por mais de 4 bilhões de toneladas de cimento produzidas anualmente. A produção de clínquer na indústria de cimento contribui com 8% das emissões totais de CO_2 no mundo, correspondendo a aproximadamente 0,83 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento produzida (Ali *et al*., 2011; Teklay *et al*., 2016; Lehne e Preston, 2018). Estima-se que a produção global de cimento atinja 5 bilhões de toneladas nos próximos 30 anos, o que implicará em um aumento nas emissões de CO_2 (Lehne e Preston, 2018).

A redução do fator clínquer através do uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) pode reduzir as emissões de CO_2 em torno de 30% a 40%, sem comprometer significativamente o desempenho em resistência mecânica, durabilidade e custos do material (Skibsted e Snellings, 2019). Portanto, essa abordagem é altamente atrativa para o setor da construção civil. No Brasil, os teores de substituição de clínquer permitidos são de até 25% para fíller, 50% para pozolanas e 75% para materiais cimentícios, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2018).

Os MCS pozolânicos são constituídas de materiais silicosos finamente fragmentados que, incorporados ao cimento e concreto, interagem quimicamente e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, transformando a microestrutura do material. A reação entre a adição mineral e o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$], produzido ao longo dessa hidratação, forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo designada como reação pozolânica (Dal Molin, 2011).

Os materiais pozolânicos comumente utilizados na produção de cimento Portland incluem cinzas volantes e argilas naturais, mas uma variedade de materiais residuais ou subprodutos de outros processos industriais também pode ser aproveitada, como sílica ativa, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana, entre outros (Skibsted e Snellings, 2019). Devido à grande geração de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) nas fábricas cerâmicas, o reaproveitamento desse resíduo representa uma fonte alternativa de MCS. Os tijolos cerâmicos, muitas vezes, quebram durante o manuseio e transporte ou são descartados durante o controle de qualidade, resultando em até 30% de RCV (Carvalho *et al*., 2020).

O RCV é altamente durável e resistente tanto química quanto fisicamente às condições ambientais adversas. Apesar de serem utilizados em pequenas aplicações como pavimentos e jardinagem, grandes quantidades desses resíduos ainda são depositadas em aterros (Samadi *et al*., 2020). Estudos sobre a atividade pozolânica do RCV em pastas e argamassas indicam uma maior densificação na matriz cimentícia, resultando em menor porosidade, melhor resistência mecânica e maior durabilidade (Silva *et al.,* 2008; Hoppe Filho *et al.,* 2021; Pereira *et al*., 2023). Contudo, o estudo do uso do RCV na substituição parcial do cimento Portland nas propriedades do concreto ainda não foi amplamente explorado. Assim, o objetivo deste artigo é avaliar o efeito do uso do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) em substituição de 5%, 10% e 15% ao cimento Portland na resistência à compressão e na durabilidade do concreto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O RCV foi obtido a partir de blocos rejeitados na produção de uma indústria local (APL do Baixo Jaguaribe - Ceará - Brasil). O resíduo foi processado em um britador de mandíbulas, reduzindo parcialmente a sua granulometria. Posteriormente, foi moído em um moinho de bolas por um período de 6 horas ininterruptas e peneirado em malha de 45 µm. Na Figura 1 é apresentado um resumo das atividades desenvolvidas no programa experimental.

Figura 1 – Resumo do programa experimental

A caracterização de dimensões de partículas foi realizada por granulometria a laser, no qual apresentou D10 igual a 7,76 µm, D50 igual a 27,52 µm, e D90 igual a 52,87 µm. A massa específica foi 2,64 g/cm^3, conforme procedimento da norma brasileira NBR 16605 (ABNT, 2017). A composição química foi obtida pela técnica de fluorescência de raios X (FRX) (Quadro 1).

Quadro 1 - Composição química do RCV

Constituinte	PF	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Eq. Alcalino
% em massa	1,40	57,57	21,07	9,00	1,97	0,15	0,02	2,14	2,96	4,09

Legenda: PF = perda ao fogo; Eq. Alcalino = equivalente alcalino.

A cerâmica é constituída principalmente de placas alongadas e de formato irregular, com superfície rugosa e de tamanhos variados de grãos, conforme análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentada na Figura 2 em quatro ampliações: a) 500x; b) 1500x; c) 5000x; e d) 10000x.

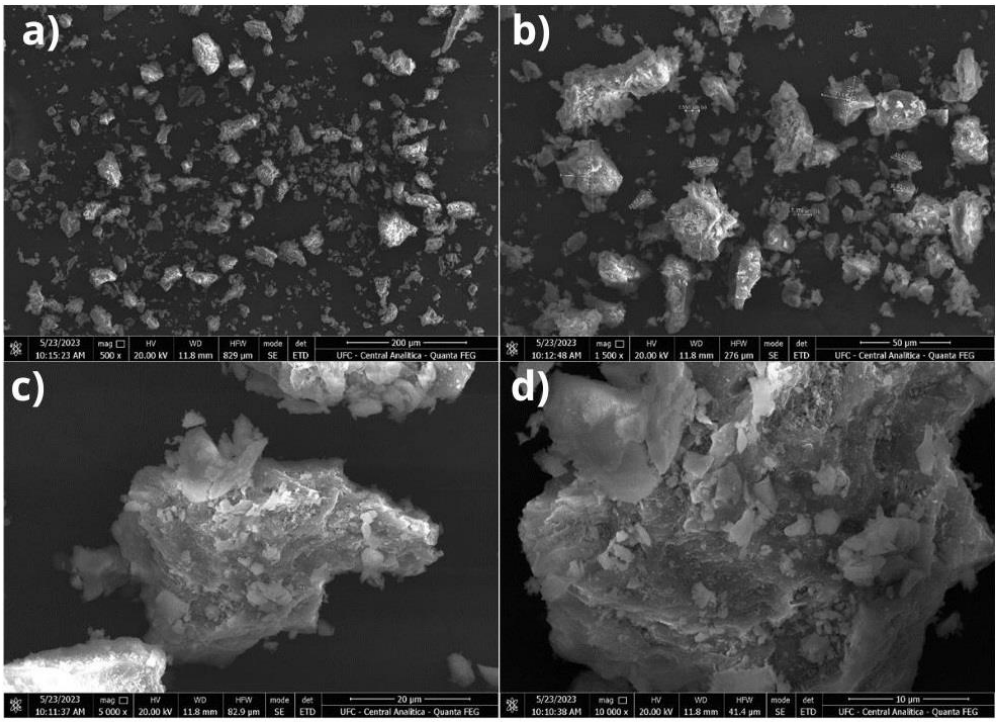


Figura 2 – Microscopia do resíduo de cerâmica vermelha processada: a) 500x; b) 1500x; c) 5000x; e d) 10000x

Para a produção dos compósitos, utilizou-se o cimento CP V (alta resistência inicial – ARI), conforme as especificações da norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018), areia natural de leito de rio e pedra britada, cujas características granulométricas e curva granulométrica estão apresentadas na Figura 3.

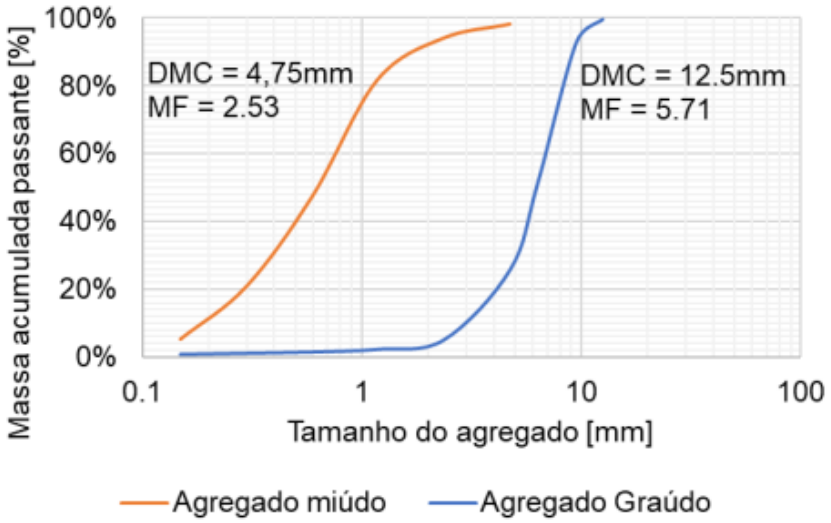


Figura 3 – Curva granulométrica dos agregados

A massa específica do agregado miúdo foi de 2,66 g/cm³ e a absorção de água de 0,13%, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021). Para o agregado graúdo, foi obtida uma massa específica de 2,63 g/cm³ e absorção de água de 0,81%, conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021).

A água de amassamento utilizada na mistura do concreto foi da rede pública de abastecimento, sendo considerada potável e classificada, de acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), como adequada para uso na produção de concretos, sem a necessidade de ensaios específicos. Também foi utilizado um aditivo superplastificante para atingir a trabalhabilidade requerida do concreto.

2.2 MÉTODO DE PESQUISA

A atividade pozolânica do RCV foi testada por meio do Ensaio Chapelle Modificado, que fornece o teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em miligramas (mg) de $Ca(OH)_2$ por grama (g) de material, conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010), e pelo método da resistência à compressão relativa, conforme o procedimento descrito na NBR 5752 (ABNT, 2014). Este método consiste na produção de uma argamassa padrão (substituição de 25% de cimento Portland por RCV) e na determinação da resistência à compressão. Aos 28 dias, é determinado o índice de desempenho do material a partir da relação entre a resistência obtida na argamassa com substituição e a argamassa apenas com cimento.

Os concretos foram produzidos com a substituição em volume do cimento CPV ARI por RCV em 5% (T5), 10% (T10) e 15% (T15). Utilizou-se a proporção de materiais igual a 1:2:3:0,5:0,6% (Cimento : Areia : Brita : Relação água/cimento : Aditivo superplastificante), em massa, para produzir o concreto de referência (TREF), classificado como concreto estrutural. A proporção de aditivo em relação à massa de aglomerante foi determinada por testes laboratoriais, visando atender aos requisitos da NBR 8953 (ABNT, 2015) para manter o abatimento na classe S160 (valores de abatimento entre 160 mm e 220 mm). As massas de materiais para 1 m³ de concreto estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Consumo de materiais para 1 m^3 de concreto

Traço	Cimento (Kg)	RCV (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (L)	Aditivo Superplastificante (Kg)
TREF	356,6	0,0	713,1	1069,7	178,3	2,14
T5	341,1	15,4	713,1	1069,7	178,3	2,14
T10	325,7	30,9	713,1	1069,7	178,3	2,14
T15	310,3	46,3	713,1	1069,7	178,3	2,14

O concreto foi produzido em misturador de eixo inclinado. Em seguida, foi realizado o ensaio para determinação da consistência pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test) (ABNT NBR 16889, 2020) com a finalidade de verificar o enquadramento na classe de abatimento de 160 mm a 220 mm, definida como padrão para todos os concretos. Foram moldados corpos de prova cilíndricos (100x200 mm), conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), adensados mecanicamente. Os corpos de prova permaneceram nas condições ambientais do laboratório, protegidos de intempéries durante as

primeiras 24 horas. Em seguida, foram submetidos à cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, na temperatura de 23 °C ± 2 °C, até as idades a serem ensaiadas.

O ensaio de resistência à compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), foi realizado na máquina universal EMIC com capacidade de 2000 kN. A ruptura foi realizada em três exemplares para as idades de 1, 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Aos 28 dias, foram utilizados dois exemplares para a execução do ensaio de determinação da absorção de água e índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). Também foi realizada a determinação da penetração de água sob pressão, conforme a NBR 10787 (ABNT, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ATIVIDADE POZOLÂNICA

A Figura 4 apresenta os resultados da resistência à compressão relativa das argamassas, o índice de desempenho de atividade pozolânica e o índice Chapelle.

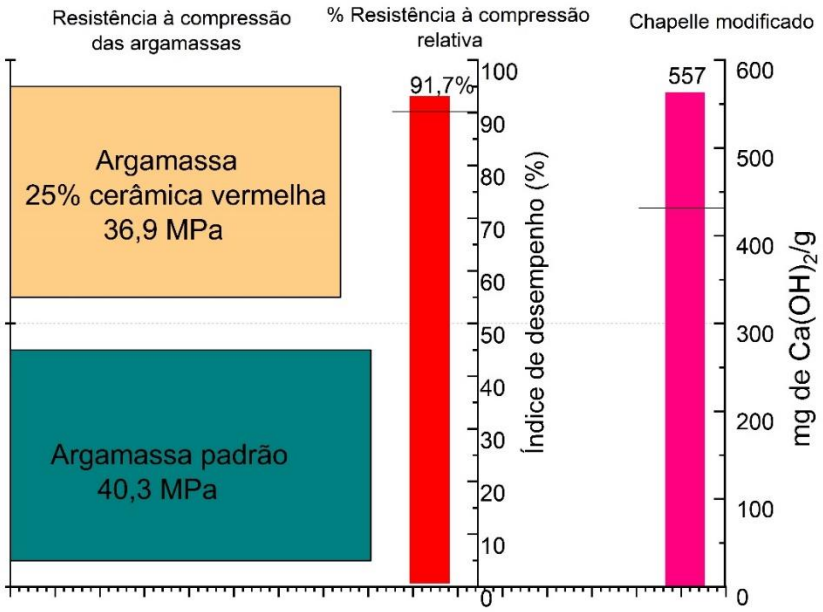


Figura 4 – Atividade pozolânica do RCV

O RCV apresentou atividade pozolânica, conforme o registro do índice de desempenho superior a 90%, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), e o índice Chapelle superior a 436 mg de $Ca(OH)_2$, conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010; Raverdy *et al*., 1980) (Figura 2). Estudos anteriores apontam que a fragmentação e moagem de resíduos de RCV promovem a reatividade das partículas finas (<75 µm). Contudo, a composição química da matéria-prima (argila) e a temperatura de sinterização também influenciam (Garcia *et al*., 2015).

Em ambos os métodos, os resultados são positivos. No entanto, é importante destacar que as medidas da reatividade pozolânica foram feitas por diferentes abordagens. Enquanto o método Chapelle modificado avalia a reação química do $Ca(OH)_2$ com o RCV, no ensaio de resistência à compressão relativa, a atividade pozolânica abrange efeitos químicos e físicos. O efeito químico ocorre devido à reação química entre a alumina (Al_2O_3) e a sílica (SiO_2) amorfas presentes no material pozolânico, e a

portlandita ($Ca(OH)_2$) formada na hidratação do cimento Portland, produzindo hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), hidratos de aluminato de cálcio (C-A-H) e hidratos de aluminosilicato de cálcio (C-A-S-H), melhorando as propriedades mecânicas da matriz (Tashima, 2016).

O efeito físico é visto pelo efeito de nucleação e pelo efeito filler. O efeito de nucleação proporciona uma cinética de reação mais veloz das partículas de cimento, aumentando a quantidade de produtos hidratados em um menor intervalo de tempo, influenciando diretamente na resistência mecânica. Enquanto isso, o efeito filler é a capacidade que as partículas finas têm de preencher os vazios da matriz, tornando o material mais coeso e dificultando a ruptura (Panesar, 2019).

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A Figura 5 apresenta as medidas de resistências à compressão axial nas idades de 1, 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

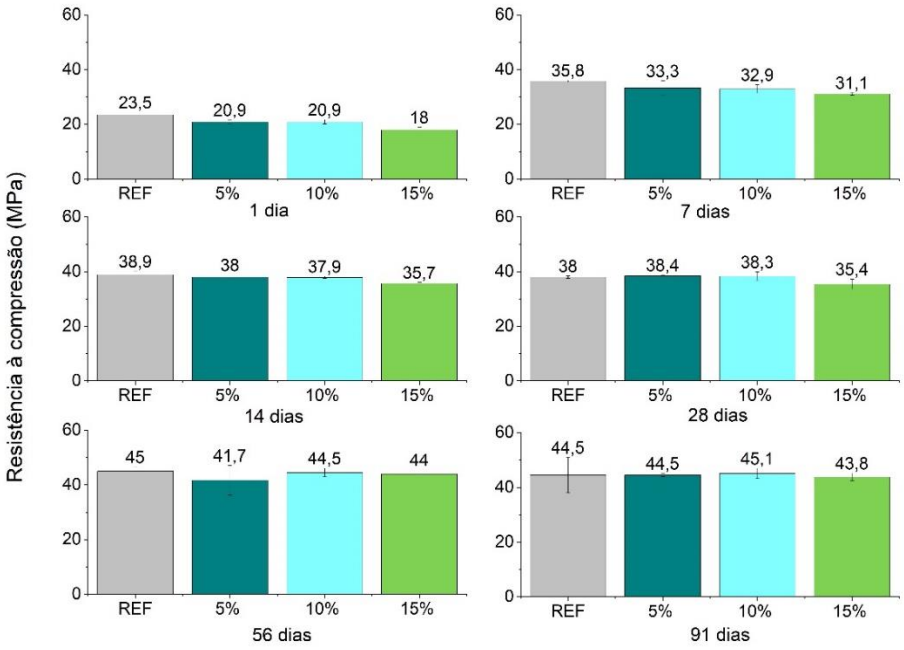


Figura 5 – Resultados de resistência à compressão axial

Observou-se que os traços contendo RCV apresentaram resistência à compressão inferior ao traço de referência até os 14 dias (Figura 5). Esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de que a reação pozolânica depende da disponibilidade de $Ca(OH)_2$ no meio, oriundo do processo de hidratação do cimento, o qual ocorre mais lentamente nas idades iniciais (Mehta e Monteiro, 2014). Contudo, a partir da idade de 28 dias, os traços com adição de 5% e 10% de RCV demonstraram resistências à compressão iguais ou superiores ao traço de referência. Segundo Hoppe Filho *et al*. (2021), em torno de 28 dias, ocorre o maior consumo de $Ca(OH)_2$ nas reações químicas secundárias com partículas de RCV. Portanto, com o decorrer do tempo, o RCV passa a contribuir positivamente para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto.

O traço com 15% de RCV apresentou resistência levemente inferior em comparação com o traço de referência. Isso indica a possibilidade de um limite ótimo de utilização. Portanto, pode-se inferir que o uso de RCV é viável em até 15%, sem que ocorra uma redução significativa da resistência à compressão em idades avançadas. Este resultado respalda a utilização sustentável do RCV como um material

cimentício suplementar eficaz na produção de concretos, permitindo a redução do impacto ambiental e mantendo o desempenho mecânico satisfatório do concreto ao longo do tempo

3.3 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

Os valores de absorção de água e índices de vazios dos concretos estão apresentados na Figura 6.

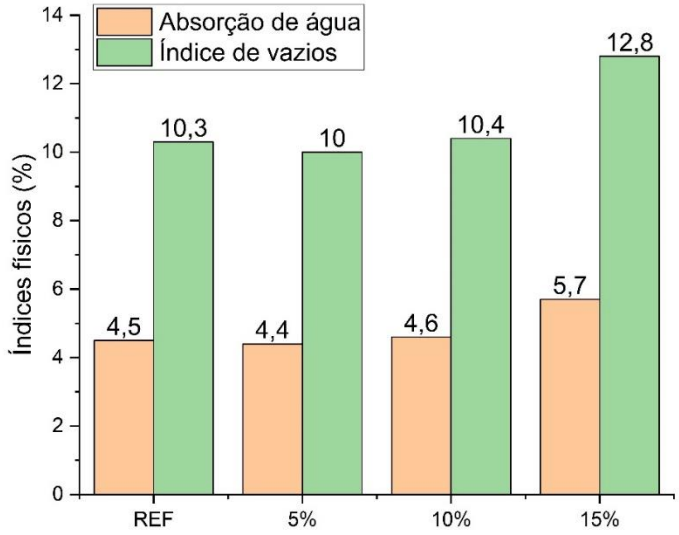


Figura 6 – Resultados de absorção de água e de índice de vazios

Nos teores de 5% e 10% de substituição de RCV, ocorreram pequenas variações nos parâmetros de absorção de água e índice de vazios em relação ao concreto de referência (Figura 6). Na absorção de água, ocorreu uma redução de 2,9% para o teor de 5% e um acréscimo de 0,1% para o teor de 10%, em relação à referência. Quanto ao índice de vazios, houve uma redução de 2,2% para o teor de 5% e um acréscimo de 2,2% para o teor de 10% de substituição de RCV. Essas variações podem estar relacionadas às pequenas variações decorrentes dos procedimentos de ensaio. Contudo, esses parâmetros também influenciam a resistência à compressão dos concretos, conforme demonstrado na Figura 5, o que mostra coerência entre os resultados.

O mesmo pode ser observado para o teor de 15% de substituição de RCV, que teve uma redução mais representativa na resistência à compressão (Figura 5) e apresentou um acréscimo de 24,3% na absorção de água e de 26,7% no índice de vazios.

O transporte de massa, e consequentemente de agentes agressivos, no concreto ocorre pelos caminhos intercomunicáveis, ou seja, a porosidade capilar. Portanto, a absorção de água no concreto é útil para revelar a maior ou menor presença desse tipo de poros. Contudo, o uso de materiais cimentícios suplementares geralmente não afeta o volume de poros, mas sim o tamanho desses poros, ocorrendo o refinamento da estrutura de poros (Linderoth, Johansson, Wadsö, 2020). Conforme Ribeiro (2018), a redução do diâmetro dos poros contribui para o aumento da sucção exercida, resultando em maiores pressões capilares para menores tamanhos de poros e, consequentemente, maior e mais rápida absorção capilar.

Portanto, o efeito dos materiais cimentícios suplementares na porosidade e no transporte de massa no concreto ainda é pouco compreendido, o que abre espaço para investigações futuras.

A Figura 7 apresenta os resultados de penetração de água sob pressão.

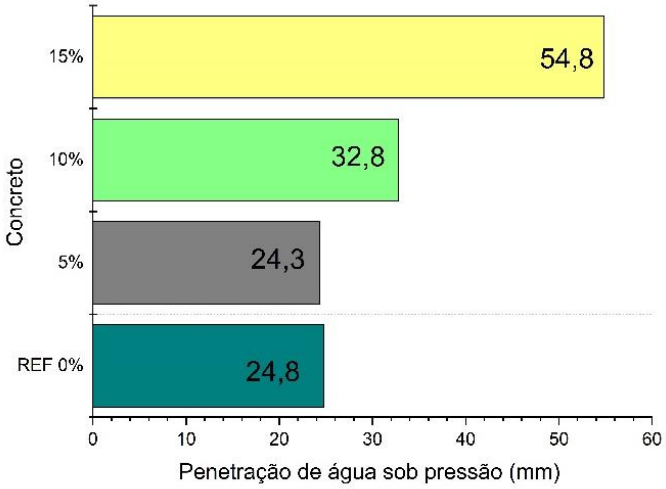


Figura 7 – Resultados de penetração de água sob pressão

No teor de 5% de substituição de RCV, observou-se uma redução de 2,0% na penetração de água sob pressão. Por outro lado, nos teores de 10% e 15% de RCV, observou-se um aumento de 32,2% e 120,9%, respectivamente. Esse comportamento reforça a complexidade do efeito dos materiais cimentícios suplementares sobre o transporte de massa nos poros do concreto, em diferentes condições, os resultados podem ser afetados por diversas variáveis. Neste caso, o efeito da pressão provocou um resultado para o teor de 10% de substituição de RCV diferente da tendência observada nas Figuras 5 e 6.

Entretanto, é necessário evidenciar a natureza dos métodos utilizados: enquanto para a absorção de água utiliza-se a massa do corpo de prova como parâmetro de medida, para a penetração de água sob pressão mede-se a altura de penetração da água (Figura 8).

Figura 8 – Medida da altura da coluna de penetração da água

Segundo Helene (1999), menores diâmetros de poros capilares podem aumentar a absorção capilar no concreto devido às maiores pressões exercidas nos mesmos. Assim, para o concreto com o teor de 10% de RCV, o efeito de refinamento de poros pode estar associado ao comportamento observado na Figura 6. No entanto, é necessário avançar na investigação da estrutura de poros.

4 CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou uma análise sobre a viabilidade do uso de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como material cimentício suplementar na produção de concreto, destacando a análise da resistência à compressão e da durabilidade. As principais contribuições do estudo são destacadas:

- O RCV apresentou atividade pozolânica com índice de desempenho de 91,7% para o método da resistência à compressão relativa em argamassas e 557 mg de $Ca(OH)_2$ pelo método Chapelle modificado. Esses resultados indicam um grau moderado de reatividade do RCV.
- A análise da resistência à compressão do concreto indica que os teores de substituição de RCV de 5% e 10% atingiram, a partir de 28 dias, valores iguais ou superiores ao concreto de referência. Aos 91 dias, a resistência à compressão foi de 44,5 MPa para o teor de 5% de RCV e de 45,1 MPa para o teor de 10% de RCV, enquanto o concreto de referência foi de 44,5 MPa. Isso indica um potencial de otimização das propriedades mecânicas do concreto com o uso de RCV.
- Os teores de 10% e 15% de RCV estiveram associados a aumentos na absorção de água, índice de vazios e penetração de água sob pressão. Especialmente para o teor de 10% de RCV, cuja resistência à compressão foi otimizada, isso pode estar associado a um possível refinamento dos poros, causando elevação da pressão capilar.

Portanto, a viabilidade do uso de RCV no concreto é evidenciada, respeitando limites ótimos de dosagem para otimizar propriedades específicas. O emprego adequado desse material pode não apenas manter, mas também aprimorar propriedades mecânicas, tornando-se uma alternativa sustentável na produção de concretos de desempenho superior. Assim, a dosagem criteriosa é essencial para equilibrar os benefícios do RCV, promovendo um material durável e resistente sem comprometer as características essenciais do concreto. Este estudo contribui significativamente para o conhecimento prático da utilização do RCV, orientando a indústria da construção na busca por soluções mais sustentáveis e eficientes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro (Projeto 409236/2022-5).

REFERÊNCIAS

Ali, M.B., Saidur, R., Hossain, M.S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (5), 2252–2261. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT; 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15895. Materiais pozolânicos- Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT; 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento. Rio de Janeiro: ABNT; 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT; 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT; 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 8953: Concreto para fisn estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.

ASTM C 1202 - 97. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials, USA, 1997.

Carvalho, C. M., Barbosa, N. P., Bezerra, U. T., & Simas, T. B. (2020). Red ceramic industry residues: Used to produce Portland cement. Case Studies in Construction Materials, 13, e00449. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00449

Dal Molin, D.C.C, "Adições Minerais", In: Isaia, G.C. (eds), Concreto: ciência e tecnologia, São Paulo, Brasil, IBRACON, 2011.

Garcia, E., Cabral Junior, M., Quarcioni, V. A., & Chotoli, F. F. (2015). Evaluation of the pozzolanic activity of heavy clay ceramic waste from main ceramic clusters of S. Paulo State, Brazil. Ceramica, 61(358), 251–258. https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581847

Gonçalves, J. P.(2007). Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. Revista Escola de Minas, vol. 60, Ouro Preto - MG – Brazil.

Hoppe Filho, J., Pires, C. A. O., Leite, O. D., Garcez, M. R., & Medeiros, M. H. F. (2021). Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. Construction and Building Materials, 296, 123653. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123653

Lehne, J. and Preston, F. (2018) 'Making Concrete Change Innovation in Low-carbon. Cement and Concrete The Royal Institute of International Affairs, Chatham House Report Series, www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13 makingconcrete-c', p. 138. Available at: www.chathamhouse.org.

Linderoth, O., Johansson, P., & Wadsö, L. (2020). Development of pore structure, moisture sorption and transport properties in fly ash blended cement-based materials. Construction and Building Materials, 261, 120007. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120007

Mehta, P. K., Monteiro, P J.M (2014). Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª edição. São Paulo: Ibracon.

Panesar, D. K. Supplementary cementing materials. In: Mindess, S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2. ed. Toronto: Elsevier, 2019. Cap. 3, p. 55–85.

Pereira, V. L. S., Rêgo, J. H. da S., & Hoppe Filho, J. (2023). Comparação da reatividade de resíduo de cerâmica vermelha cominuído e matéria-prima de olaria calcinada. Ambiente Construído, 23(4), 255–272. https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400702

Raverdy, M., Brivot, E., Paillkre, A. M., Dron, R. (1980). "Appréeiation de I'aetivité pouzzolanique des onstituants seeondaires" - Te. Congrés International de Ia Phimie deâ Piments Volume 111-4, 36. Paris.

Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V, Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. Construction and Building Materials, 43, 98–106. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031

Ribeiro, D.V. [2018]. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análises e intervenção. 2ª edição. Rio de janeiro: Elsevier, 2018.

Samadi, M., Huseien, G. F., Mohammadhosseini, H., Lee, H. S., Abdul Shukor Lim, N. H., Tahir, M. M., & Alyousef, R. (2020). Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. Journal of Cleaner Production, 266, 121825. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825

Silva, J., de Brito, J., Veiga, R. (2008). Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. Mater Struct 41, 1333–1344

Skibsted, J., Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cement and Concrete Research, v. 124, n. May, p. 105799.

Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L. (2016). Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO2 footprint from cement industry. Appl. Energy 162, 1218–1224. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.127.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REFLEXÃO SOBRE O SISTEMA DE ETIQUETAGEM DE JANELAS

Nuno Simões[a,b], Joana Prata[b,c], Rita Garcia[b,c], Paulo Santos[d], Bruna Morais[d]

[a] (Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal), nasimoes@dec.uc.pt

[b] (Itecons, Coimbra, Portugal)

[c] (Universidade de Coimbra, CERIS, Coimbra, Portugal), jprata@itecons.uc.pt, rita.garcia@itecons.uc.pt

[d] (ADENE – Agência para a Energia, Lisboa, Portugal), paulo.santos@adene.pt, bruna.morais@adene.pt

RESUMO

A ambição principal da etiquetagem energética de produtos é contribuir para a redução de consumos energéticos associados à operação de edifícios. A etiqueta pretende informar de forma clara e simples os consumidores, permitindo-lhes fazer uma comparação direta de produtos no que diz respeito ao seu desempenho energético, minimizando os custos energéticos para o utilizador e promovendo globalmente a sustentabilidade. Apesar da maior incidência das etiquetas recair sobre eletrodomésticos, equipamentos eletrónicos (televisões, computadores, etc.) e sistemas de iluminação, também tem havido iniciativas em vários países do mundo para incluir produtos de construção. Um dos produtos de construção que tem tido mais destaque é o caso das janelas. Em Portugal, com base numa metodologia de cálculo desenvolvida pelo Itecons, a ADENE lançou e gere o sistema CLASSE+, que, no caso do sistema de etiquetagem de janelas, conta com mais de 10 anos e com cerca de meio milhão de etiquetas emitidas. Neste artigo apresenta-se uma reflexão sobre o sistema de etiquetagem de janelas com base numa análise técnica e estatística das etiquetas emitidas. Para esta análise crítica, procedeu-se à avaliação de um caso de estudo de uma moradia, estimando-se o impacto que a alteração das janelas com diferentes classes teria no desempenho energético do edifício. Com base neste estudo faz-se uma reflexão sobre aquela que pode ser a evolução do sistema de etiquetagem de janelas em Portugal enquanto instrumento de comunicação e promoção da eficiência energética de elementos construtivos da envolvente dos edifícios.

Palavras-chave: Janelas; Etiquetagem energética; Edifícios; Desempenho energético

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção é responsável por 40% do consumo de energia na União Europeia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa (Comissão Europeia 2020), o que conduziu à necessidade de criar planos europeus que contribuam para a redução destes valores. A proposta de revisão da Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios visa reduzir progressivamente as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e o consumo de energia no sector da construção da UE, de forma a alcançar o objetivo de um impacto neutro no clima em 2050. Com este objetivo, surge a necessidade de transitar para níveis mais exigentes de desempenho nos edifícios, nomeadamente edifícios com necessidades energéticas quase nulas (nZEB) e edifícios com zero emissões de carbono (ZEB) (Parlamento Europeu 2023). A escolha de soluções construtivas com maior desempenho térmico para a envolvente dos edifícios torna-se assim fundamental (Nair *et al*. 2022).

As janelas representam um dos elementos da envolvente com pior desempenho térmico, sendo responsáveis por 20% a 60% das perdas de energia nos edifícios, dependendo da idade, tipologia e tamanho dos mesmos (Moghaddam *et al*. 2023). Valores elevados do coeficiente de transmissão térmica (U_w) são responsáveis por um maior consumo de energia para aquecimento enquanto que valores elevados do fator solar do vidro (g) conduzem a maiores necessidades de energia para arrefecimento. Um maior desempenho energético das janelas depende assim da correta combinação entre ambos os fatores (Moghaddam *et al*. 2023; Wu e Skye 2021; Gasparella *et al*. 2010).

A escolha de janelas com elevado desempenho energético constitui assim uma atual oportunidade de melhoria, quer para edifícios novos quer para projetos de renovação de edifícios existentes (Karlsson e Roos 2003), uma vez que contribuirá para a redução do consumo de energia nos edifícios, diminuindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento, ao mesmo tempo que favorecem a iluminação e ventilação natural. No entanto, a escolha de janelas energeticamente mais eficientes requer a existência de informação sobre o seu desempenho que seja clara e comparável, permitindo aos projetistas e consumidores finais tomar decisões adequadas na escolha do produto. Um sistema de classificação energética, à semelhança do utilizado nos eletrodomésticos e sistemas de iluminação, permite não só fornecer informação clara e precisa sobre o desempenho da janela, como contribui para a melhoria da qualidade dos produtos existentes no mercado (Trząski e Rucińska 2015).

Para facilitar a escolha de janelas mais eficientes, a ADENE – Agência para a Energia criou o sistema de etiquetagem energética CLASSE+, que tem como base a metodologia de cálculo descrita por Simões *et al.* (2012), desenvolvida pelo Itecons, de acordo com os pressupostos indicados na norma ISO 18292:2011. De acordo com a metodologia desenvolvida para o Classe+, a classe energética das janelas depende de diferentes fatores, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica da janela, o fator solar do vidro e a classe de permeabilidade ao ar da janela, fatores estes que condicionam fortemente o desempenho térmico da envolvente dos edifícios. Por este motivo, considera-se que a classificação energética de janelas constitui uma ferramenta importante na escolha de soluções eficientes para a construção e reabilitação de edifícios com vista a melhoria do seu desempenho energético. No entanto, não existem estudos que quantifiquem o impacte das diferentes classes de janelas no desempenho energético e na classe energética de edifícios.

O presente estudo teve assim como objetivo avaliar o impacte da substituição de janelas existentes por janelas com classes energéticas superiores no desempenho térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar existente. Numa fase inicial do estudo fez-se uma análise de todas as etiquetas emitidas no âmbito do sistema Classe+ de forma a verificar como se relacionam as atuais escalas de classificação energética com as diferentes tipologias de janelas e respetivos parâmetros térmicos. Com base nos resultados obtidos, apresenta-se por fim uma reflexão sobre a importância de uma

atualização dos atuais níveis de classificação energética das janelas e da incorporação de parâmetros adicionais na etiqueta relacionados com segurança, sustentabilidade e o alinhamento com a taxonomia europeia.

2 ANÁLISE DE DADOS DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE JANELAS

A presente secção inclui os principais resultados da análise dos dados do sistema nacional de etiquetagem energética de janelas Classe+. Os dados analisados foram disponibilizados pela ADENE e referem-se a todas as etiquetas emitidas pelo sistema Classe+ até setembro de 2023.

2.1 ANÁLISE DE DADOS DO SISTEMA CLASSE+

De acordo com os dados fornecidos pela ADENE, foram emitidas mais de 490 mil etiquetas desde a implementação do sistema nacional de etiquetagem de janelas Classe+. De todas as etiquetas emitidas, 91,4% são classe A+, 6,8% são classe A e 1,6% são classe B. As classes C, D, E e F representam apenas 0,2% das janelas etiquetadas. Verificou-se ainda que 95,9% das janelas etiquetadas têm classe de permeabilidade ao ar 4, 3,9% têm classe de permeabilidade ao ar 3 e as restantes 0,2% têm classe de permeabilidade ao ar 1 ou 2. Registe-se que o sistema é de regime voluntário, compreendendo-se que as empresas procedam sobretudo à etiquetagem dos seus melhores produtos.

A Figura 1 apresenta, para diferentes intervalos de coeficiente de transmissão térmica, U_w, a percentagem de etiquetas referentes a cada uma das classes energéticas. É possível verificar que, cerca de 40% das janelas com etiqueta classe A+ têm valor de U_w igual ou superior a 1,4 e inferior a 1,6 W/m^2.°C, o que corresponde a cerca de 182 mil janelas etiquetadas. Outras 25% têm U_w entre 1,2 e 1,4 W/m^2.°C e apenas 1,0% das janelas com a mesma classe têm U_w entre 1,8 e 2,0 W/m^2°C. Relativamente às janelas com classe A, verifica-se que 29% têm um valor de U_w entre 1,6 e 1,8 W/m^2°C e 27% têm entre 1,8 e 2,0 W/m^2.°C. Note-se ainda que, de acordo com o gráfico, 25% das janelas com classe E têm U_w entre 1,2 e 1,4 W/m^2.°C, o que corresponde a 12 etiquetas emitidas, tendo estas um fator solar do vidro e uma classe de permeabilidade ao ar baixos.

A Figura 2 apresenta, para diferentes intervalos de fator solar do vidro, g, a percentagem de etiquetas referentes a cada uma das classes energéticas. É possível verificar que a maior parte das janelas etiquetadas têm um valor de g igual ou superior a 0,4 e inferior a 0,7. 40% das janelas apresentam um valor de g entre 0,4 e 0,5, o que corresponde a cerca de 194 mil janelas etiquetadas. 37% (cerca de 179,6 mil janelas) têm valor de g entre 0,6 e 0,7 e outras 11% têm entre 0,5 e 0,6. Das janelas com g entre 0,4 e 0,7, cerca de 82% têm classe A+ e 4% têm classe A.

De acordo com os dados do Classe+, verificou-se ainda que a maior parte das janelas etiquetadas com classe energética A+, A e B têm caixilharia em PVC. O número de janelas etiquetadas com caixilharia em PVC ultrapassa os 450 mil seguindo-se a caixilharia em alumínio com corte térmico com cerca de 33 mil janelas etiquetadas. Os restantes tipos de caixilharia correspondem a menos de 1% das janelas etiquetadas no âmbito do sistema Classe+.

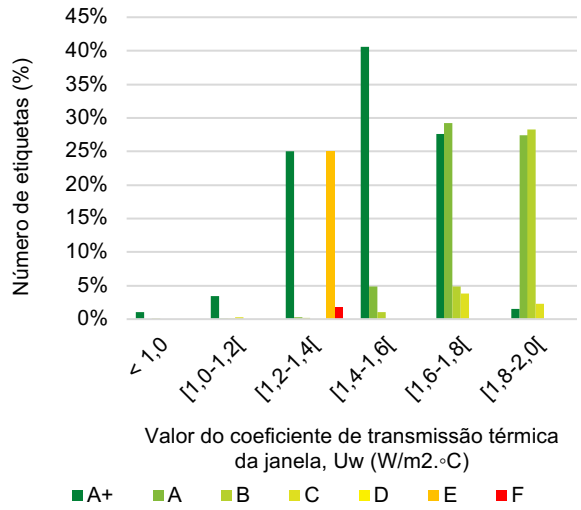


Figura 1: Variação da classe energética das janelas com o valor de U_w.

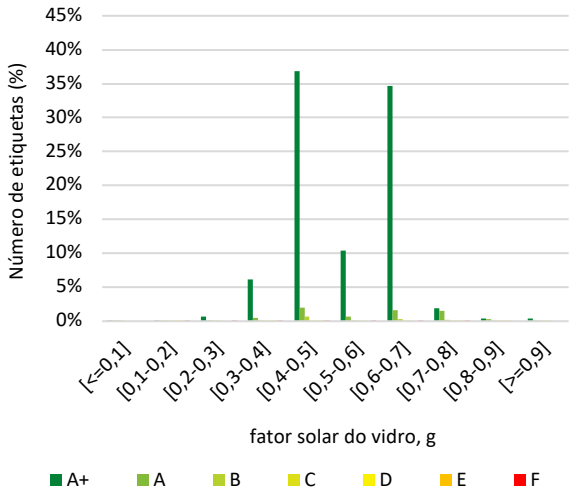


Figura 2: Variação da classe energética das janelas com o valor de g.

3 IMPACTE DA CLASSE ENERGÉTICA DAS JANELAS NO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UM EDIFÍCIO

No presente estudo avaliou-se o impacte da substituição de janelas existentes por janelas com classes energéticas superiores no desempenho térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar existente. Para isso determinara-se as perdas de calor através da envolvente do edifício bem como as necessidades nominais anuais de energia útil e primária considerando diferentes classes energéticas para as janelas. De modo a avaliar o impacte da substituição das janelas no edifício juntamente com outras medidas de melhoria de comportamento térmico da envolvente, fez-se a análise considerando diferentes soluções de isolamento para a envolvente exterior opaca vertical e diferentes zonas climáticas de inverno e de verão: I1, V3 (Évora); I2, V2 (Coimbra); I3, V2 (Bragança). A metodologia de cálculo utilizada foi a preconizada no Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro.

3.1 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo corresponde a um edifício de habitação unifamiliar existente (Figura 3) de tipologia T4, com uma área útil de pavimento de 315 m^2, classe de inércia térmica média, e fachadas orientadas a NE, SE, SO e NO. Para climatização de todos os espaços principais e zonas de circulação está instalado um sistema de bomba de calor ar-ar com um SCOP de 4,0 e um SEER de 6,4.

Figura 3: Caso de estudo – Edifício de habitação unifamiliar existente.

No estudo realizado consideraram-se diferentes soluções de isolamento para a envolvente exterior opaca vertical (paredes exteriores e pontes térmicas planas): paredes sem isolamento térmico; paredes com ETICS com 4 cm de EPS; paredes com ETICS com 8 cm de EPS. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos respetivos coeficientes de transmissão térmica, U, calculado com base nos materiais que constituem as soluções construtivas da envolvente do edifício e respetivas propriedades térmicas, retiradas da publicação do LNEC "ITE50 – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios".

Tabela 1: Soluções construtivas constituintes da envolvente exterior opaca.

Tipo	U [W/m^2.°C]		
	Sem isolamento	ETICS (EPS 4 cm)	ETICS (EPS 8 cm)
Parede exterior	1,02	0,52	0,35
Parede exterior (PTP)	2,93	0,78	0,45

Para a envolvente envidraçada consideraram-se diferentes cenários (ver Tabela 2) com diferentes valores de Uw, de forma a avaliar o impacte da aplicação de janelas com as seguintes classes energéticas: D, C, B, A e A+. O objetivo é verificar qual o impacte da substituição de janelas com classe D por outras com classe energética superior. Considerou-se uma classe de permeabilidade ao ar 4 e um fator solar do vidro de 0,5 em todos os cenários.

Tabela 2: Classe energética e valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas (considerando g = 0,5 e classe 4 de permeabilidade ao ar).

	Classe Energética das Janelas				
	A+	A	B	C	D
U_w (W/m^2.°C)	1,7	2,2	3,1	4,0	4,9

3.2 RESULTADOS

Na Figura 4 são apresentadas as perdas de calor pelos vãos envidraçados (em W/°C) considerando cada uma das classes energéticas das janelas e as três soluções de isolamento térmico analisadas. Os gráficos permitem verificar que, ao substituirmos janelas de classe D por janelas de classe A+ ou A as perdas de calor através dos vãos envidraçados reduzem para menos de metade qualquer que seja o cenário considerado. O mesmo acontece quando substituímos janelas com classe C por janelas com classe A+.

A Figura 5 apresenta o peso dos vãos envidraçados nas perdas de calor pela envolvente exterior do edifício (em %), considerando as diferentes soluções para as janelas e envolvente opaca. É possível verificar que, quanto melhor a classe energética das janelas, menor o peso dos vãos envidraçados nas perdas de calor pela envolvente exterior do edifício. Ao substituirmos janelas de classe D por janelas de classe A+ o peso dos vãos envidraçados diminui mais de 40%, podendo esta redução chegar acima dos 50% em envolventes sem isolamento térmico. No caso de, na envolvente do edifício, ter sido instalado o sistema ETICS constituído por 8 cm de EPS e as janelas serem Classe D, 52% das perdas totais de calor pela envolvente exterior do edifício ocorre pelos vãos envidraçados. Neste caso, se as janelas forem substituídas por janelas com classe A+, esta percentagem reduz para 27%.

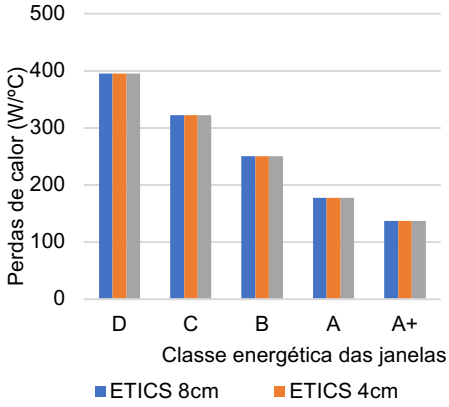


Figura 4: Perdas de calor pelos vãos envidraçados (em W/ºC)

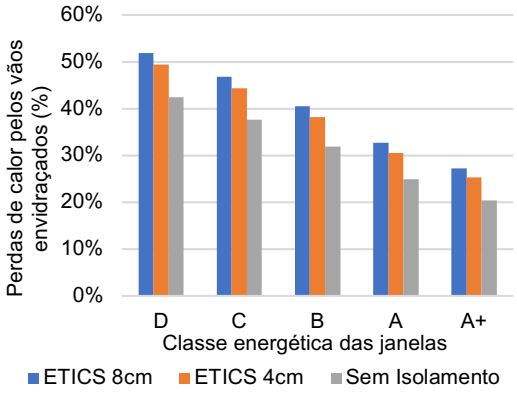
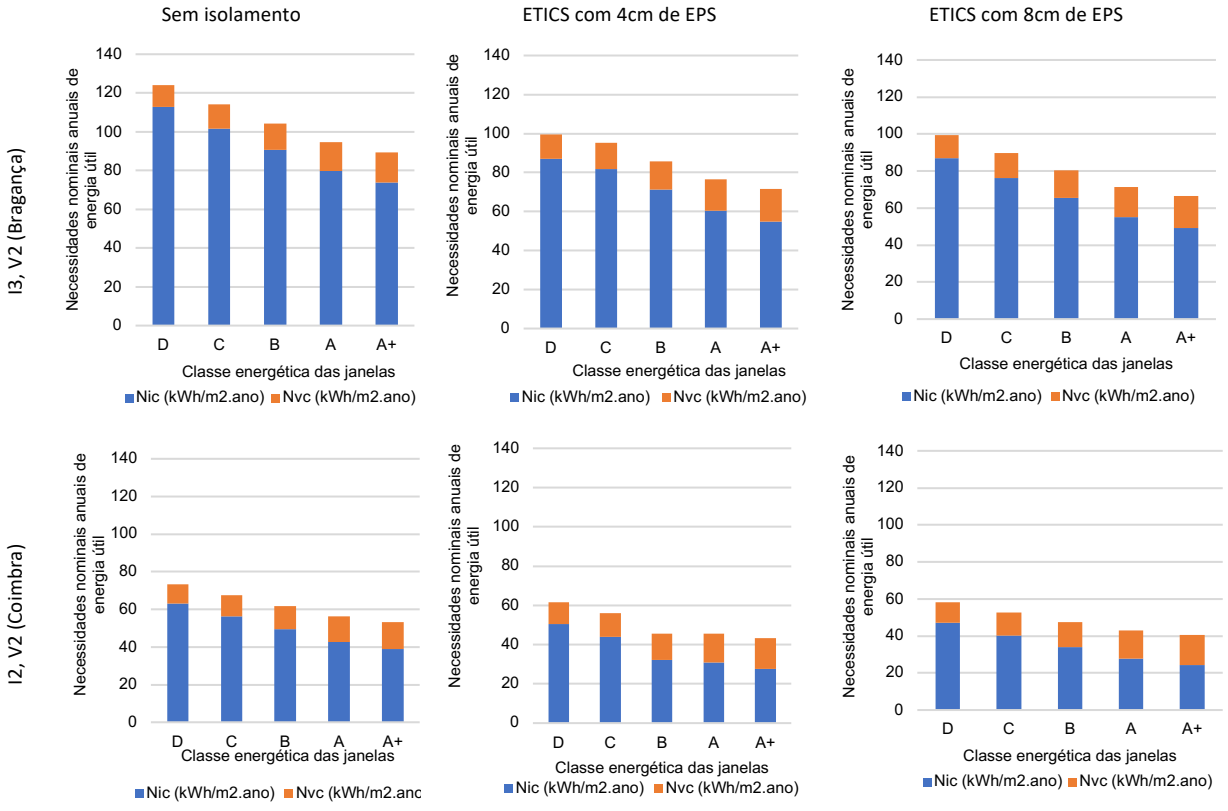


Figura 5: Peso dos vãos envidraçados nas perdas de calor pela envolvente exterior do edifício

Os gráficos da Figura 6 mostram a variação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) e para arrefecimento (N_{vc}) com a classe energética das janelas, para as diferentes zonas climáticas consideradas (I3, V2 (Bragança); I2, V2 (Coimbra); e I1, V3 (Évora), respetivamente) e tendo em conta as diferentes soluções de isolamento térmico. Os resultados obtidos permitem verificar que, ao substituirmos janelas de classe D por janelas de classe superior, reduzimos substancialmente o valor do N_{ic} do edifício, podendo essa redução atingir os 48% numa envolvente fortemente isolada e 38% numa envolvente sem isolamento térmico. Por outro lado, com janelas com classe superior obtiveram-se valores de N_{vc} mais altos, podendo esse aumento chegar aos 44% em zonas climáticas V2, mas sendo, no entanto, muito reduzido em zonas climáticas V3 (apenas cerca de 5% superior).



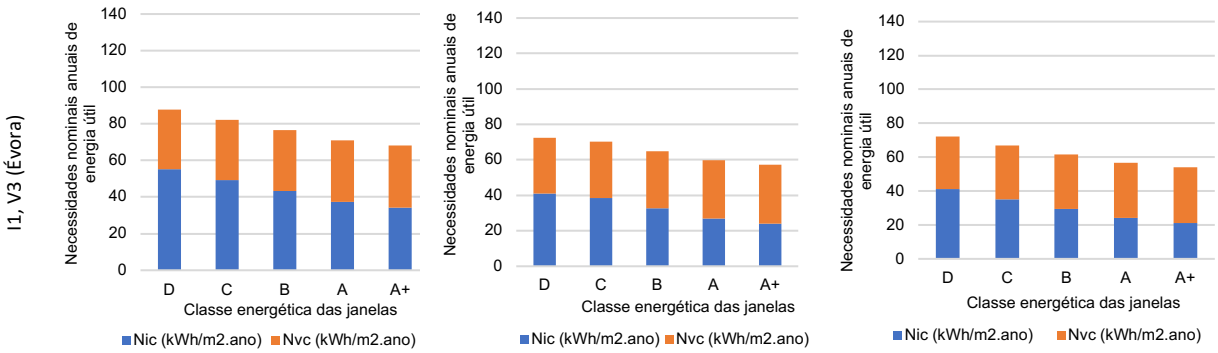


Figura 6: Variação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (Nic) e para arrefecimento (Nvc) com a classe energética das janelas, para diferentes zonas climáticas: a) I3, V2; b) I2, V2; c) I1, V3 e tendo em conta as diferentes soluções de isolamento térmico.

A Figura 7 mostra a variação da relação entre as necessidades nominais anuais de energia primária e as necessidades de energia primária de referência (N_{tc}/N_t) com a classe energética das janelas, para as diferentes soluções de isolamento térmico consideradas (sem isolamento térmico; ETICS com 4cm de EPS e ETICS com 8cm de EPS). Nas figuras estão ainda representados os limites máximos das classes energéticas dos edifícios de forma a ser possível identificar a classe energética obtida para o edifício em cada um dos cenários analisados.

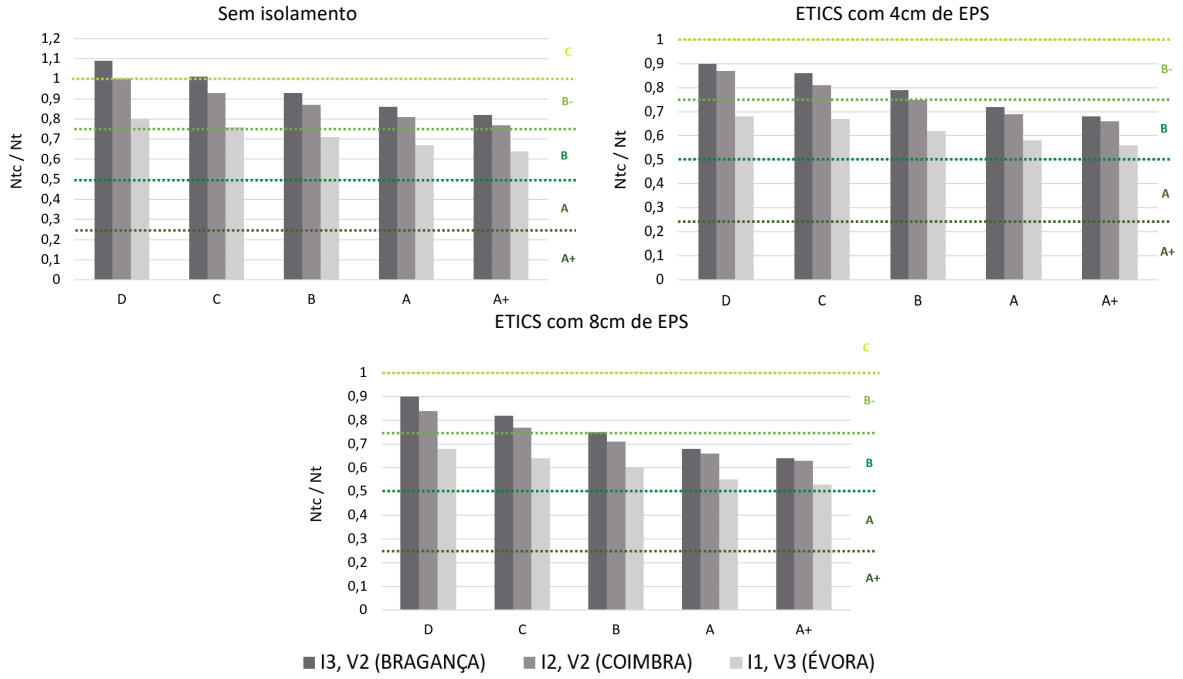


Figura 7: Variação da relação Ntc/Nt, com a classe energética das janelas, para diferentes zonas climáticas e considerando diferentes soluções de isolamento térmico.

Os gráficos anteriores mostram que o impacto da classe energética das janelas no edifício depende muito da localização do edifício, mas também do tipo de envolvente. No edifício em análise conclui-se que a substituição de janelas classe A por classe A+ não alterou a classe energética do edifício, devido à amplitude da classe. Numa envolvente fortemente isolada, janelas com classe energética igual ou superior a B são suficientes para garantir uma classe energética do edifício de B, qualquer que seja a

localização do mesmo. Note-se que esta foi a classe máxima obtida na análise realizada para o edifício definido como caso de estudo. Considerando uma envolvente exterior vertical opaca sem isolamento térmico e uma zona climática com invernos mais rigorosos (I3), ao substituirmos janelas com classe energética C por janelas com classe B ou superior, é possível aumentar a classe energética do edifício de C para B-.

4 REFLEXÃO SOBRE A POSSÍVEL EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE ETIQUETAGEM DE JANELAS EM PORTUGAL

4.1 ATUALIZAÇÃO DA ATUAL ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA

De acordo com o atual sistema CLASSE+ para etiquetagem energética de produtos de construção, existem 7 classes energéticas que variam entre a classe A+ (produto mais eficiente energeticamente) e a classe F (produto menos eficiente energeticamente). No caso das janelas, essa classificação depende das necessidades totais mensais de energia para climatização de um compartimento de referência servido pela janela a etiquetar (Simões *et al*. 2012).

Da análise aos dados Classe+ verificou-se que, do total de etiquetas emitidas para as janelas, 91,5% são classe A+. Também se concluiu que cerca de 96% das janelas etiquetadas têm classe 4 de permeabilidade ao ar e as restantes 4% classe 3. Por fim, verificou-se que a maior parte das janelas etiquetadas apresenta um valor de coeficiente de transmissão térmica (U_w) entre 1,2 e 1,8 W/m^2.°C, sendo que 40% das janelas com classe A+ tem um valor de U_w entre 1,4 e 1,6 W/m^2.°C e que 40% do total de janelas etiquetadas têm um valor de g entre 0,4 e 0,5 e 37% têm um valor de g entre 0,6 e 0,7.

Na análise feita foi possível verificar que, para classes de permeabilidade ao ar 3 e 4, a classe energética A+ é aplicável a um grande grupo de janelas com valores de U_w que podem ir até 2 W/m^2.°C, dependendo do valor do fator solar do vidro. Janelas com classe 4 de permeabilidade ao ar e valor de U_w inferior ou igual a 1,4 W/m^2.°C apresentam classe energética A+, qualquer que seja o valor do fator solar do vidro. Nas duas classes de permeabilidade ao ar, a gama de valores de U_w e g que permite obter uma classe energética de A+ é muito superior quando comparada com a gama de valores que conduz a uma classe energética A. No caso de janelas com classe 4 de permeabilidade ao ar essa diferença é ainda maior. Note-se que, de acordo com a análise dos dados Classe+, a classe 4 corresponde à classe de permeabilidade ao ar com um maior número de etiquetas emitido.

Face ao exposto, conclui-se que existe uma oportunidade de evolução no que se refere às exigências para obtenção de uma classe energética A+, beneficiando assim janelas com melhor desempenho térmico. A alteração dos critérios deve ter em conta a realidade do mercado nacional e as atuais exigências regulamentares referentes às janelas em Portugal. Note-se que, os atuais critérios europeus para as janelas, referidos na Taxonomia Europeia e noutras certificações europeias como a Passivhaus e a Minergie, estabelecem valores de U_w muito baixos, que não traduzem as necessidades dos edifícios em climas da Europa Mediterrânea. Por exemplo, a Taxonomia Europeia refere como critério para o coeficiente de transmissão térmica da janela um valor de U_w inferior ou igual a 1,0 W/m^2.°C. No entanto, considera-se que o cumprimento deste critério é uma informação relevante e que deve ser indicado na etiqueta.

4.2 NOVOS PARÂMETROS E INFORMAÇÃO A DISPONIBILIZAR ATRAVÉS DA ETIQUETA

A atual etiqueta energética, para além da classe energética da janela, contém informação sobre o nível de conforto no verão e no inverno, coeficiente de transmissão térmica da janela, U_w, fator solar e transmissão luminosa do vidro, classe de permeabilidade ao ar e atenuação acústica. Considera-se, no

entanto, importante introduzir mais informação no que se refere à segurança e à sustentabilidade bem como ao cumprimento de critérios de desempenho térmico mais exigentes tal como o da Taxonomia Europeia. A Tabela 3 apresenta os parâmetros que se considera importante incluir na nova etiqueta energética.

Tabela 3: Parâmetros e nova informação a disponibilizar através da etiqueta

Indicador	**Parâmetro / informação**
Desempenho térmico e alinhamento com a Taxonomia Europeia	Informação sobre o cumprimento do critério técnico da Taxonomia Europeia ($U_w \leq 1{,}0$ W/m^2.°C)
Segurança	Classe de resistência ao vento
Sustentabilidade	Parâmetros ambientais: Carbono incorporado, kg CO_2 eq.m^{-2}; Energia incorporada, MJ_p.m^{-2} Parâmetros de circularidade: Taxa de entrada reciclada, %

4.2.1 Cumprimento dos requisitos da Taxonomia Europeia

O regulamento da Taxonomia, aprovado pela União Europeia (UE) em junho de 2020 pretende determinar quais as atividades que podem ser consideradas sustentáveis, com base num sistema de classificação comum em toda a UE. O regulamento aponta seis objetivos ambientais e estipula que uma atividade pode ser considerada ambientalmente sustentável se contribuir para um desses objetivos sem prejudicar significativamente os outros. Para isso foram definidos critérios referentes a diferentes atividades económicas. Relativamente às janelas, o critério estabelecido consiste em fabricar sistemas com elevada eficiência energética, devendo o coeficiente de transmissão térmica, U_w ser inferior ou igual a 1,0 W/m^2.°C, de forma a contribuir substancialmente para a mitigação das alterações climáticas. Apesar deste requisito ser demasiado exigente para a zona climática da Europa Mediterrânea, e que não deve, por isso, definir a classe energética da janela, considera-se que os sistemas que cumprem este critério devem ser valorizados na etiqueta.

4.2.2 Resistência ao vento

No que se refere à segurança, apesar de não determinar o desempenho energético de uma janela, a resistência ao vento constitui uma característica técnica de segurança muito importante a ter em conta na escolha do sistema que se pretende instalar, até por se relacionar com os mais frequentes eventos extremos. A resistência ao vento traduz os níveis de deformação da janela quando sujeita a ação do vento e depende fortemente do tipo de perfis de caixilharia e respetivo material e da resistência das ferragens, cuja seleção deve ter em conta o tipo de aberturas das janelas. No caso da resistência ao vento, o grafismo poderá ser baseado numa escala de desempenho final, que varie desde a opção menos resistente à mais resistente. Esta escala poderá ter em conta a resistência global da janela, ou seja, a sua classificação em relação à pressão de vento suportada e a sua classificação em relação à flecha relativa frontal.

4.2.3 Sustentabilidade (parâmetros ambientais/circularidade)

A atual etiqueta não inclui parâmetros que permitam distinguir as etiquetas com base no seu desempenho ambiental. Na reflexão realizada avaliou-se a possibilidade de adicionar à etiqueta novos parâmetros ambientais e de circularidade, de caráter voluntário. Identificaram-se parâmetros ambientais e de circularidade que traduzem os aspetos mais amplamente considerados na avaliação ambiental de janelas: carbono incorporado, energia incorporada e a taxa de entrada reciclada,

calculados com base na metodologia de ACV (ISO 14040). A seleção dos mesmos teve em conta os seguintes critérios:

1. Comparabilidade: os parâmetros devem ser calculados com base numa metodologia de cálculo normalizada, que permita a comparação dos resultados;

2. Informação verificada por terceira parte: a informação de base para o cálculo do parâmetro deve ter sido verificada por uma terceira parte independente;

3. Informação pública: a informação de base para o cálculo do parâmetro deve ser, sempre que possível, pública;

4. Consideração do ciclo de vida: o parâmetro deve refletir o impacte associado ao ciclo de vida da janela, de modo a evitar a transferência de impactes entre fases do ciclo de vida, de acordo com as práticas de avaliação da sustentabilidade ambiental de produtos preconizadas internacionalmente.

Nesse sentido, propõe-se que o referencial para a obtenção da informação ambiental a reportar no âmbito da etiqueta CLASSE+ sejam Declarações Ambientais de Produto (DAP) das janelas, verificadas por uma terceira parte independente. As DAP são ferramentas voluntárias de comunicação do desempenho ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida, nas quais é apresentada informação ambiental quantificada e fidedigna, baseada na metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), de acordo com os seguintes referenciais normativos: ISO 14025; ISO 21930; EN 15804; e EN 15942.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo foram apresentados os principais resultados da análise dos dados Classe+, bem como um estudo do impacte da classe energética das janelas no desempenho térmico e energético de um edifício. Com base nestes resultados fez-se uma reflexão sobre uma possível atualização da atual escala de classificação energética e sobre a possibilidade de incluir novos parâmetros na etiqueta, de forma a introduzir informação relacionada com a segurança e sustentabilidade da janela, bem como com o cumprimento dos atuais critérios da Taxonomia Europeia.

Os resultados obtidos no estudo realizado permitem ainda concluir que o impacte da classe energética das janelas no desempenho energético de um edifício a reabilitar vai depender de vários fatores, nomeadamente da localização do mesmo, da solução de isolamento térmico da envolvente opaca, entre outros. As particularidades de cada edifício podem assim ter como melhor opção janelas com classe energética elevada, mas não obrigatoriamente a classe A+. Face ao exposto, e como a etiqueta tem sido utilizada em contexto de financiamento para a implementação de medidas de melhoria da eficiência energética em edifícios existentes, considera-se que, tendo por base os resultados do estudo realizado e as atuais exigências do Decreto-Lei n.º 101-D/2020, não deve ser dado financiamento exclusivamente às janelas com classe A+ ou com classe A e A+, mas sim às janelas com etiqueta energética Classe+ e que estejam a cumprir os requisitos regulamentares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Comissão Europeia (2020). Energy efficiency in buildings. Available online: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en (accessed on 22 may 2024).

Parlamento Europeu (2023). Redução das emissões de carbono: objetivos e políticas da União Europeia.Availableonline: https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180305STO99003/reducao-das-emissoes-de-carbono-metas-e-politicas-da-ue (accessed on 22 may 2024).

Nair, G.; Verde, L.; Olofsson, T. (2022). A Review on Technical Challenges and Possibilities on Energy Efficient Retrofit Measures in Heritage Buildings. Energies, 15, 7472.

Moghaddam, S.A.; Mattsson, M.; Ameen, A.; Akander, J.; Gameiro Da Silva, M.; Simões, (2021). N. Low-Emissivity Window Films as an Energy Retrofit Option for a Historical Stone Building in Cold Climate. Energies, 14, 7584. https://doi.org/10.3390/en14227584

Moghaddam, S.A.; Serra, C.; Gameiro da Silva, M.; Simões, N. (2023). Comprehensive Review and Analysis of Glazing Systems towards Nearly Zero-Energy Buildings: Energy Performance, Thermal Comfort, Cost-Effectiveness, and Environmental Impact Perspectives. Energies, 16, 6283. https://doi.org/10.3390/en16176283.

Wu, W.; Skye, H.M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. Renew. Sustain. Energy Rev, 142, 110859.

Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Baggio, P. (2010). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. Energy and Buildings, No. 43, pp 1030-1037.

Karlsson, J., Roos, A. (2003). Evaluation of window energy rating models for different houses and European climates, Solar Energy, No. 76, pp 71-77, 2003.

Trząski, A., Rucińska, J. (2015). Energy labeling of windows – Possibilities and limitations. Solar Energy, Volume 120, Pages 158-174.

Simões, N., Gonçalves, E., Pedro, F. (2012). Sensitivity analysis for a Portuguese window energy rating system (PWERS); 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference, July 1 – 7, 2012, Ohrid, Republic of Macedonia.

ISO 18292:2011 Energy performance of fenestration systems for residential buildings - Calculation procedure.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PAPERCRETE: BREVE REVISÃO E ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INCORPORAÇÃO DE DOIS TIPOS DE PAPEL

Rute Eires[a,b]; Aires Camões[a,b]; Carlos Angeiras[a,c]

[a] Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

[b] CTAC, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, rute@civil.uminho.pt e aires@civil.uminho.pt

c Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, a84749@alunos.uminho.pt

RESUMO

No sentido de contribuir para a neutralidade carbónica e para o desenvolvimento sustentável, necessários na atualidade, realizou-se um estudo experimental com *papercrete*, um material não convencional composto por desperdícios de papel, ligante (cimento, cal ou gesso) e água. Este parece ser um material economicamente viável e uma oportunidade para reduzir o consumo de recursos e promover a economia circular, uma vez que utiliza resíduos como matéria prima. Além disso, terá menor impacte ambiental pela substituição dos agregados convencionais (brita e/ou areia) e poder proporcionar um menor consumo energético pela sua capacidade de isolamento térmico.

Apresenta-se uma breve revisão do conhecimento e um trabalho experimental em que foi testada a incorporação de dois tipos de papel em argamassas (resíduo da indústria de papel *kraft* e papel de impressão). Estas composições foram testadas para avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e flexão), a absorção de água por capilaridade e a condutibilidade térmica.

Conclui-se que o *papercrete*, apesar de ser um material leve com baixas resistências mecânicas, poderá ser utilizado como material não estrutural, desde de que assegurada a proteção face à ação da água, devido à sua elevada absorção de água. Ambos os tipos de papel podem ser utilizados, mas o tipo de papel tem influência no desempenho. A areia, apesar de reduzir a resistência mecânica dos provetes, mostrou eficácia na redução da absorção de água quando adicionada em pouca quantidade.

Palavras-chave: *Papercrete*, papel, valorização de resíduos, economia circular, sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A construção sustentável é atualmente uma prioridade uma vez que foram definidas várias metas para o desenvolvimento sustentável internacionalmente, tal como atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para tal, são necessárias soluções construtivas diferentes das convencionais, com menor consumo energético e menor impacte ambiental.

O papel é composto por fibras de celulose e atualmente para o papel mais comum, estas fibras são provenientes da madeira, um material abundante e renovável (Yun, 2011). Todavia, produzem-se resíduos durante o fabrico do papel em quantidades significativas e provêm de várias etapas do ciclo de produção. Geralmente, estes resíduos estão destinados à agricultura (35%) e a aterros sanitários (29%). No entanto, devido às quantidades consideráveis envolvidas, surge a necessidade de identificar uma alternativa que assegure a gestão eficiente desses resíduos, sendo a utilização na construção civil uma opção viável (Modolo, 2006).

Reciclar papel não é tão fácil quanto parece, este pode ser reciclado várias vezes, mas o número de vezes que um papel pode ser reciclado depende de vários fatores, como a qualidade das fibras de papel, o processo de reciclagem utilizado e a quantidade de contaminantes presentes no papel reciclado. O papel apenas pode passar por um processo de reciclagem de 5 a 8 vezes antes que as fibras se tornem muito curtas e frágeis para serem reaproveitadas novamente para produzir papel reciclado (Shenoy, 2016). Deste modo, há resíduos da indústria de papel que atualmente não são aproveitados, como os resíduos sólidos fibrosos (fibras curtas) provenientes do processo de crivagem. Estas fibras podem ser consideradas resíduos e podem ser recicladas ou reutilizadas em outros produtos. A reutilização das fibras curtas de papel ajuda a reduzir o desperdício, promover a sustentabilidade e maximizar o uso eficiente dos recursos naturais.

O *Papercrete*, composto por uma mistura de água com desperdícios de papel triturados à qual é adicionado cimento (ou outro material ligante, como cal, gesso ou terra) pode promover a valorização deste tipo de resíduos.

Pretende-se aqui apresentar: i) uma síntese da evolução do *papercrete*; ii) as principais vantagens e limitações desta técnica construtiva; iii) estudos recentes; e iv) os principais resultados de um estudo experimental desenvolvido na Universidade do Minho (Angeiras, 2023).

2 PAPERCRETE

2.1 EVOLUÇÃO DO *PAPERCRETE*

Não há certezas de quem inventou o *papercrete* e as afirmações que se encontram chegam a ser contraditórias, mesmo em artigos científicos. Numa busca por informação credível na web e por patentes verifica-se que existem algumas patentes antigas com utilização de desperdícios de papel e cimento e outros ligantes, por exemplo estas:

- GB140431A publicada em 1921-01-13, "*Insulating and building material and method of producing same*", sem informação sobre os inventores, aplicante Fabriks Aktiebolaget Kronsten. Esta refere-se a composições que contêm marga (pedra calcária/argilosa) e 1-15% de celulose (polpa de papel, resíduos de papel, etc.), para produzir um material isolante ou de construção. Sendo referida ainda a adição de 10-20 por cento em peso de cimento, cal, gesso, etc.

- Nos anos 40/50, encontram-se mais algumas patentes com inclusão de cimento e resíduos de papel e outros materiais agregados ou ligantes, referindo já o seu uso em construção ou elementos de construção, tais como tijolos, painéis, travessas de caminho de ferro e bordaduras ou lancis para lareiras, formados por uma composição moldável: i) GB607854A publicada em 1948-09-07, autor George Stanley Mann, George Franklin e Joseph Cooper Squirrell, "*Improvements in and relating to building or constructional units*". …

- Nos anos 90 encontram-se novamente mais patentes, como: i) AU7368291A publicada em 1991-10-03, autor Drew David Alan, "*Recycled Paper-crete*"; ii) US5350451A publicada em 1994-09-27, autor Eric Patterson, referindo uma pasta composta por fibras de papel, água e cimento que pode ser utilizada numa variedade de aplicações de construção, como blocos ou como o betão convencional e pode ser pulverizada em malhas de aço para formar estruturas personalizadas. Podendo ainda ser utilizada como argamassa de reboco quando misturada com areia; e iii) US5785419 (A) — 1998-07-28, autor Paul A. McKelvey, "*Lightweight building material and method of construction of cast-in-place structures*", cuja composição compreende "cimento, cinzas volantes, fibra de celulose e água".

Como se constata, a "invenção" do *papercrete* terá tido início nos anos 20 e talvez não tenha sido muito conhecido e aplicado na época, tal como nos anos 40/50. No entanto, os autores dos anos 90 iniciaram a sua aplicação de diversas formas e têm divulgado este material, tornando-se por isso os mais conhecidos atualmente. Segundo Kelly Hart (n.d.a) três dos pioneiros do *papercrete* e que ele entrevistou foram Mike McCain, Eric Patterson e Sean Sands. Eric Patterson que não tem comercializado a sua patente e divulga esta técnica a quem tenha interesse. Também Kelly Hart tem estado envolvido com o *papercrete* desde os primeiros dias da sua popularização (Hart, n.d.a).

Ao longo do tempo, os construtores tentaram muitas abordagens à utilização do *papercrete*: i) pequenos blocos; ii) grandes blocos; iii) painéis; iv) misturas bombeadas para cofragens como o betão convencional; e misturas aplicadas como argamassas de reboco, com projeção ou à mão. Todos estes métodos funcionaram, com diferentes graus de sucesso. Foram experimentadas muitas misturas diferentes, com diferentes rácios de cimento para papel ou adicionando argila ou areia à mistura. Os equipamentos para fazer o material assumiram muitas formas, desde simples misturadores de barril a misturadores de reboque mais sofisticados feitos a partir de traseiras de automóveis, depósitos e lâminas de cortadores de relva, até grandes misturadores industriais (Hart, n.d.b).

2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Este material foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o uso de agregados (como areia) na construção. No entanto, requer a utilização de materiais ligantes, como o cimento (Solahuddin e Yahaya, 2021). A inclusão das fibras de celulose no *Papercrete* proporciona benefícios como a redução da condutividade térmica, melhoria do desempenho acústico, absorção sonora aprimorada, diminuição da densidade e resistência à flexão, além de prevenir o surgimento de microfissuras. No entanto, a aplicação desse material ainda enfrenta desafios devido à falta de normas e diretrizes específicas (Latha et al., 2015).

Além de incentivar a reciclagem de resíduos de papel, o material pode ser aplicado em paredes internas de edifícios, inclusive em áreas propensas a sismos, devido ao seu peso reduzido em comparação com betões e argamassas convencionais. O uso de *papercrete* na construção de paredes resultará numa redução do peso sobre a estrutura, levando a fundações menores, menos uso de aço, redução significativa de mão de obra e de custos energéticos (Solahuddin e Yahaya, 2021).

Foi descrito como barato, fácil de fazer, ecológico, por isso tem sido usado em autoconstrução. Mas não é tão simples assim.

Segundo Harun Magnuson, em entrevista, construtor com experiência há vários anos "Há vários mitos que têm de ser desfeitos. Em primeiro lugar, não é fácil, é um trabalho árduo, como qualquer outro método de construção. Não é necessariamente barato, na medida em que é preciso comprar cimento e, de alguma forma, fazer o equipamento para o fabricar. Não pode ser facilmente cortado com serras ou tupias, é um trabalho árduo e poeirento. Não adere muito bem a si próprio, pelo que é preciso ter isso em conta quando se constroem paredes. O betão prende os parafusos, mas não tão bem como a madeira. O *papercrete* tem três problemas principais: bolor, retração e tempo de secagem lento" (Hart, n.d.b).

Destes três problemas, o bolor será o mais grave, uma vez que o betão de papel tem muita absorção de água e quando o material está húmido por muito tempo e estiver suficientemente quente, torna-se um meio perfeito para o crescimento de fungos (Hart, n.d.b). Contudo, tal como na construção com *hempcrete* (betão de cânhamo) ou mesmo na construção em terra, onde estes principais problemas podem ocorrer, estes poderão ser contornados com recurso a vários cuidados (Eires, 2012):

- as fundações devem ser bem impermeabilizadas para evitar a ascensão de água por capilaridade;
- podem ser usados telhados com beirados salientes para proteger a parede da água da chuva;
- utilizar argamassas de proteção; e
- ter cuidado de reforçar a impermeabilização em zonas húmidas no interior dos edifícios.

Além disso, é preciso um adequado planeamento da obra para evitar a construção durante o inverno, pela maior presença de humidade, deixar secar bem antes da aplicação de outros materiais e também ter cuidado no verão de sombrear as paredes para evitar retrações.

Quanto à retração, no caso do *papercrete*, esta pode de ser contornada com adição de areia na mistura. Esta adição também garante uma melhor resistência ao fogo e à abrasão, embora também o torne menos isolante (Hart, n.d.b).

2.3 ESTUDOS RECENTES SOBRE *PAPERCRETE*

Analisando algumas publicações científicas sobre o *papercrete*, é possível apresentar resumidamente diversas propriedades do material já testadas. De acordo com o **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, observa-se que: i) as resistências são mais baixas comparativamente ao betão convencional; ii) o coeficiente de absorção de água por capilaridade tende a ser menor com menor percentagem de papel ou resíduo adicionada; e iii) os coeficientes de condutibilidade térmica diferem bastante entre os estudos.

Quadro 1 – Estudos recentes e propriedades verificadas

Referências	Materiais usados		Propriedades obtidas aos 28 dias			
	Tipo de papel	Composição	Rc	Rf	Ab. Água	C. Térmica
Cardinale et al., 2021	- papel de impressão imersão em água 24 h, seco a 50 ◦C e triturado grosseiramente - resíduo do fabrico de papel seco a 50 ◦C e moído	Papel ou Resíduo 2, 5 e 10% (volume) cimento e areia	Resistência maior com menor % de adição. Papel – 6,92 a 13,56MPa Resíduo – 10,21 a 14,11MPa	Papel – melhor com 2% - 4,67MPa Resíduo – melhor com 5% - 5,32MPa	Coeficiente de capilaridade menor com menos % de papel ou resíduo Max P. 8,59 Max R. 3,54	Menor condutividade com papel – 0,206 W/m.K Menor com resíduo – 0,297 W/m.K
Solahuddin e Yahaya, 2021	- desperdício de papel de impressão - papelão usado e triturado	5, 10 e 15% de papel Traço cimento:areia:papel 1:0.75:1.5	x	10% teve melhor resistência 5,15MPa	x	x
Ahmad et al., 2021	Papelão (os autores chamaram *Boardcrete*)	Traços cimento, papelão, areia: 1:1:1,5 ; 1:1:2 ; e 1:2:4	1:1:1,5 teve melhor resistência 6,3MPa	1:1:1,5 teve melhor resistência 2,1MPa	1:1:1,5 teve menor absorção por imersão (7,35%)	1:2:4 teve menor condutividade térmica – 0,94 W/m.K
Bukhari et al. 2016	Não referido	50 e 60% de papel papel, cimento e areia	Proporção 60:20:20 teve melhor resistência 6,5MPa	x	x	x

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS, PROCESSOS E MISTURAS

Na realização deste trabalho experimental os materiais utilizados foram: cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N (designado como CEM); areia fluvial natural rolada quartzosa que respeita as normas EN 12620:2002+A1:2008 de agregados para betão, EN 13139:2002 de agregados para argamassas; resíduo fibroso da produção de papel *kraft* (designado como RPK, Figura 1), fornecido pela empresa DSSmith de Viana do Castelo que utiliza papel usado e madeira virgem na produção do papel; papel de impressão branco comum de 75g/m^2 (designado como PI); e água potável da rede de abastecimento pública.

Figura 1 – Resíduo de papel kraft (RPK) (Angeiras, 2023)

Realizaram-se testes preliminares para chegar a uma mistura padrão, testando-se: diferentes métodos de filtragem da água (simples por gravidade ou com secagem no micro-ondas); 10 %, 30 %, 50 % e 70 % de cimento em volume da quantidade da pasta de papel (papel triturado com água) utilizada na mistura; e 4 formas de cura distintas (à temperatura ambiente, com ou sem aplicação de película aderente à superfície e em estufa a 40ºC, com ou sem película aderente) (Angeiras, 2023). Após observação, bem como ensaios de avaliação do teor de humidade e de resistência à compressão, verificou-se que a melhor percentagem de cimento era a de 70 % e a melhor metodologia era a apresentada na Figura 2.

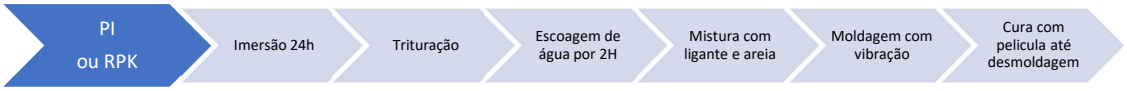


Figura 2 – Síntese da metodologia usada na preparação e cura dos provetes

Posteriormente, com esta metodologia, foram realizadas misturas com 70 % de cimento e areia, adotando os traços 1:1, 1:2 e 1:4 de "cimento + papel": "areia", o que corresponde aproximadamente às quantidades apresentadas no quadro 2 em kg/m^3.

Quadro 2 – Misturas testadas

Misturas (siglas)	kg/m^3			
	Papel	**Cimento**	**Areia**	**Água**
30%PI_70%CEM	193	379	0	342
30%PI_70%CEM_1vA	159	313	239	298
30%PI_70%CEM_2vA	133	260	398	283
30%PI_70%CEM_4vA	105	205	628	225
30%RPK_70%CEM	196	384	0	333
30%RPK_70%CEM_1vA	162	317	243	288
30%RPK_70%CEM_2vA	135	265	406	269
30%RPK_70%CEM_4vA	106	208	637	214

3.2 ENSAIOS E PROCEDIMENTOS

Para analisar as misturas referidas foram preparados provetes de 150x150x50 mm^3. Parte destes foram utilizados no ensaio térmico e os excedentes foram cortados em 3 partes iguais com serra de disco, obtendo-se provetes de 150x50x50 mm^3 para os restantes ensaios.

Os procedimentos dos ensaios seguiram o seguinte: i) o ensaio de resistência à compressão foi realizado tendo em conta a norma NPEN 196-1 2006 aos 28 dias de cura em provetes no estado seco e no estado saturado com água após imersão de 24h; ii) o ensaio de resistência à flexão realizou-se tendo em conta a norma NPEN 19-1 2006 também aos 28 dias em provetes secos e saturados; iii) para o ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu-se a norma EN1015-18:2002, com secagem prévia a uma temperatura de 60°C ± 5 °C, durante 24h e iv) o ensaio de condutibilidade térmica foi realizado de acordo com um procedimento interno do LMC, executado com base na norma ISSO-9869-1994 utilizando provetes de 150x150x50 mm^3. O protótipo utilizado para a caracterização das propriedades térmicas, *Prototherm* (ver Figura 3) forma um canal fechado com placas isolantes, de maneira a minimizar as perdas de calor, coladas e aplicadas com espuma expansiva e parafusos (Gomes, 2021). Na zona trapezoidal, (a) na figura 3, está uma fonte de calor a temperatura constante (40 ˚ +/- 1˚C) e um dissipador, no início da secção retangular, de forma a o calor se propagar ao longo

da mesma. Cada teste durou 24 horas para garantir a estabilização do fluxo de calor. Após esta verificação, foi considerado um intervalo de 1 hora e 30 minutos para cada teste, calculando o fluxo de calor que passa pela amostra.

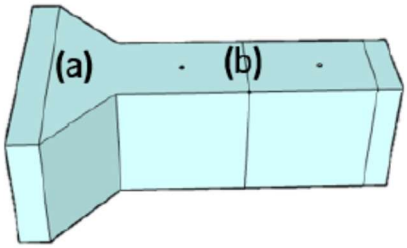


Figura 3 – *Prototherm*. a) Secção trapezoidal, (b) Secção retangular (Gomes, 2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS (COMPRESSÃO E FLEXÃO)

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, em provetes no estado seco e saturado dos 2 tipos de papel, PI e RPK.

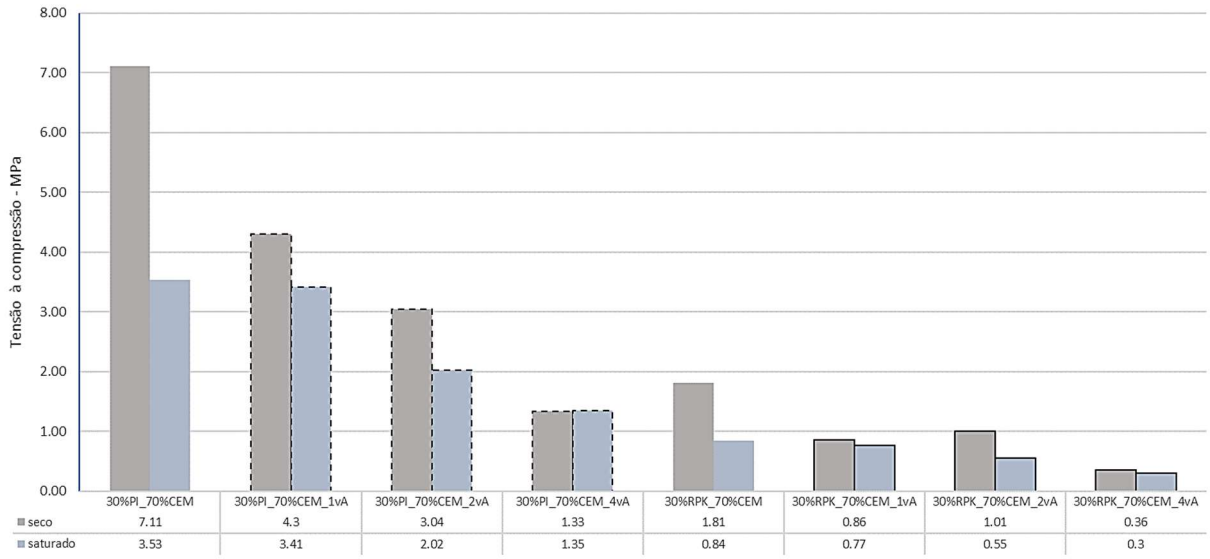


Figura 4 – Resultados do ensaio de compressão no estado seco e saturado

É observável que as misturas com PI apresentam melhores resultados que as misturas com RPK, tanto no estado seco como saturado. Verificando-se que o estado saturado influencia de forma negativa os valores obtidos, embora nem sempre com a mesma redução. Constata-se, que a adição de areia, apesar de no geral reduzir a tensão de compressão, pode contribuir de forma positiva, uma vez que no estado saturado a redução da tensão obtida é menor, embora não ser confirme um padrão de correlação relativamente à quantidade de areia adicionada.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados do ensaio de resistência à flexão, aos 28 dias, em provetes no estado seco e saturado dos 2 tipos de papel, PI e RPK.

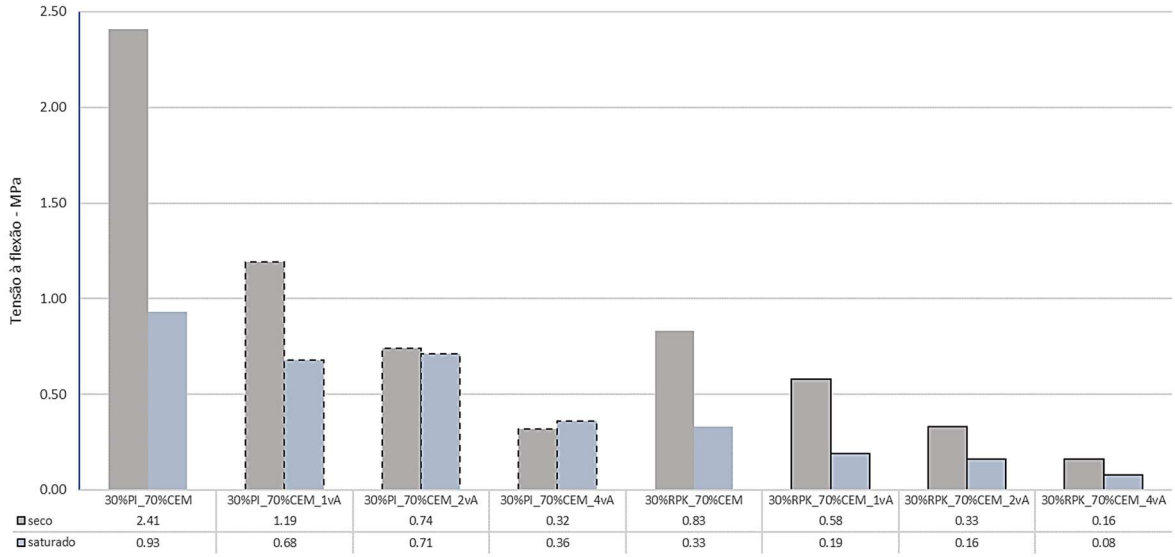


Figura 5 – Resultados do ensaio de flexão no estado seco e saturado

Os resultados obtidos no ensaio de flexão apresentam a mesma tendência verificada nos resultados obtidos à compressão, verificando-se mais uma vez melhores resultados com PI do que com RPK e o contributo da areia na redução da perda de resistência no estado saturado.

Relativamente à sua possível aplicação, considerando os requisitos mínimos para argamassas de revestimento, de acordo com a norma EN998-1 e o recomendado por outros autores (Veiga et al., 2020), apenas as composições com traço 1:4 não poderiam ser utilizadas, uma vez que a resistência à compressão é inferior a 0,4MPa.

Todavia, considerando betões leves não estruturais, como por exemplo o *hempcrete*, que tem sido utilizado em blocos ou em construção *in situ* (compactado manualmente) os resultados apresentam, no geral, valores superiores, uma vez que as resistências à compressão típicas do *hempcrete* (com cal ou outros ligantes) variam apenas entre 0,1 e 0,2 MPa aos 28 dias, aumentando gradualmente a resistência para cerca de 0.4MPa até um ano de depois (Walker et al., 2014). Pelo que, mesmo a mistura com pior resultado poderia ser considerada para possível aplicação semelhante.

Na Figura 6 apresentam-se os provetes usados no ensaio de resistência à flexão em que se observou a presença de fungos na superfície (canto inferior direito) que surgiram quando estes estiveram humedecidos.

Figura 6 – Provetes após ensaio à flexão (Angeiras, 2023)

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Na Figura 7 observam-se os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, em que são apresentados os coeficientes de absorção em kg/(m².min½).

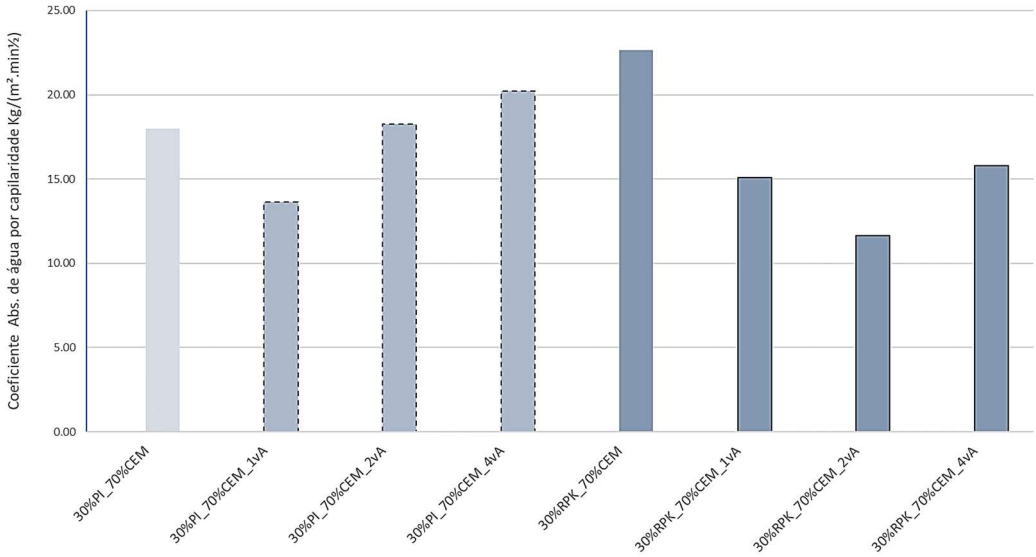


Figura 7 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados mostram que nas misturas padrão, sem areia, o papel de impressão (PI) promoveu um menor coeficiente de absorção de água por capilaridade. No entanto, de modo geral, quando é adicionada areia, as misturas com resíduo (RPK) apresentam menor absorção, embora, não pareça haver uma correlação do coeficiente de absorção com a quantidade de areia adicionada. Nas misturas com PI, apenas a adição de pouca quantidade de areia (1 volume) é que contribuiu para a redução da absorção, verificando-se o inverso quando adicionada maior quantidade de areia.

4.3 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Na Figura 8 observam-se os resultados obtidos de condutibilidade térmica, verificando-se que quase todas as misturas cumprem o regulamento técnico ITE-50 (LNEC, 2006), em que os materiais considerados isolantes térmicos têm de ter uma condutibilidade térmica inferior a 0,065 W/(m.˚C). Verifica-se ainda uma ligeira tendência geral do aumento da condutibilidade térmica quanto maior é a adição de areia. E destaca-se pela positiva a mistura sem areia e resíduo, apresentando uma menor condutibilidade.

Comparando os resultados obtidos com outros materiais isolantes, verifica-se que estas misturas de *papercrete* tem um melhor comportamento face ao *hempcrete,* uma vez que este em média tem uma condutividade de 0,1 W/(m.˚C), podendo chegar a 0,06 W/(m.˚C) (Al-Tamimi, 2024).

No entanto, os valores são no geral piores relativamente aos isolamentos mais utilizados como EPS, XPS ou lã de rocha, cujos valores variam entre 0,03 e 0,04 (Anh, L. e Pásztory, 2021). Mas, como se observa, sem adição de areia poderá ser possível obter 0,04. Relativamente à cortiça, verifica-se que o valor é da mesma ordem de grandeza, 0,037 a 0,05 (Anh, L. e Pásztory, 2021).

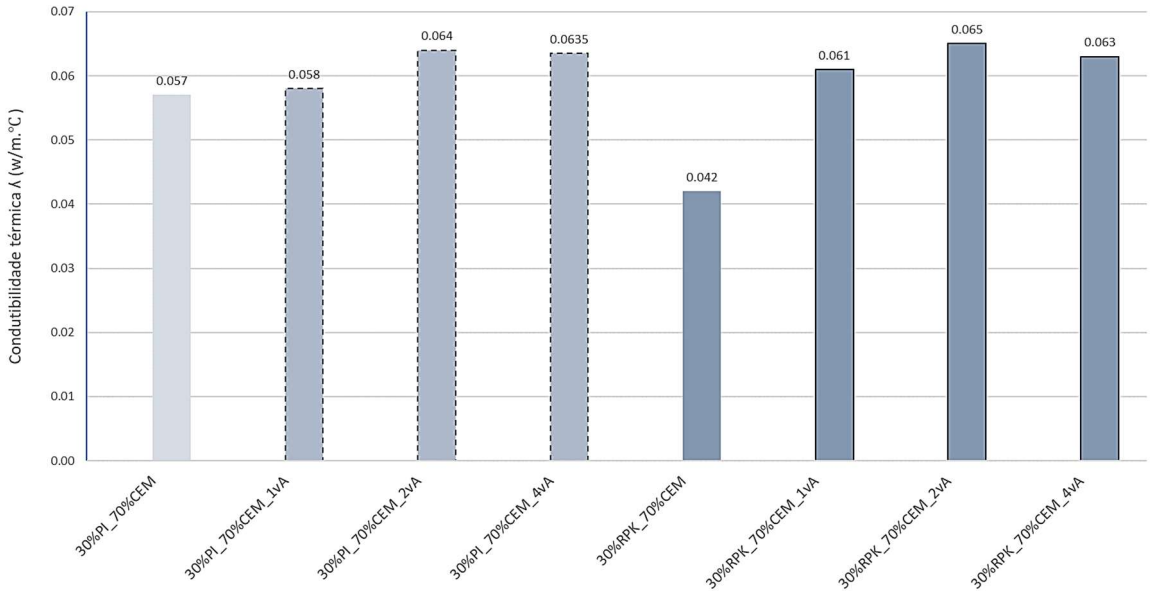


Figura 8 – Resultados do ensaio de condutibilidade térmica

5 CONCLUSÕES

O *papercrete* tem sido utilizado de muitas maneiras diferentes e em várias aplicações, mas é preciso muita atenção aos detalhes construtivos e ao planeamento da obra, bem como experiência com este tipo de material, caso contrário, poderão surgir problemas como: absorção de água e consequente aparecimento de fungos; retração e aparecimento de fissuras; e falta de aderência.

Ainda não há legislação sobre este material de construção, o que será necessário para aplicar o material com maior segurança. No entanto, é uma solução complexa, uma vez que tecnicamente pode ser preparada de diferentes formas e utilizando diferentes matérias primas, o que faz variar bastante as suas propriedades.

Relativamente ao trabalho experimental realizado, no que diz respeito às propriedades mecânicas, tanto à flexão como à compressão, os resultados, em geral, foram semelhantes, concluindo-se que as misturas com papel de impressão apresentam um melhor desempenho mecânico que as misturas com resíduo fibroso da indústria do papel *kraft*.

A adição de areia apesar de reduzir as resistências apresenta um contributo positivo nas resistências em provetes no estado saturado em água, observando-se uma menor perda de resistência. Além disso, também se verifica uma menor absorção de água quando se adiciona pouca quantidade de areia.

Relativamente ao comportamento a nível térmico, este material apresenta valores de condutibilidade térmica melhores que os do *hempcrete* e semelhantes à cortiça. Pelo que apresenta vantagens em termos de isolamento térmico.

Este material não é adequado para ser utilizado como betão estrutural, no entanto, a sua resistência e ductilidade poderá possibilitar a aplicação em revestimentos interiores, ou outras aplicações não estruturais à semelhança do *hempcrete*, mas com bastantes precauções para minimizar a absorção de água.

Como trabalhos futuros, será relevante estudar: composições com menor adição de areia; diferentes tipos de ligantes, para que se possa substituir ou reduzir a quantidade de cimento; e diversos tratamentos/revestimentos para diminuir a sua elevada capacidade de absorção de água.

REFERÊNCIAS

Ahmad, A., Adil, M., Khalil, A., e Rahman, M. (2021). Mechanical properties and durability of boardcrete blocks prepared from recycled cardboard. Journal of Building Engineering, 33. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101644

Al-Tamimi, A., Qasem, N. e Bindiganavile, V. (2024) Thermal performance evaluation of hempcrete masonry walls for energy storage in cold weather, Applied Thermal Engineering, Volume 248, Part B, 123304, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123304.

Angeiras, C. (2023). *Papercrete* – caracterização experimental, Dissertação de Mestrado Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Disponível em: https://hdl.handle.net/1822/86690

Anh, L. e Pásztory, Z. (2021) An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials, Journal of Building Engineering, Volume 44, 102604, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604.

Bukhari, S.K., Yousuf, M., e Dar, A.M (2016). A Study of Papercrete towards Building Sustainable and Resilient Infrastructure. *i-manager's Journal on Structural Engineering*, 5(2), 27-31. https://doi.org/10.26634/jste.5.2.8155

Cardinale, T., D'Amato, M.; Sulla, R. e Cardinale, N. Mechanical and Physical Characterization of Papercrete as New Eco-Friendly Construction Material. Appl. Sci. 2021, 11, 1011. https://doi.org/10.3390/app11031011

Eires, R. (2012) Construção em terra: desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Disponível em: https://hdl.handle.net/1822/21010

Gomes, F. (2021). Placas à base de desperdícios para paredes. Dissertação de Mestrado Ciclo de Estudos Integrados em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Disponível em: https://hdl.handle.net/1822/80424

Hart, K. (n.d.a). Miscellaneous Questions about Papercrete, Kelly Hart, Hartworks LLC. Acedido em maio 2024. https://www.greenhomebuilding.com/QandA/papercrete/misc.htm

Hart, K. (n.d.b). The Truth about Papercrete, Kelly Hart, Hartworks LLC. Acedido em maio 2024. https://www.greenhomebuilding.com/articles/papercrete.htm

Latha, P., Darshana, Y. e Venugopal, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates - A review. Journal of Building Engineering, Volume 3, 2015, Pages 104-113, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.06.003.

Modolo, R. (2006) "Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil," Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro. Disponível em: http://hdl.handle.net/10773/2243

Shenoy, P. e Aithal, P. (2016) A study on History of paper and possible paper free world, Int. J. Manag. IT Eng., vol. 6, no. 1, pp. 337–355. DOI: 10.5281/zenodo.161141

Solahuddin, B., e Yahaya, F. (2021). Properties of concrete containing shredded waste paper as an additive. Materials Today: Proceedings, 51, 1350–1354. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.390

Veiga, M., Faria, P. e Ranesi, A. (2020). Rebocos interiores para reabilitação requisitos e caraterísticas importantes, ENCORE 2020 – 4ºEncontro de Conservação e Reabilitação de Edifícios.

Walker, R., Pavia, S. e Mitchell, R. (2014) Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes, Construction and Building Materials, Volume 61, Pages 340-348, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065.

Yun, H., Jung, H.C., e Choi, C. (2011). Mechanical properties of papercrete containing waste paper. ICCM International Conferences on Composite Materials.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONSIDERAÇÕES SOBRE A FORMAÇÃO DE FASES CRISTALINAS POSTERIORES EM SISTEMAS GEOPOLIMERICOS

Madeleing Taborda Barraza[a]; Luís Urbano Durlo Tambara Junior[a]; Davi André Vaz Junior[a]; Philippe Jean Paul Gleize[c]; Afonso Rangel Garcez de Azevedo[a]

[a]LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Av. Alberto lamego No. 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[b]NANOTEC, Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC, Rua João Piu Duarte Silva No. 205, Florianópolis, SC, Brasil.

RESUMO

Muito tem sido dito sobre as ativações geopoliméricas e como estas se torna uma alternativa sustentável quando comparadas com a indústria por trás do cimento Portland. Entretanto, a estabilidade química destes sistemas ainda continua sendo uma questão de importância para garantir a durabilidade das peças fabricadas, as quais podem facilmente, por descuido da formulação química se tornam um sistema carbonatado. Neste estudo é registrada uma série de considerações analíticas sobre o desenvolvimento de matrizes geopoliméricas a base de metacaulim nas quais se evidencia/ausência na formação de carbonatos e fases zeolitas, como consequência das relações molares. Estas variações foram mensuradas mediante resistência à compressão, difração de raios-X e análise de imagem via microscopia e microtomografia.

Palavras-chave: Ativação; alcalina, metacaulim, carbonato, zeólita

1 INTRODUÇÃO

Os principais parâmetros de síntese para fabricação de geopolímeros têm sido definidos por um consenso científico. Reatividade dos precursores, relações molares, concentração molar do ativador, temperatura de cura e cura posterior são as características mais importantes do sistema. Estes parâmetros são nomeados nas pesquisas a fim de dar identidade e replicabilidade. Entretanto, quando se intentam replicar para atingir os mesmos resultados deve ser considerada a variabilidade da matéria prima, que se torna um dos empecilhos para a comercialização dos geopolímeros (Akduman *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o comportamento dos produtos de reação nas primeiras idades não é garantia da estabilidade química do sistema, a qual deve ser mensurada ao longo do tempo quando se pensa em aplicações da construção civil.

A reatividade dos precursores pode ser mensurada via experimental, quantificando a fase vítrea nos precursores (Sanz, 2007), quantificando a área superficial dos precursores (Ferreiro *et al.*, 2019) ou usando medidas indiretas que simulam o ambiente alcalino e realizando medições de calorimetria (Avet *et al.*, 2016). Ora, também existe a quantificação de fase amorfa após análise de DRX fazendo métodos quantitativos por padrões (Snellings, Salze and Scrivener, 2014).

Das relações molares, que começaram a ser nomeadas pelo Davidovits (1991) foram estabelecidas algumas proporções entre os óxidos principais do sistema, porém, com o tempo outros autores que indicaram um dilatação nos valores que, convenientemente, produziam melhor desempenho mecânico (Silva *et al.*, 2007; Ramos *et al.*, 2018; Pelisser *et al.*, 2021). O princípio físico-químico que cada uma das relações representa está resumido no Quadro 1, sendo que a letra R representa o íon alcalino incorporado no ativador.

Quadro 1 – Valores de relações molares e princípios que representam em matrizes geopoliméricas a com reduzido teor de cálcio.

Parâmetro	Consenso	Valores
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	Representa a possibilidade de formação e extensão de cadeias poliméricas e o grau de amorficidade do produto formado, com um teor limite interno, assim, maiores valores contribuem na resistência mecânica do material (Provis and Van Deventer, 2007; Silva *et al.,* 2007; Juengsuwattananon *et al.*, 2019)	3,0-4,5
$\frac{H_2O}{R_2O}$	Favorece a difusão do íon alcalino no sistema, assim como conforme aponte valores altos, incrementa a fluidez dele. Porém, pode acarretar a incremento de porosidade (Santa, 2012; Zribi and Baklouti, 2021)	10-17,5
$\frac{R_2O}{Al_2O_3}$	Controla a formação do arranjo não cristalino típico dos geopolímeros. Uma desproporção pode levar à formação de carbonatos (Fernández-Jiménez *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2007)	0,45-1,2

$\frac{R_2O}{SiO_2}$	Influência na porosidade do sistema e na formação de fases cristalinas porosas, como zeólitas (Sanz, 2007; Masi *et al.*, 2015)	0,12-0,28

A concentração molar, geralmente a base de NaOH, estabelece uma faixa conveniente entre 8-14 M para criar um ambiente que promove a dissolução do precursor (Cunha, 2014; Singh *et al.*, 2015).

No que se refere à cura térmica, (Hardjito and Rangan, 2005; Görhan *et al.*, 2016) afirmam que a faixa de temperatura que estimula o melhor desempenho mecânico está compreendida entre 30°C e 90°C porém, indicam que com valores maiores que 60°C os ganhos não são significativos. E a temperatura após cura depende da aplicação da ativação e dos materiais involucrados porque tem uns cuja ativação requer maior energia térmica. Sendo que pode ser feita cura prolongada, aproveitamento de resíduo, compensação de íons alcalinos ou condições imersas ou secas (Guo *et al.*, 2022; Marvila *et al.*, 2023)

O objetivo deste trabalho é avaliar duas matrizes geopoliméricas, a base de metacaulim e com baixo teor de CaO, preparadas em diferentes condições de síntese e comparar o surgimento de fases cristalinas posteriores em decorrência da formulação química determinada nelas.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 DADOS

Dois tipos de metacaulim (MK) foram avaliados, cada um de origem diferentes: MK1, do tipo comercial, calcinado, segundo as especificações do fabricante em 650°C, e MK2, um calcinado em mufla laboratorial a 800°C, durante 1 hora. A granulometria e a composição química deles está registrada na Tabela 1. A morfologia das partículas também foi registrada segundo a Figura 1, sendo que as partículas do MK1 são mais arredondadas que as do MK2, que parece um empilhamento de lamelas. E seus tamanhos médio de partícula são 6,69µm para MK1 e 20µm para MK2.

Tabela 1 – Composição dos principais óxidos nos precursores utilizados

Oxido	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO	Outros (%)
MK1	51,3%	42,4%	6,20	1,00	3,2
MK2	56,4%	38,3%	0,4	0,2	0,6

a) b)

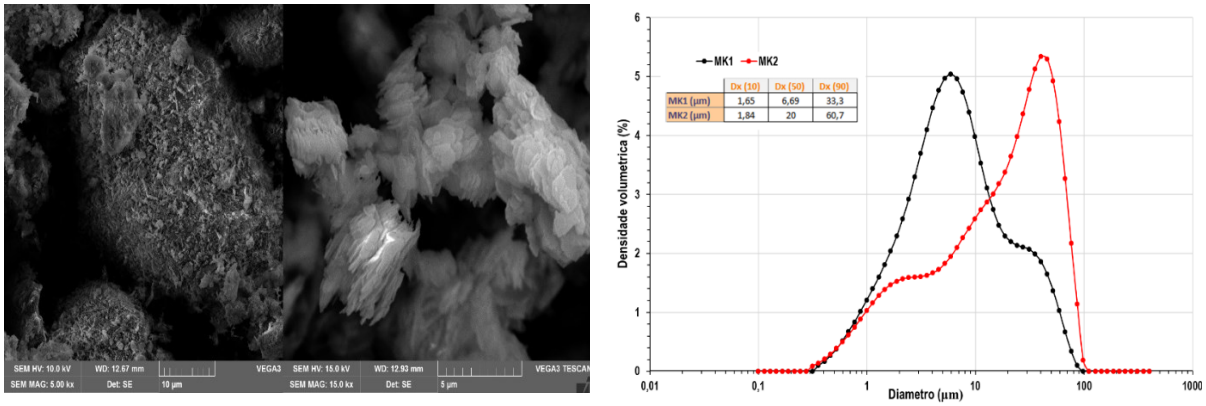


Figura 1 – a) Morfologia das partículas para MK1, lado esquerdo e MK2, lado direito. b) Densidade volumétrica do tamanho de partícula nos precursores

A reatividade dos precursores foi avaliada mediante a metodologia de (Avet *et al.*, 2016) que coloca os precursores em um sistema similar à matriz cimentícia. Procurando avaliar sua reatividade no ambiente inserido. Nesta metodologia, o posicionamento do calor total acumulado, após 146 horas estima que precursor é mais reativo. Assim MK2, registra um incremento no calor total acumulado de 16,71% comparado com MK1. Que não é muito discrepante, considerando que em tempos iniciais este parecia ter melhor reatividade que MK2.

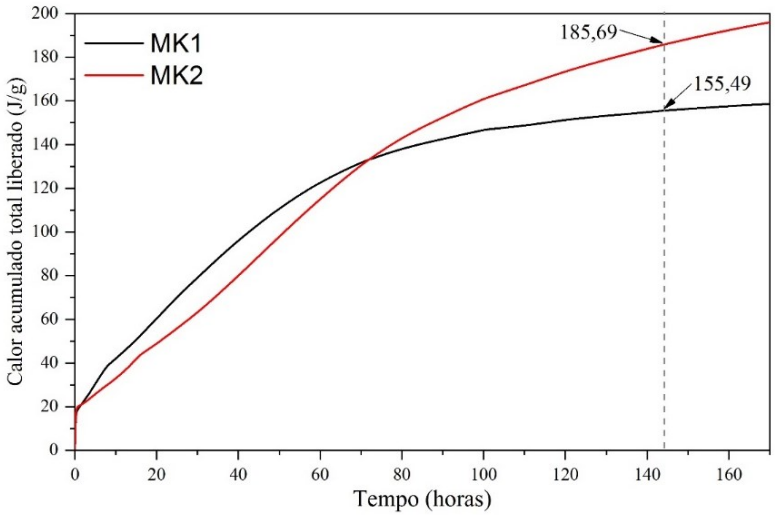


Figura 2 – Comportamento da reatividade dos precursores em um sistema unificado

Para a ativação dos precursores foi utilizada uma solução binaria de silicato de sódio liquido (SS) (Módulo de sílica = 3,36 e teor de água: 63%) e hidróxido de sódio (HS), com diferentes concentrações molares de NaOH, tal como se registra na Tabela 2. Ambas as soluções foram preparadas num agitador magnético e utilizadas 24 horas após mistura dos componentes. Para o processo de mistura da pasta foi a solução foi acrescentada ao material em pó, com ajuda de um misturador mecânico a 600 rpm durante 4 minutos.

Tabela 2 – Proporção dos componentes na pasta elaborada

Mistura	MK (gr)	SS (gr)	HS (gr)	Na_2O/SiO_2	SiO_2/Al_2O_3	Na_2O/Al_2O_3	Molaridade (mol/L)
MK1	145,3	150,4	33,6	0,35	3,50	1,24	12,65 M de NaOH
MK2	100,0	120,0	8,90	0,18	3,71	0,68	7,53 M de NaOH

As amostras foram moldadas em moldes prismáticos de 20x20x50mm. O grupo à base de MK1 foi levado para a estufa a 65°C durante 24 horas, posteriormente permaneceu selado a 23°C até sua hora de ensaio. O grupo à base de MK2 ficou selado por 7 dias a 25°C, para posteriormente ser ensaiado nas idades respetivas. Finalmente, os corpos de prova obtidos foram ensaiados à compressão em diferentes idades (Instron modelo 5569), usando uma taxa de aplicação de carga de 4000 N/min. Foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (Philips Tescan XL-30 TMP), Microtomografia de raios-X (Skycan modelo 1172) (VOI de 8µm), difração de raios-x (DRX) (Rigaku Miniflex) e a distribuição de diâmetro de poros foi determinada por Porosimetria de Intrusão de Mercúrio (PIM) (Micromeritics AutoPore IV).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 registra o comportamento da resistência à compressão das duas matrizes para 7, 28 e 56 dias. Inicialmente, ambos sistemas registram valores resistência à compressão próximos, aonde MK1 é 15% maior que MK2 (31,78 MPa para MK1 e 27,49 MPa para MK2). Porém, com o passo do tempo começa a incrementar a diferença entre valores, sendo que, MK2 registra valores de 27% e 71% a mais que MK1 para 28 e 56 dias. A queda temporal no desempenho mecânico é indício da formação de fases indesejadas no sistema.

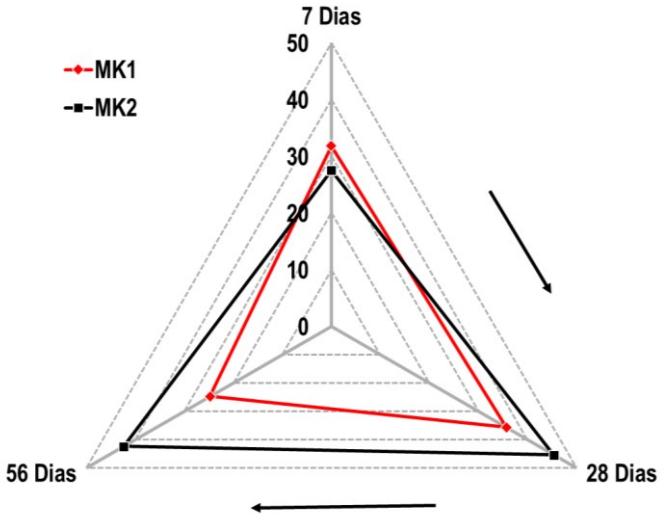


Figura 3 – Resistência à compressão do MK1 e MK2 em três idades avaliadas

Esse comportamento de redução de resistência para MK1 levantou à consideração de duas hipóteses no sistema: a formação excessiva de carbonatos ou a formação de fases zeólitas, que sendo porosas levariam ao incremento da porosidade geral do sistema. Da primeira, sabe-se que pela relação molar Na_2O/ Al_2O_3 do sistema possuía um valor mais alto do recomendado (~1), e poderia ter inconvenientes a longo prazo, entretanto, o efeito destrutivo da carbonatação foi registrado desde os 28 dias. Lamaa et al., (2023) e Pasupathy *et al.*, (2021) indicam que as fases carbonatos inibem a geopolimerização e debilitam a estrutura de modo progressivo. Em segunda possibilidade, na literatura são lançadas as seguintes justificativas: redução da formação e estruturação das cadeias de aluminosilicato de sódio (Rüscher *et al.*, 2010; Slaty *et al.*, 2015). Assim como, a utilização de uma baixa temperatura de calcinação do precursor, a qual condiciona a transformação do aluminosilicato em zeólita ou em gel amorfo. E convenientemente, temperaturas mais altas garantem uma formação amorfa (San Nicolas et al., 2013). Por isso foram realizadas as análises de microtomografia de raios-x (µCT), difração de raios-x (DRX), microscopia (MEV) e porosidade (PIM).

Na Figura 4 são apresentadas imagens bidimensionais do MK1 e MK2 no microtomógrafo. Uma das manifestações visual de fases carbonatos é a presença de pontos brancos (numa escala de tonalidades cinza) aparentemente isolados na captura da imagem, que são evidentes na Figura 6a, representando pontos de maior densidade. Entretanto, isso não é visível em MK2. Adicionalmente, o sistema a base de MK1 parece registrar maior densidade de poros quando comparados com MK2. Fato que foi confirmado pela estimação da porosidade total com esta técnica, aonde MK1 registrou um valor de 9,27%, enquanto MK2 5,82%.

a) b)

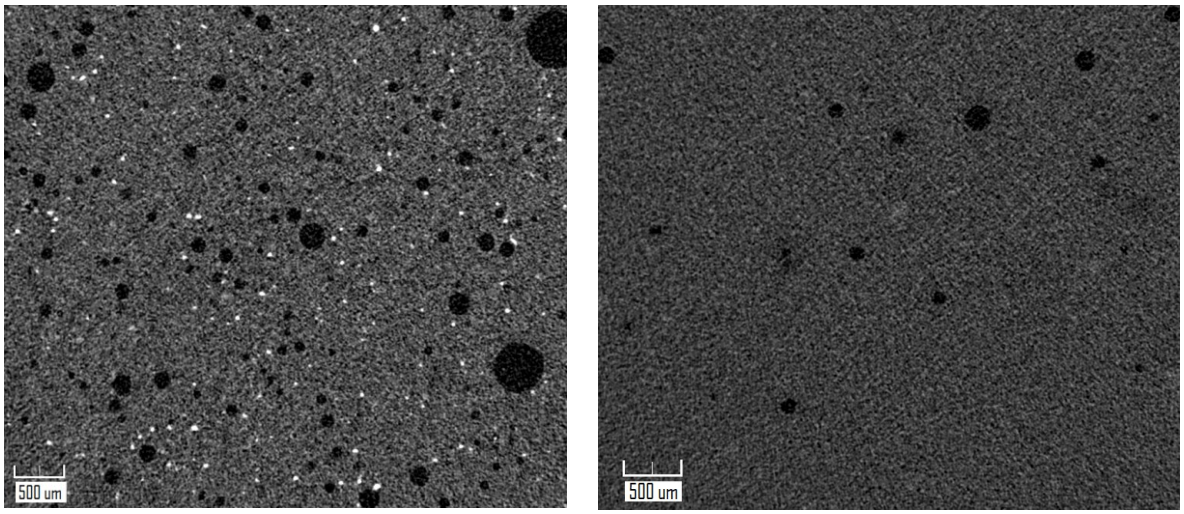


Figura 4 – Imagens das matrizes após 56 días a) MK1, e b) MK2 no microtomógrafo de raios-X

Os resultados de DRX são apresentados na Figura 5. Nestes é confirmada a presença da fase carbonato (C) para os 28 dias para MK1, enquanto MK2, não apresenta mudanças no seu espectro desde os 7 até os 56 dias, exceto as mudanças convencionais de redução de pico de quartzo (Q), caulinita (K) e Ilita (I) quando estes são integrados ao aluminosilicato de sódio. O grupo hematita (H), é predominante no sistema MK1. Adicionalmente, é evidenciado a

formação de picos mais cristalinos para os 56 dias em MK1, os quais foram associados a um tipo de zeólita NaP (Z) e que se tornam mais intensos com o passar do tempo (Juengsuwattananon *et al.*, 2019). Essa variação na intensidade de picos cristalinos é uma característica típica da transformação de fases internas, no corpo solido, que levam redução de aderência entre os contornos fases cristalinas e amorfa e consequentemente, levam à redução da resistencia mecânica (Takeda *et al.*, 2013; Rożek *et al.*, 2019).

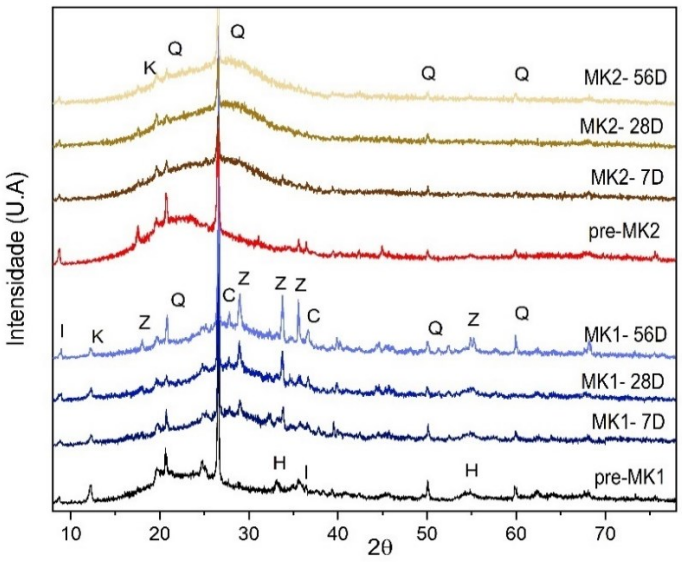
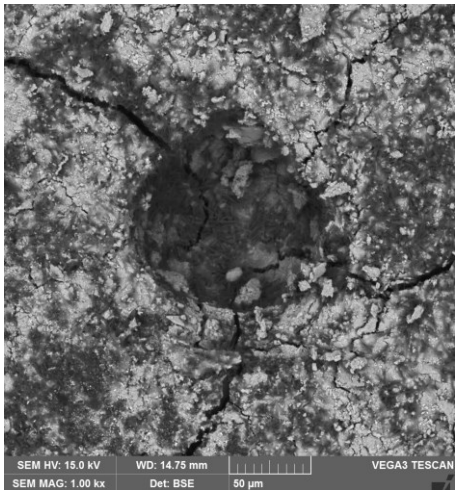


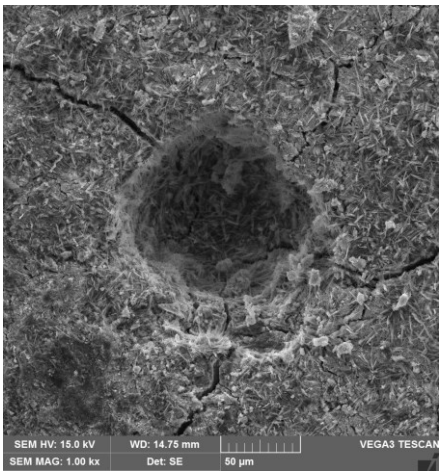
Figura 5 – Resultados de difração de raios-x para ambas as matrizes em diferentes idades

Fazendo uma análise de microscopia sobre as amostras aos 28 dias e, foram obtidas as imagens da Figura 6. Nela, a Figura 6a,b apresentam a MK1 em dois tipos de varredura, por elétrons retroespalhados (BSE) e por elétrons secundários (SE). Nela, a eflorescência (que é manifestação física externa do sal do carbonato) tem dois tipos de visualização, em tons mais obscuros para o BSE, e na forma de filamentos em tons mais claros para o SE, espalhados por toda a superfície em diferentes níveis de profundidade. Em detalhe da Figura 6c, onde coexistem a matriz principal e filamentos de carbonato sódico, foi registrada a Figura 6d, nesta dois pontos representam o EDS da imagem previa. Os filamentos são de espessura fina e não possuem uma orientação específica, sua composição principal está associada ao O, C e Na, que são os principais elementos do carbonato sódico, enquanto a matriz registra O, C, Si, Na, Al como principais elementos do aluminosilicato de sódio. Finalmente, a morfologia da superfície de MK2, na Figura 6e, evidencia uma superfície mais compacta e mais homogênea em uma única tonalidade.

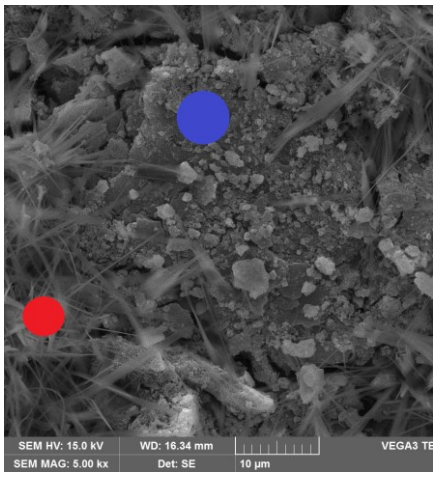
a)



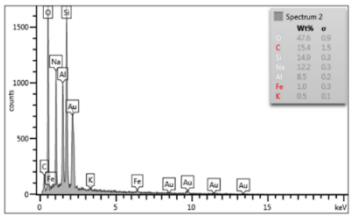
b)



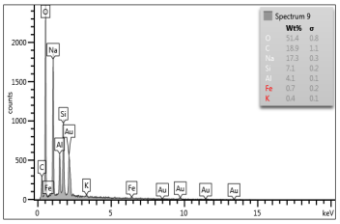
c)



d)



Ponto azul



Ponto Vermelho

e)

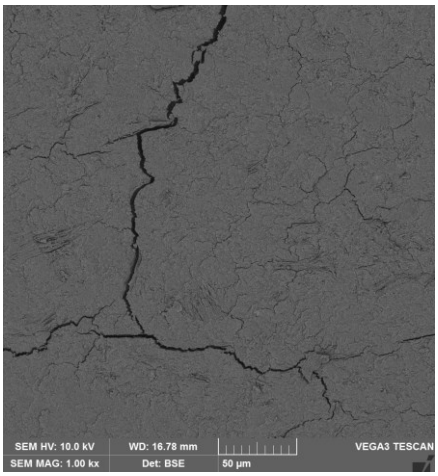


Figura 6 – Imagem MEV para a,b) MK1 em dois tipos de foco de eletrons em 1000x, c) aproximação de 5000x para MK1, com o aspecto da eflorescência, d) os EDS corresponde a dois pontos do item c), d)MK2 em 1000x

Conforme foi visualizado, é normal o registro de microfissuras nestes sistemas atrelados ao processo de vácuo durante realização do ensaio, pois estas não eram perceptíveis ao olho previa à análise. Em relação à porosidade do sistema, via intrusão de mercúrio aos 28 dias, o grupo à base de MK1 exibiu a maior porosidade total (próxima do 30%), o que é congruente com os resultados de µCT. O acumulado da distribuição de tamanho de poro fico para regiões de meso (2-50 nm) e macroporos (50-7500nm), representativo de matrizes geopoliméricas (Muñiz-Villarreal *et al.*, 2011). Sendo que MK1, registra picos em 24 nm e em 95 nm. Todavia, MK2, possui pico com concentrações em torno dos 11 nm e dos 55 nm. Sendo assim, o sistema à base de MK2 apresenta-se como um sistema com refinamento de poros, i.e. mais compacto, que MK1. Rovnaník (2010) aponta que, a aplicação de cura térmica leva à formação de poros maiores. Assim como Torres-Carrasco e Puertas (2017) manifesta que a maior incorporação de silicato no sistema promove uma redução na porosidade total.

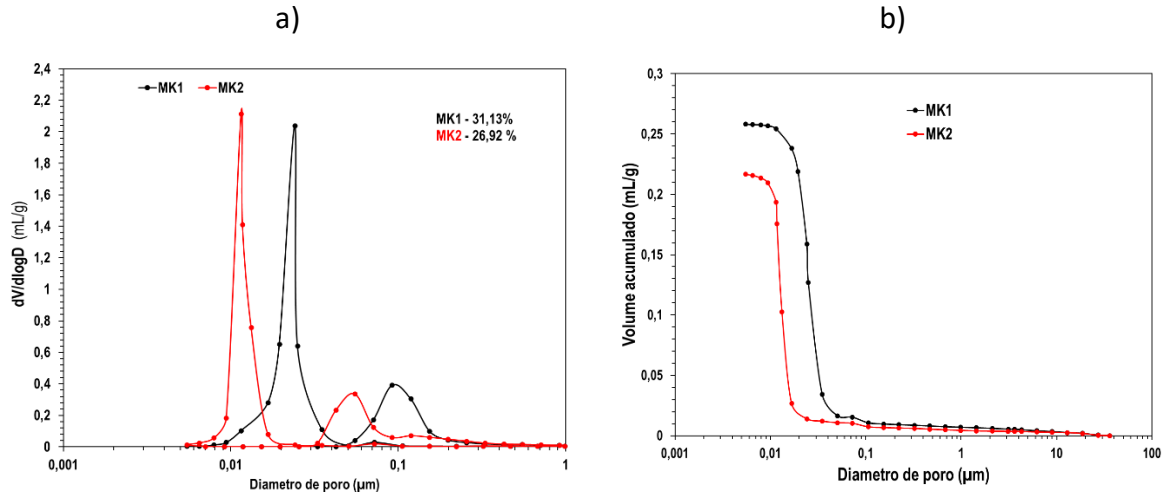


Figura 8 – Curvas de distribuição de poros a) A variação volumétrica e, b) o volume acumulado

CONCLUSÕES

Neste estudo foram registradas as principais manifestações de formação de fase carbonato e zeólitas em sistemas geopoliméricos, suspeitando da sua formação inicialmente pelo comportamento temporal da resistência à compressão, avaliando suas modificações de fase mediante a difração de raios-x, registrando seu contraste via microscopia eletrônica de varredura ou microtomografia de raios-x e finalizando com a distribuição de poros no sistema. O cálculo proposital das relações molares e a concentração molar do ativador e reatividade dos sistemas indicam as possíveis mudanças químicas que o sistema pode registrar ao longo do tempo são as que definem a estabilidade química dele. Esses mesmos parâmetros poderiam ser avaliados por mais tempo e em condições de argamassa, para determinar se a presença de bloqueio nos contornos de cadeias, pelo agregado miúdo, evita a propagação da carbonatação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos do processo 151351/2022-8 e às empresas doadoras dos materiais precursores. E em especial ao Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia na

Construção Civil (NANOTEC) por dispor das instalações e equipamentos para desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

Akduman, S. *et al.* (2024) 'Opportunities and challenges in constructing a demountable precast building using C&D waste-based geopolymer concrete: A case study in Türkiye', *Journal of Cleaner Production*, 434(November 2023), p. 139976. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139976.

Avet, F. *et al.* (2016) 'Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays', *Cement and Concrete Research*, 85, pp. 1–11. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015.

Cunha, T.F.R.F. da (2014) 'Desenvolvimento de geopolímeros porosos para isolamentos térmicos não tóxicos'.

Davidovits, J. (1991) 'Geopolymers', *Journal of Thermal Analysis*, 37, pp. 1633–1656. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_299-1.

Fernández-Jiménez, A. *et al.* (2006) 'The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes', *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1–3), pp. 111–119. Available at: https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015.

Ferreiro, S. *et al.* (2019) 'Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements', *Applied Clay Science*, 169(December 2018), pp. 81–90. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.12.021.

Görhan, G., Aslaner, R. and Şinik, O. (2016) 'The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste', *Composites Part B: Engineering*, 97, pp. 329–335. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.019.

Guo, W. *et al.* (2022) 'Effects of various curing methods on the compressive strength and microstructure of blast furnace slag-fly ash-based cementitious material activated by alkaline solid wastes', *Construction and Building Materials*, 357(October), p. 129397. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129397.

Hardjito, D. and Rangan, B. V (2005) 'Development and Properties of Low-calcium Fly Ash Based Geopolymer LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE By Faculty of Engineering Curtin University of Technology', *Australia : University of Technology Perth*, (January), p. 48.

Juengsuwattananon, K. *et al.* (2019) 'Correlation between initial SiO2/Al2O3, Na2O/Al2O3, Na2O/SiO2 and H2O/Na2O ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer', *Construction and Building Materials*, 226, pp. 406–417. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.146.

Lamaa, G. *et al.* (2023) 'Carbonation of Alkali-Activated Materials: A Review', *Materials*, 16(8). Available at: https://doi.org/10.3390/ma16083086.

Marvila, M.T. *et al.* (2023) 'Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na20', *Journal of Materials Research and Technology*, 23, pp. 4551–4565. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.088.

Masi, G. *et al.* (2015) 'The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers', *Composites Part B: Engineering*, 76, pp. 218–228. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.023.

Muñiz-Villarreal, M.S. *et al.* (2011) 'The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer', *Materials Letters*, 65(6), pp. 995–998. Available at: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049.

Pasupathy, K., Sanjayan, J. and Rajeev, P. (2021) 'Evaluation of alkalinity changes and carbonation of geopolymer concrete exposed to wetting and drying', *Journal of Building Engineering*, 35(November 2020), p. 102029.

Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102029.

Pelisser, F. *et al.* (2021) 'Compressive strength, modulus of elasticity and hardness of geopolymeric cement synthetized from non-calcined natural kaolin', *Journal of Cleaner Production*, 280, p. 124293. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124293.

Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J. (2007) 'Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling', *Chemical Engineering Science*, 62(9), pp. 2318–2329. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.028.

Ramos, G.A. *et al.* (2018) 'Effect of porcelain tile polishing residue on geopolymer cement', *Journal of Cleaner Production*, 191, pp. 297–303. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.236.

Rovnaník, P. (2010) 'Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer', *Construction and Building Materials*, 24(7), pp. 1176–1183. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023.

Rożek, P., Król, M. and Mozgawa, W. (2019) 'Geopolymer-zeolite composites: A review', *Journal of Cleaner Production*, 230, pp. 557–579. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.152.

Rüscher, C.H. *et al.* (2010) 'Weakening of alkali-activated metakaolin during aging investigated by the molybdate method and infrared absorption spectroscopy', *Journal of the American Ceramic Society*, 93(9), pp. 2585–2590. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03773.x.

San Nicolas, R., Cyr, M. and Escadeillas, G. (2013) 'Characteristics and applications of flash metakaolins', *Applied Clay Science*, 83–84, pp. 253–262. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.036.

Santa, R.A.A.B. (2012) *DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE CINZAS PESADAS ORIUNDAS DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL E METACAULIM SINTETIZADO A PARTIR DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PAPEL*, *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Sanz, M.C. (2007) *Nuevos materiales cementantes basados en la activaciõn alcalina de cenizas volante. Carcaterización de geles N-A-S-H en función del contenido de silice soluble. Efecto del Na2SO4*. Universidad Automona de Madrid.

Silva, P. De, Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (2007) 'Kinetics of geopolymerization: Role of Al2O3 and SiO2', *Cement and Concrete Research*, 37(4), pp. 512–518. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003.

Singh, B. *et al.* (2015) 'Geopolymer concrete: A review of some recent developments', *Construction and Building Materials*, 85, pp. 78–90. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.

Slaty, F. *et al.* (2015) 'Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay', *Applied Clay Science*, 104, pp. 229–237. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.037.

Snellings, R., Salze, A. and Scrivener, K.L. (2014) 'Use of X-ray diffraction to quantify amorphous supplementary cementitious materials in anhydrous and hydrated blended cements', *Cement and Concrete Research*, 64, pp. 89–98. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.011.

Takeda, H. *et al.* (2013) 'Characterization of zeolite in zeolite-geopolymer hybrid bulk materials derived from kaolinitic clays', *Materials*, 6(5), pp. 1767–1778. Available at: https://doi.org/10.3390/ma6051767.

Torres-Carrasco, M. and Puertas, F. (2017) 'Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products', *Construction and Building Materials*, 139, pp. 342–354. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.071.

Zribi, M. and Baklouti, S. (2021) 'Investigation of Phosphate based geopolymers formation mechanism', *Journal of Non-Crystalline Solids*, 562(September 2020), p. 120777. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120777.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARREFECIMENTO EVAPORATIVO: HISTÓRIA E MATERIAIS PARA APLICAÇÕES CONTEMPORÂNEAS

Teresa Diaz Gonçalves[a]

[a]Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Materiais, Av. do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, teresag@lnec.pt

RESUMO

O arrefecimento evaporativo aproveita o consumo de calor associado à evaporação da água, retirando-o do ambiente. É uma das estratégias a que diversas civilizações ao longo da história recorreram para mitigar as altas temperaturas em habitats humanos durante a época quente, sendo emblemáticas as torres "apanhadoras" de vento do Médio Oriente ou a tradição de molhar pisos de cerâmica porosa para regular a temperatura em interiores e terraços. Hoje estão disponíveis no mercado múltiplas marcas e modelos de equipamentos de arrefecimento evaporativo, mas as soluções arquitetónicas baseadas neste princípio continuam largamente esquecidas, sem integração no curso da evolução tecnológica. Neste artigo apresenta-se uma breve revisão da literatura sobre as aplicações históricas e atuais do arrefecimento evaporativo e discute-se o potencial de materiais porosos como cerâmica de barro vermelho, para incorporar essa estratégia na arquitetura. Resumem-se os resultados de um trabalho anterior, em que se observaram reduções da temperatura superficial de diferentes materiais que ultrapassaram os 5ºC à sombra e os 20ºC ao sol, e apresentam-se os primeiros resultados de medições microestruturais de um material de cerâmica porosa efetuadas por microtomografia de raios-X. Estes resultados são de interesse no contexto da sustentabilidade e da economia circular.

Palavras-chave: sustentabilidade, economia circular, arrefecimento evaporativo, materiais porosos, microestrutura

1 INTRODUÇÃO E ESTADO DA ARTE

As condições de calor extremo afetam negativamente o bem-estar, a produtividade no trabalho e a saúde, especialmente entre as populações vulneráveis. De acordo com a Organização Mundial de Saúde, o stress térmico é uma emergência médica com alta taxa de mortalidade que aumenta o risco de acidentes e agrava doenças cardiovasculares, diabetes, problemas de saúde mental, asma e a transmissão de certas doenças infeciosas (OMS 2024).

Uma das estratégias a que diversas civilizações ao longo da história recorreram para mitigar as altas temperaturas em habitats humanos durante a época quente é o arrefecimento evaporativo. Este baseia-se no facto de a evaporação de água envolver consumo de energia, que é retirada do ambiente, tal como acontece no processo fisiológico da transpiração, em que a água libertada pelo organismo se evapora à superfície da pele, reduzindo a temperatura desta.

Emblemáticas neste contexto são, por exemplo, as torres "apanhadoras" de vento do Médio Oriente, encontradas no Irão e países vizinhos (Mahyari 1996, Valibeig 2014). Estas estruturas conseguiam o arrefecimento dos interiores não só pela captação de ar a alturas elevadas e por fazerem depois passar esse ar através da massa da torre, que em regra se encontrava a menor temperatura, mas também frequentemente pela combinação destas estratégias com o arrefecimento evaporativo. Este era obtido pelo contacto do ar com fontes e reservatórios de água ou com zonas de alvenaria humedecida pela ascensão capilar do solo, solução esta mais frequente no Iraque. As caves de alguns edifícios mais abastados tinham ligação a um sistema subterrâneo de túneis e poços (o *qanat*) que permitia arrefecer evaporativamente o ar de forma muito eficiente. Também colocavam vasilhas de cerâmica porosa com água junto à entrada na habitação do ar proveniente da torre. Neste tipo de vasilha, o arrefecimento deve-se à parcela de água que atravessa a cerâmica porosa e evapora na superfície exterior desta. A colocação das vasilhas na zona de passagem do ar teria o duplo objetivo de tirar partido da velocidade do ar para acelerar o processo evaporativo e a convecção, contribuindo para o arrefecimento da vasilha, da água nela contida e do ambiente.

Na Península Ibérica, as vasilhas de cerâmica porosa eram tradicionalmente usadas, com o referido duplo objetivo de manter a água fresca e de arrefecer os ambientes em que estrategicamente eram colocadas. Este tipo de vasilhas (potes, cântaros, *piporros*) estava ainda em utilização corrente no Alentejo e no Algarve há meio século.

Outra estratégia tradicional em Portugal é a molhagem de pisos de cerâmica porosa (Figura 1), para regular a temperatura em interiores e terraços.

Figura 1 – Pavimento tradicional de cerâmica porosa usada em Portugal: em dias quentes, saturava-se com água e a subsequente evaporação ajudava a manter o ambiente fresco

No âmbito do apoio à resolução de problemas técnicos em países em desenvolvimento, Rusten (1985) descreve também vários dispositivos simples, em geral baseados na utilização de um meio evaporativo constituído por elementos têxteis ou barro cozido. O mais rudimentar consiste numa tela suspensa numa moldura de madeira. A orla inferior da tela está mergulhada num recipiente de água, de onde absorve água por capilaridade, sendo a moldura posicionada de modo que o ar em movimento atravesse o material têxtil humedecido, por exemplo, em frente a uma janela. Outros dispositivos incluem alimentação elétrica para alimentar ventoinhas destinadas a aumentar a circulação do ar e, consequentemente, a taxa de evaporação, podendo também incluir uma bomba para elevar a água (Kapilan et al. 2023). Note-se que todas estas técnicas de arrefecimento evaporativo direto, em que o ar a ser arrefecido entra em contacto direto com a água, alteram a humidade relativa desse ar, o que pode ser desadequado para alguns fins, por exemplo, quando está em causa a conservação de alimentos. Além disso, com os dispositivos de arrefecimento evaporativo direto, se não existir uma manutenção cuidada, há risco de contaminação do ambiente com a bactéria Legionella, responsável pela doença do legionário. Esta bactéria desenvolve-se no meio evaporativo e é transportada pelos aerossóis dispersos pelas ventoinhas (Velasco Gómez et al., 2010). Para minimizar estes problemas, desenvolveram-se sistemas em que o ar a ser arrefecido não entra em contacto com a água. Estes incluem um permutador de calor, componente que tipicamente possui dois conjuntos de canais separados por elementos condutores de calor, por exemplo, de alumínio. Um dos conjuntos de canais serve para passagem do ar quente que é sujeito ao processo evaporativo e no processo arrefece os elementos de separação, arrefecendo estes então por sua vez o ar que está no segundo conjunto de canais (Rusten 1985). Outros dispositivos, crescentemente sofisticados, combinando sistemas diretos com sistemas indiretos, foram desenvolvidos nas últimas décadas, visando aumentos de eficiência e do potencial de comercialização. Há, por exemplo, soluções que passam pela pré-desumidificação do ar com dessecantes ou membranas, estratégia que visa melhorar a eficácia do arrefecimento evaporativo em climas menos secos (Yang *et al.* 2019). Camargo *et al.* (2006) acreditam que o arrefecimento evaporativo direto pode ser eficiente em situações em que a temperatura de bolbo húmido é inferior a 24°C. A temperatura de bolbo húmido corresponde à temperatura medida, em condições padrão, com um termómetro envolto num pano húmido, cuja temperatura é portanto reduzida pelos efeitos do arrefecimento evaporativo. De acordo com os autores, noutros casos, é possível efetuar uma pré-desumidificação do ar, associar sistemas evaporativos diretos a sistemas indiretos ou utilizar o ar condicionado como sistema de apoio.

No âmbito do programa MIT D-Lab, que visa promover abordagens colaborativas e soluções práticas para os desafios globais da pobreza, Verploegen *et al.* (2018) publicaram um guia para a produção e utilização de potes de barro e câmaras de arrefecimento evaporativo na preservação de alimentos. Contudo, devido à globalização dos desafios da sustentabilidade, o arrefecimento evaporativo é cada vez menos um mero recurso de baixo custo para países em desenvolvimento. Já em 2002, por exemplo, a agência estatal responsável pela gestão e proteção dos recursos naturais e energéticos do Novo México, EMNRD-ECMD, publicava um Manual de Diretrizes de Projeto de Arrefecimento Evaporativo para Escolas e Edifícios Comerciais (Palmer 2002). Tendo em vista a poupança de energia dos edifícios e a redução da poluição, este manual oferece informação sobre os princípios do arrefecimento evaporativo e sobre alternativas de equipamentos de arrefecimento baseados nesse princípio. Duas décadas mais tarde, há no mercado múltiplas marcas e modelos de equipamentos desta natureza, estando várias disponíveis no mercado nacional (Dunn 2023, Arflex 2023, Esencial Cool 2024, Leroy Merlin 2024).

Até às últimas décadas, o arrefecimento evaporativo não despertava grande interesse nos países desenvolvidos, sendo visto essencialmente como uma estratégia histórica curiosa, na melhor das hipóteses com potencial para ajudar a mitigar carências tecnológicas a baixo custo. Velasco Gómez

(2010) atribui o esquecimento destes métodos, apesar da notória eficiência particularmente em climas quentes e secos, não só aos problemas dos primeiros equipamentos de arrefecimento evaporativo direto, como a doença do legionário ou a difícil manutenção dos dispositivos, mas também à predominância de outros sistemas de arrefecimento, como a compressão mecânica (ar condicionado). Este mesmo argumento pode aplicar-se ao esquecimento, que persiste até aos dias de hoje, das soluções arquitetónicas de arrefecimento evaporativo, estratégias adaptativas desenvolvidas ao longo do tempo em climas quentes e secos como o da Península Ibérica, de que são exemplo a humidificação de elementos construtivos de cerâmica porosa ou a colocação de telas humedecidas nos percursos do ar. Estas estratégias requeriam apenas uma manutenção simples, mas continuam esquecidas, sem integração no curso da evolução tecnológica, estando o crescente interesse no arrefecimento evaporativo, decorrente dos desafios da sustentabilidade, a ser direcionado quase exclusivamente para o caso dos equipamentos com potencial de comercialização.

No entanto, as soluções arquitetónicas de arrefecimento evaporativo são de grande interesse pois não só respondem à crescente procura de arrefecimento usando uma fonte de energia renovável, como também apresentam elevada durabilidade e potencial de reparação. Além disso, baseiam-se em materiais de construção, tipicamente cerâmica porosa, que são baratos, seguros e facilmente acessíveis, bem como recicláveis ou mesmo reutilizáveis. Estas soluções podem, portanto, ajudar a reduzir o desperdício em dois setores intensivos em recursos, eletrónica e construção, proporcionando ao mesmo tempo oportunidades para novos empregos ligados à conceção, projeto e implementação de soluções e à seleção e produção de materiais com caraterísticas adequadas.

Neste artigo discute-se o potencial e as propriedades de materiais porosos de construção como a cerâmica de barro vermelho, tendo em vista a sua utilização em soluções de arrefecimento evaporativo.

2 POTENCIAL DOS MATERIAIS POROSOS DE CONSTRUÇÃO

O arrefecimento evaporativo assenta no facto de a evaporação de água ser endotérmica, ou seja, envolver consumo de energia, com transferência de calor do ambiente para a água e consequente redução da temperatura local. Isto ocorre quando ar não saturado entra em contacto com uma superfície molhada cuja temperatura é superior à temperatura de ponto de orvalho do ar (a temperatura para a qual o ar está saturado com a mesma quantidade de vapor de água). Nesse caso, dá-se evaporação de água da superfície para o ar circundante. O calor latente de evaporação (a energia necessária para a mudança de fase) é absorvido do ar, da água ou do próprio material, causando o arrefecimento destes. O ar é também humidificado devido à transferência de vapor de água.

Este processo é desencadeado e controlado pelo gradiente de humidade relativa entre o ar adjacente ao material — que pode atingir cerca de 100% de humidade relativa no caso de uma superfície livre de água ou de um material poroso saturado — e o valor da humidade relativa do ar circundante. É por esta razão que o arrefecimento evaporativo é mais eficaz em climas quentes e secos, onde a baixa humidade relativa do ar origina uma mais elevada taxa de evaporação da água.

O potencial máximo de arrefecimento depende da diferença entre as temperaturas de bolbo seco e de bolbo húmido. Esta última representa a temperatura até à qual o ar pode ser arrefecido pela evaporação da água, aumentando com a temperatura de bolbo seco e com a humidade relativa. Teoricamente, é possível chegar a uma redução de temperatura igual à diferença entre as duas temperaturas, mas tal não é normalmente alcançável na prática. Segundo Rusten (1985), deverá ser possível atingir entre 50% e 80% do máximo teórico.

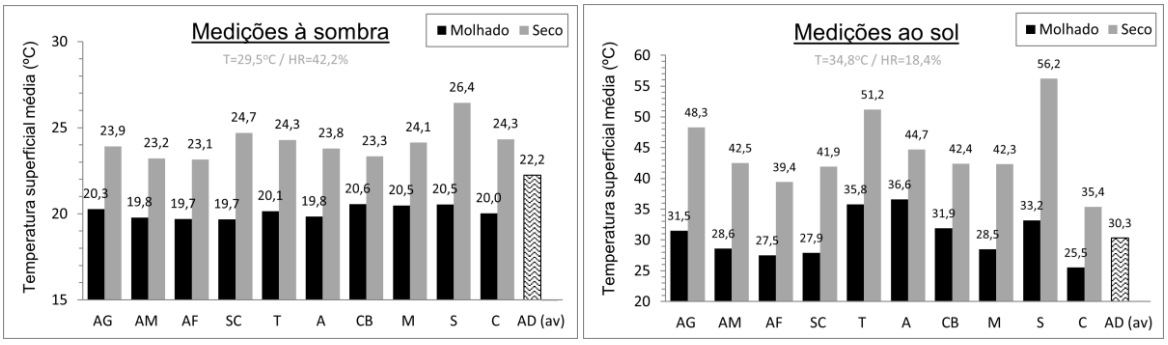
Além da temperatura e da humidade relativa, o processo de arrefecimento evaporativo depende de fatores como a velocidade do ar e a superfície específica de evaporação (Rusten 1985), aos quais se pode ainda acrescentar a radiação solar:

a) A velocidade do ar potencia o processo de arrefecimento. Por um lado, aumenta a taxa de renovação do ar adjacente à superfície evaporativa, que de outra forma ficaria limitada à capacidade de um processo puramente difusivo, mantendo um gradiente de humidade favorável à evaporação. Por outro lado, facilita a transferência convectiva de calor da superfície arrefecida pela evaporação para o ar circundante.

b) A radiação solar interfere no processo de arrefecimento, especialmente quando os materiais estão expostos diretamente aos raios solares, tornando-o não adiabático. Todo o processo, incluindo a componente convectiva, é influenciado por essa radiação e pelas propriedades dos materiais que determinam a correspondente variação da temperatura destes, tais como as propriedades óticas e o calor específico (quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa do material em uma unidade de temperatura).

c) A superfície específica de evaporação é a área superficial de um material que efetivamente contribui para o processo de evaporação. Numa superfície livre de água, a superfície específica de evaporação corresponde à área da superfície de água. Contudo, no caso dos materiais porosos, em que a evaporação ocorre a partir dos poros preenchidos com água, a questão é mais complexa. Por um lado, nem toda a superfície corresponde a água, o que reduz a área efetivamente disponível para a evaporação. Por outro lado, a rugosidade do material e a forma não necessariamente plana da superfície líquida nos poros podem aumentar a área disponível para a evaporação.

Num artigo publicado na revista da Associação Americana de Engenheiros Civis (ASCE), Diaz Gonçalves *et al.* (2015) mediram com infravermelhos a redução da temperatura superficial para vários tipos de materiais de construção porosos, duas pedras naturais, uma argamassa de cal, um tijolo de cerâmica vermelha e um tijolo de silicato de cálcio, bem como de alguns materiais incoerentes e fluidos, incluindo uma superfície livre de água pura, que serviram como referência (Figura 2).



Legenda

Materiais sólidos incoerentes e fluidos:
- AG - Areia siliciosa grossa (1.60—2.00 mm)
- AM - Areia siliciosa média (0.30–0.50 mm
- AF - Areia siliciosa fina (0.08–0.16 mm)
- S - Serradura
- C - Pasta de papel
- AD - Água destilada

Materiais sólidos coerentes (porosidade capilar, %V):
- SC - Silicato de cálcio (81.9%)
- T - Tijolo cerâmico vermelho (19.6%)
- A - Argamassa de cal aérea e areia (20.8%)
- CB - Calcário Português corrente (13.5%)
- M - Calcário de Maastricht (42.7%)

Figura 2 – Temperatura superficial dos materiais secos ou em processo evaporativo (Diaz Gonçalves *et al.* 2015)

Os resultados estão resumidos na Figura 2 e mostram que, ao sol, alguns materiais atingiram mais de 50°C no estado seco. No entanto, durante a secagem evaporativa, a temperatura dos mesmos materiais caiu em média 10 a 15°C, chegando esta queda aos 23ºC no caso do tijolo de silicato de cálcio, um material com porosidade capilar muito elevada, superior a 80% em volume.

Determinando a temperatura de bolbo húmido T_h a partir de um gráfico psicrométrico para as duas condições reportadas na Figura 3, temos T_h=20,1ºC para as medições à sombra (T=29,5ºC e HR=42,2%) e T_h=18,3ºC para as medições ao sol (T=34,8ºC e HR=18,4%). Isto significa que em ambos os casos se estava abaixo do limite de 24ºC indicado por Camargo *et al.* (2006) para haver eficácia no arrefecimento evaporativo direto. Apesar de a ideia se referir ao arrefecimento do ar ambiente, parece haver consistência com os resultados obtidos, em que ocorreu um arrefecimento por vezes muito significativo da superfície dos materiais, mais de 5ºC à sombra e de mais de 20ºC ao sol.

3 ESTUDO MICROESTRUTURAL E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados acima resumidos permitiram a Diaz Gonçalves *et al.* (2015) concluir que materiais porosos de construção correntes têm capacidade para funcionar como meios de arrefecimento evaporativo eficiente, podendo, portanto, ser incorporados em soluções destinadas a alcançar maior conforto e eficiência energética, enquanto mantêm eventualmente uma função construtiva ou arquitetónica. Contudo, as razões exatas para as diferenças observadas entre os diferentes materiais testados por estes autores não são fáceis de destrinçar. A incerteza deve-se em larga medida aos fatores elencados nas alíneas a), b) e c) acima e, em particular, à questão da superfície específica, que depende da microestrutura dos materiais e da forma assumida pelas superfícies microscópicas de água nos poros.

De acordo com a lei de Laplace, a água forma no interior dos poros uma superfície que não é plana, mas apresenta um determinado raio de curvatura:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r_c},$$

onde $\triangle$P é a pressão capilar [M $L^{-1}T^{-2}$], γ a tensão superficial [M T^{-2}] e r_c o raio de curvatura [L].

Se assumirmos que os poros são cilíndricos e que o ângulo de contacto do líquido com o material nos poros é zero, a superfície efetiva de evaporação num poro corresponde à superfície interna de uma meia-esfera, sendo portanto o dobro da superfície efetiva de evaporação que existiria se a superfície líquida fosse plana. A existência desta curvatura e o aumento da superfície efetiva de evaporação que ela comporta é certamente um dos fatores que justificam o facto de os materiais porosos terem sido ao longos dos tempos sistematicamente adotados como meios evaporativos eficientes. Contudo, na realidade, nem os poros são necessariamente cilíndricos, nem o ângulo de contacto com o material é necessariamente zero, pelo que, sem mais conhecimento sobre as caraterísticas microestruturais do material, a determinação da área efetiva da superfície líquida num poro saturado tem um elevado grau de incerteza.

É também usualmente considerada a lei de Kelvin, da qual decorre que para cada valor da humidade relativa do ambiente, todos os poros com dimensão abaixo de um determinado raio crítico estão saturados:

$$r_{cr} = \frac{2\gamma\, V_m \cos\theta}{R\,T\ \ln\left(\frac{p_s}{p}\right)},$$

onde r_{cr} é o raio crítico [L], γ a tensão superficial [$M\ T^{-2}$], V_m o volume molar [L^3], θ o ângulo de contato [-], R a constante universal dos gases [$M\ L^2\ T^{-2}\ \Theta^{-1}$], T a temperatura [Θ], p a pressão de vapor e p_s a pressão de saturação do vapor [$M\ L^{-1}\ T^{-2}$].

Contudo, esta lei pressupõe condições de equilíbrio, enquanto a secagem evaporativa dos materiais porosos é um processo dinâmico que pode além disso envolver transporte não-saturado (Hall and Hoff 2002). Assim, não é certo que a evaporação ocorra sequer a partir de poros saturados com dimensão abaixo de determinado valor, pelo que a geometria real que a superfície líquida assume no interior dos poros durante um processo evaporativo e a real gama de dimensões dos poros envolvidos no processo são desconhecidas.

O esclarecimento destas incógnitas passa por uma análise microestrutural dos materiais, que permita aferir com bases reais a legitimidade das assunções referidas ou a necessidade do seu ajustamento. No sentido de contribuir para esse desiderato, realizou-se uma análise preliminar por microtomografia de raios-X do tijolo de barro vermelho. A Figura 3 mostra uma das imagens obtidas, onde as zonas escuras correspondem aos vazios e de onde ressalta que, pelo menos à escala em causa, os poros têm morfologia fissural, o que indica que a assunção de que são cilíndricos é desadequada.

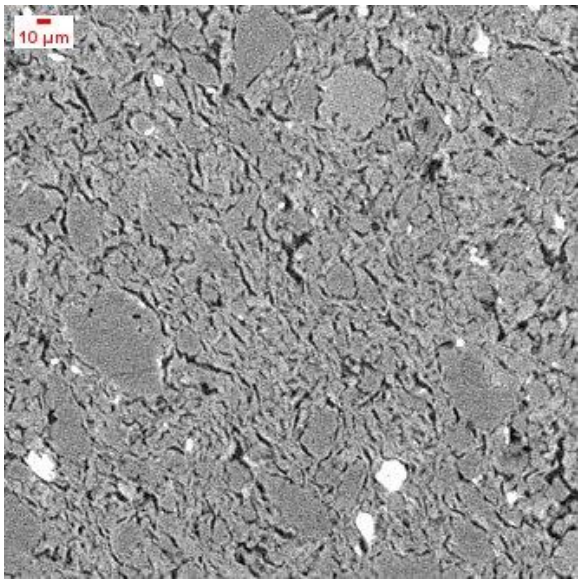


Figura 3 – Microestrutura do tijolo de barro vermelho, obtida por microtomografia de raios-X

Este trabalho de caraterização microestrutural está em curso, sendo expectável que estejam disponíveis mais dados à data da realização da conferência.

CONCLUSÕES

O arrefecimento evaporativo tem sido utilizado por diversas civilizações ao longo dos tempos para mitigar as altas temperaturas, representando uma fonte de energia renovável que pode contribuir para uma maior eficiência energética. O processo é controlado pelo gradiente de humidade relativa entre o material e o ar circundante, revelando-se especialmente eficaz em climas quentes e secos, como o de Portugal continental durante o verão. Trabalhos anteriores demonstraram a sua eficácia nestas condições, observando-se significativa redução da temperatura superficial para diferentes tipos de materiais porosos, de 3°C a 5°C à sombra, com média de 4°C, e de 8°C a 23°C ao sol, com média de 14°C. Contudo, as razões exatas para as diferenças observadas entre os diferentes materiais não são

fáceis de identificar. De facto, além da temperatura e da humidade relativa, o processo de arrefecimento evaporativo depende de fatores como a superfície específica de evaporação, constituída pelas microsuperfícies líquidas que se estabelecem no interior dos poros. Com o intuito de esclarecer o efeito deste fator, investigou-se a microestrutura de um tijolo cerâmico por microtomografia de raios X. Os primeiros resultados são promissores e sugerem que os poros têm uma morfologia fissural, contrariando a suposição habitual de poros cilíndricos. Um cabal esclarecimento das caraterísticas microestruturais facilitará o estabelecimento de assunções realistas de modelação da superfície efetiva de evaporação, permitindo o desenvolvimento futuro de soluções arquitetónicas eficazes de arrefecimento evaporativo.

AGRADECIMENTOS

As medições por microtomografia de raios-X foram realizadas por Fabian Wilde no DESY, em Hamburgo, na linha P05 que é operada pelo Helmholtz-Zentrum Hereon. O trabalho da autora é realizado no âmbito do projeto interno do LNEC *SUMA 27 - Materiais para a Sustentabilidade na Construção* (procº 0208/1102/24238).

REFERÊNCIAS

Arflex (2023). Catálogo de ventiladores evaporativos AXL200i, AL200i, ADD125, AVE90, AXXL, AKD25C e AVE18P. https://arflex.pt/wp-content/uploads/2023/07/catalogo-2023.pdf

Diaz Gonçalves, T., Brito, V., Vidigal, F., Matias, L., & Faria, P. (2015). Evaporation from porous building materials and its cooling potential. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(8), 04014222. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001174.

Dunn, T. (2023) Swamp coolers are a cheap ac alternative for dry climates. Here's what to know before you buy. Wirecutter, September 6. Wirecutter is a product review website owned by The New York Times Company. https://www.nytimes.com/wirecutter/blog/do-swamp-coolers-work/

Esencial Cool (2024). Arrefecedores evaporativos portáteis. https://esencialcool.com/pt-pt/category/arrefecedores-evaporativos-portateis/, página consultada em 2024-06-25.

Gómez, E.V., Martínez, F.R., & González, A. T. (2010). The phenomenon of evaporative cooling from a humid surface as an alternative method for air-conditioning. Journal homepage: www. IJEE. IEEFoundation. org, 1(1), 69-96.

Hall, C., Hoff, W.D. (2002). Water Transport in Brick, Stone and Concrete. Spon Press, London and New York. ISBN 0-419-22890-X.

Kapilan, N., Isloor, A. M., & Karinka, S. (2023). A comprehensive review of evaporative cooling systems. Results in Engineering, 101059.

Leroy Merlin (2024). Climatizadores evaporativos. https://www.leroymerlin.pt/produtos/aquecimento-e-climatizacao/ventoinhas-e-climatizadores/climatizadores/?p=1, página consultada em 2024-06-25.

Mahyari, A. (1996). The wind catcher: a passive cooling device for hot arid climate.

Palmer, J. D. (2002). Evaporative cooling design guidelines manual for New Mexico schools, and commercial buildings. NRG engineering, 2626, 1-99.

Rusten (1985). Technologies for Development. Understanding Evaporative Cooling. Volunteers in Technical Assistance (VITA), Arlington, Virginia. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABC960.pdf

Valibeig, N., Nasekhian, S., & Tavakoli, S. (2014). The role of wind catchers in improving people's comfort. Eco-Architecture V: Harmonisation between Architecture and Nature, 142, 93-102.

Verploegen, E., Rinker, P., & Ognakossan, K. E. (2018). Evaporative cooling best practices: Producing and using evaporative cooling chambers and clay pot coolers (No. WorldVeg Staff Publication). MIT D-Lab.

WHO (2024) Heat and health. World Health Organization. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health, página consultada em 2024-06-25.

Yang, Y., Cui, G., & Lan, C. Q. (2019). Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109230.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFEITO DA ATIVAÇÃO ALCALINA EM IDADES INICIAIS APLICADA À TAIPA COM SOLO BRASILEIRO E SOLO PORTUGUÊS

Karina Latosinski[a]; Rute Eires[b]; Alexandre Silva de Vargas[c]; Leticia Comoretto[d]

[a] Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Costa e Silva, 79070-900, Campo Grande, Brasil, karina.latosinski@ufms.br

[b] Universidade do Minho - Campus de Azurém, Av. da Universidade 4800-058, Guimarães, Portugal, rute@civil.uminho.pt

[c] Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima no 97105-900 – Cidade Universitária, Santa Maria-RS, Brasil, alexandre.vargas@ufms.br

[d] Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima no 97105-900 – Cidade Universitária, Santa Maria-RS Brasil, leticia.comoretto@acad.ufsm.br

RESUMO

A terra é empregada na construção de edifícios desde os primeiros assentamentos humanos. Com a recente busca pela descarbonização, foi intensificado o interesse em utilizar este material que possui grande variabilidade, porém fácil obtenção e versatilidade - aplicado em adobe, taipa de pilão, taipa de mão (tabique) entre outras técnicas. Na taipa de pilão frequentemente são adicionados cimento Portland ou cal hidratada como estabilizadores químicos para melhoria do desempenho mecânico. Considerando diminuir ou eliminar o uso desses materiais que geram alto impacto ambiental durante a fabricação, ligantes alternativos revelam potencial de aplicabilidade. Desse modo, o presente trabalho busca comparar os efeitos em idades iniciais de baixas concentrações simples e combinadas de ativadores alcalinos, nesse caso hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio, em um solo brasileiro e um solo português sob semelhantes condições. Além da revisão de literatura, os procedimentos experimentais foram estruturados nas etapas: caracterização dos materiais, mistura e compactação das amostras, cura, avaliação de resistência à compressão e análise mineralógica dos produtos. Os resultados reforçam a importância da análise sobre a composição química natural de cada solo além da composição granulométrica, indicando que o uso combinado dos ativadores representou distinto comportamento entre as amostras avaliadas nos dois países.

Palavras-chave: arquitetura de terra, ligantes alcali-ativados, sustentabilidade, idades iniciais

1 INTRODUÇÃO

A arquitetura de terra pode representar menor impacto ambiental quando comparada com tecnologias convencionais de construção, já que não requer altas temperaturas desde a sua fabricação (Ávila *et al.* 2021). Na técnica da taipa de pilão a estabilização física é garantida pela compactação do material dentro de fôrmas removíveis e a estabilização química é frequentemente obtida com a incorporação de cimento Portland ou cal hidratada junto à terra (Caldas *et al.* 2021). Segundo Kariyawasam e Jayasinghe (2016) mesmo com a inclusão de tais materiais, a técnica indica baixo consumo de energia incorporada e baixo consumo operacional para um ciclo de vida longo.

Em busca de diminuir o consumo de cimento Portland ou estimular o uso de materiais livres de clinquer, os ligantes alcali-ativados baseiam-se na reação química entre um mineral aluminossilicato (como precursor) com uma solução de elevado pH (como ativador) em proporções controladas, gerando um produto de propriedades mecânicas e durabilidade similares ou superiores àqueles produzidos com cimento Portland (Provis e Bernal 2014). Em geral, os precursores geopoliméricos identificados na literatura são calcinados diretamente, como o metacaulin, ou indiretamente, como a escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa. Com semelhante lógica, mas utilizando somente argilas naturais não calcinadas como precursoras para assim diminuir o carbono incorporado, Marsh *et al*. (2018) empregaram hidróxido de sódio para confirmar que a ativação alcalina da argila montmorilonita não calcinada forma o gel NASH como principal fase do produto, aumentando com o aumento da razão molar Na:Al do sistema. Os mesmos autores indicam que ainda não são totalmente compreendidos os mecanismos de ação dos minerais de argila nesse caso, sendo complexo quantificar a transformação das fases nesses sistemas, embora a montmotilonita, a ilita e a caulinita sejam minerais comumente encontrados nos solos de diversas regiões.

Dependendo principalmente da fase do precursor, da concentração alcalina utilizada e da condição de cura, a reação química entre precursor e ativador pode acontecer de modo muito rápido e, por isso, as idades iniciais são decisivas para compreender o desempenho obtido pelo material. Diferentes estudos sobre geopolímeros demonstram essas questões, apontando frequentemente que altas temperaturas de cura nos primeiros dias favorecem o ganho de rápido de resistência mecânica (Cristelo *et al.* 2012; Bilondi *et al*. 2018; Costa, 2020) e que as concentrações entre 8 e 12 M de ativadores - principalmente o hidróxido de sódio - combinadas ao solo e outros precursores minerais tendem aos maiores valores de resistência à compressão (Toufigh *et al.* 2022, Meek *et al.* 2020, Cristelo *et al.* 2012).

Desse modo, por causa da grande quantidade de questões que influenciam a elaboração desses ligantes alternativos, os produtos de reação precisam ser monitorados e, quando necessário, ajustadas as condições de ativação. Ainda, fenômenos físicos tal como a formação de eflorescências podem ser percebidos nas amostras desses produtos, dependendo sobretudo da estrutura porosa do geopolímero e da estabilidade dos álcalis dessa reação que pode afetar o desempenho mecânico pela formação excessiva de cristais, conforme Longhi (2019).

No caso dos solos, há grande variação na composição química das argilas em função dos minerais primários que as originaram e isso influencia as propriedades mecânicas das amostras elaboradas por ativação alcalina, segundo Toufigh et al. (2022). Logo, o estudo objetiva comparar os efeitos do uso de ativadores alcalinos em dois solos (do Brasil e de Portugal) quanto aos produtos formados e o desempenho à compressão das amostras nas primeiras idades. Com isso, busca-se identificar relações replicáveis ao uso de ativação alcalina para edificações em taipa de pilão e considerações sobre os variados tipos de solos e seus componentes.

2 ESTRATÉGIA METODOLÓGICA

O desenvolvimento do estudo foi realizado em duas etapas gerais: fase experimental (materiais e métodos) e análise (correlação e discussão dos dados), conforme o fluxo indicado na Figura 1. Durante todo o processo, a literatura científica foi utilizada como ferramenta.

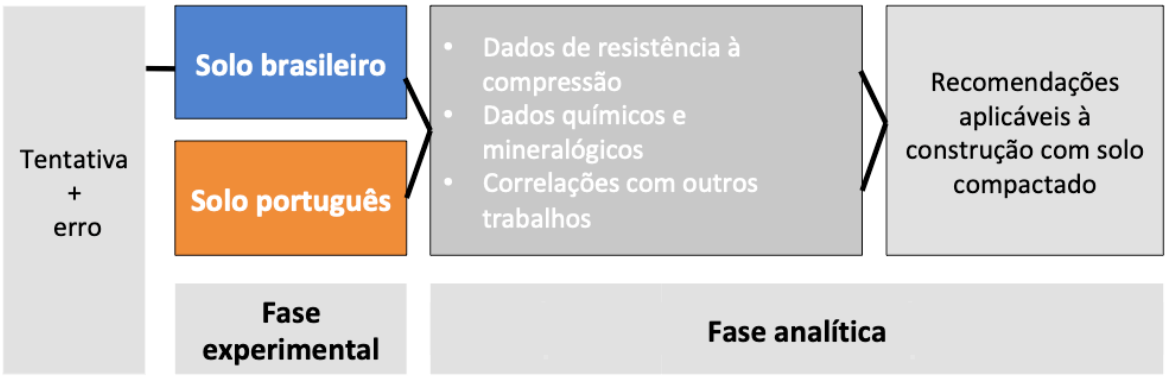


Figura 1 – Etapas de elaboração da pesquisa

Parte dessa pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, em Campo Grande/BR e parte foi realizada na Universidade do Minho, em Guimarães/PT. Considerando materiais localmente disponíveis, o solo no Brasil foi coletado em jazida comercial do município de Campo Grande, sendo classificado como Latossolo, já em Portugal o solo foi obtido em aterro de obra existente no Concelho de Barcelos, enquadrado como Cambissolo. Assim, foi adotada a nomenclatura empregada PT e BR identificando os precursores de cada amostra.

Para ajustar a plasticidade e a granulometria dos dois solos, também apoiando-se nas avaliações realizadas no trabalho de Nina (2022), ao solo de Portugal foi adicionado 8% de caulim como correção do material. Desse modo, todas as análises da referência (REF_PT) empregadas nesse estudo correspondem ao material já corrigido. O caulim foi extraído da Região do Minho, Esposende.

Também foi uma premissa inicial manter como variável fixa a proporção em massa das misturas, idênticas para cada um dos solos, facilitando assim o critério de comparação apesar da variação do tipo e marcas comerciais dos componentes das misturas. Justifica-se essa escolha pela tentativa de viabilizar uma solução replicável e facilmente disponível. As misturas foram identificadas pelo principal componente incorporado ao solo seguido do número correspondente ao seu percentual em relação a massa de solo, por exemplo: N3C10, tem 3% de NaOH e 10% de $Ca(OH)_2$.

2.1 PLANO EXPERIMENTAL

2.1.1 Materiais

Os dois solos foram previamente passados na peneira com abertura de 2mm para remoção dos pedriscos e torrões, posteriormente analisados quanto a distribuição granulométrica utilizável nas misturas, conforme os procedimentos descritos na NBR 6502:1995, para o solo brasileiro e LNEC E - 196:1966, para o solo de Portugal - Figura 2.

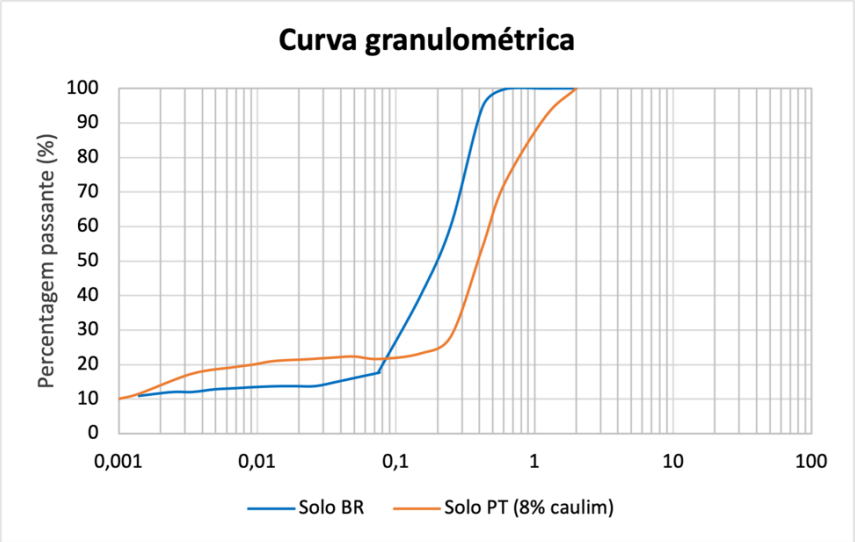


Figura 2 – Distribuição granulométrica dos dois precursores

Amostras dos dois solos foram analisadas por Espectrometria de fluorescência de Raios X, com o equipamento Hitachi, EA 1000 para identificação da composição química. Também foram realizadas análises de adsorção por azul de metileno nas duas amostras depois de passadas na peneira 10 ASTM, de acordo com a EN P 933-9 (2002). O quadro 1 sintetiza as informações sobre os dois precursores.

Quadro 1 – Caracterização geral dos solos

SOLO BR				**SOLO PT**			
Óxidos		Elementos		Óxidos		Elementos	
Tipo	Percentual	Tipo	mg/Kg	Tipo	Percentual	Tipo	mg/Kg
SiO_2	56,68	Ba	130	SiO_2	62,38	Ba	270
Al_2O_3	27,24	Zr	1200	Al_2O_3	26,56	Zr	270
Fe_2O_3	9,92	Sr	25	Fe_2O_3	3,98	Sr	60
K_2O	0,09	Rb	9	K_2O	1,97	Rb	140
Na_2O	0	Mn	520	Na_2O	0,08	Mn	190
TiO_2	2,9	Zn	35	TiO_2	0,66	Zn	60
CaO	2,67	Cu	50	CaO	3,82	Cu	25
MgO	0,29	Ni	50	MgO	0,45	Ni	25
Relação SiO_2/ AlO_3			3,5	Relação SiO_2/ AlO_3			4,0
Valor de azul de metileno/ fração granul. (g/kg) – valor médio (Mb)			3,67	Valor de azul de metileno/ fração granul. (g/kg) – valor médio (Mb)			4,0
Limite de liquidez			18%	Limite de liquidez			16%
Massa específica aparente seca (g/cm^3)			2,74	Massa específica aparente seca (g/cm^3)			2,75
Argila 12%	Silte 4,6%	Areia 83,4%		Argila 10,4%	Silte 15,3%	Areia 74,3%	

Quanto à superfície específica identificada pelo valor de azul de metileno, os solos são semelhantes, sendo a fração argilosa da amostra PT levemente mais ativa, já que possui maior valor. Contudo, além da coloração, os dois materiais diferem pela textura e composição: o solo do Brasil possui expressiva presença de ferro, manganês e zircônio, o que não é visto no outro material.

No Brasil, o hidróxido de sódio utilizado foi um produto comercial com pureza de 96-99%, formato em lascas. Já em Portugal o mesmo material foi empregado no formato pérolas, produto comercial com 99-100% de pureza. Ambos os ativadores foram diluídos em água potável disponibilizada pelas concessionárias de abastecimento locais. A cal hidratada utilizada no Brasil foi do tipo CH-III, já em Portugal, utilizou-se a cal tipo CL 90. Os dois materiais são calcíticos e, com relação às normativas a CH-III possui um limite de CaO + Mg maior ou igual à 88% (NBR 7175:2003), já a CL 90 possui percentual maior ou igual a 90% (EM 459-1). A especificação de óxido de magnésio contido na cal de Portugal é menor que 5% e na cal do Brasil é de 24%.

2.1.2 Métodos

As misturas foram elaboradas considerando resultados preliminares realizados no Brasil (*in print*), sendo estabelecidas para cada solo as composições destacadas no Quadro 2. Antes da mistura, os dois solos foram secos em estufa por 24h e o percentual de água em cada traço foi ajustado considerando o teste de bola recomendado por Neves et. al (2010) para técnicas de terra compactada – que consiste em formar uma bola da mistura úmida identificando visualmente a sua capacidade aglutinante. O procedimento de mistura foi realizado manualmente, incorporando os itens secos após a pesagem e posteriormente a adição da solução de água e hidróxido de sódio que foi previamente elaborada para atingir a temperatura ambiente.

Quadro 2 – Composição das amostras

Amostra	NaOH		% $Ca(OH)_2$		% Água	Relação Na_2O/SiO_2	Relação Na_2O/Al_2O_3	Relação CaO/SiO_2
	%	M	%	M				
REFBR	0	0	0	0	6	0	0	0,05
N5C7BR	5	2,6	7	2	7	0,13	0,5	0,09
N3C10BR	3	1,6	10	2,8	9,5	0,1	0,3	0,10
N10BR	10	5,2	0	0	7	0,3	0,9	0,05
C10BR	0	0	10	2,8	8	0	0	0,10
REFPT	0	0	0	0	6	0	0	0,07
N5C7PT	5	2,6	7	2	7	0,13	0,5	0,13
N3C10PT	3	1,6	10	2,8	9,5	0,1	0,3	0,26
N10PT	10	5,2	0	0	8	0,3	0,9	0,05
C10PT	0	0	10	2,8	8	0	0,01	0,26

Os valores percentuais (%) são relacionados à massa total de solo. (M) representa o valor molar calculado conforme composição química e as relações Na/Si, Na/Al e Ca/Si são apresentadas considerando a concentração molar de cada componente na reação e mistura

Para cada traço foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de tamanho 5x10cm. Utilizou-se moldes metálicos preenchidos em 3 camadas igualmente compactadas e tal compactação foi executada com compactador metálico manual, garantindo o mesmo número de golpes para todas as amostras do estudo. Empregou-se 26 golpes, semelhante ao ensaio normal de Proctor, conforme NBR 7182:2016.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados para a cura em ambiente fechado, sem aberturas exteriores e temperatura controlada entre 25 e 30 ºC. Nos dois países, iguais condições foram mantidas. Após 7 dias, as amostras foram rompidas em prensa normalizada com velocidade de 0,05 KN/s. Os fragmentos de todas essas amostras foram analisados por difração de Raios-X no equipamento Bruker D8 Discover no SEMAT/UMINHO.

Em sequência, as avaliações foram feitas considerando os resultados de resistência à compressão das amostras e os difratogramas correlacionando-os às relações químicas identificadas entre os materiais do estudo e aquelas disponíveis na literatura científica. Os difratogramas foram processados com auxílio do *software Xpert-Highscore* e enquadrados em fichas catalográficas da *American Mineralogistic Crystal Structure Databasic* e a análise estatística dos resultados foi realizada com auxílio do *software Jamovi*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 7 dias, nos resultados de resistência à compressão houve uma diferença estatisticamente significativa entre as amostras brasileiras e das amostras portuguesas (teste T *student*). Em comparação com as amostras brasileiras correlatas, a REFPT variou 20%, a N5C7 em 3413,3%, a N3C10 389,8%, a N10 correspondeu a 11% e a C10 em 203,7%. Assim, a análise de variância em comparações *post hoc* por grupo e origem indicou significância nos tipos N3C10BR e N5C7BR com relação a todas as amostras.

Nas idades iniciais também foi significativo o desempenho das amostras com ativadores combinados ($NaOH + Ca(OH)_2$) em relação à ativação simples. Nenhuma das dosagens com solo de Portugal atingiu 1 MPa, entretanto 3 grupos amostrais com solo do Brasil atingiram tal valor médio - N10BR com 1,01 MPa; N3C10BR com 2,40 MPa; e N5C7, com 5,2 MPa - indicando que possivelmente cumpririam a recomendação normativa de 1,3MPa aos 28 dias apresentada pela NBR 17014 (2022). A figura 3 apresenta esses resultados gerais e considerando grupo e origem, o desvio padrão dos valores variou de 0,02 a 0,2.

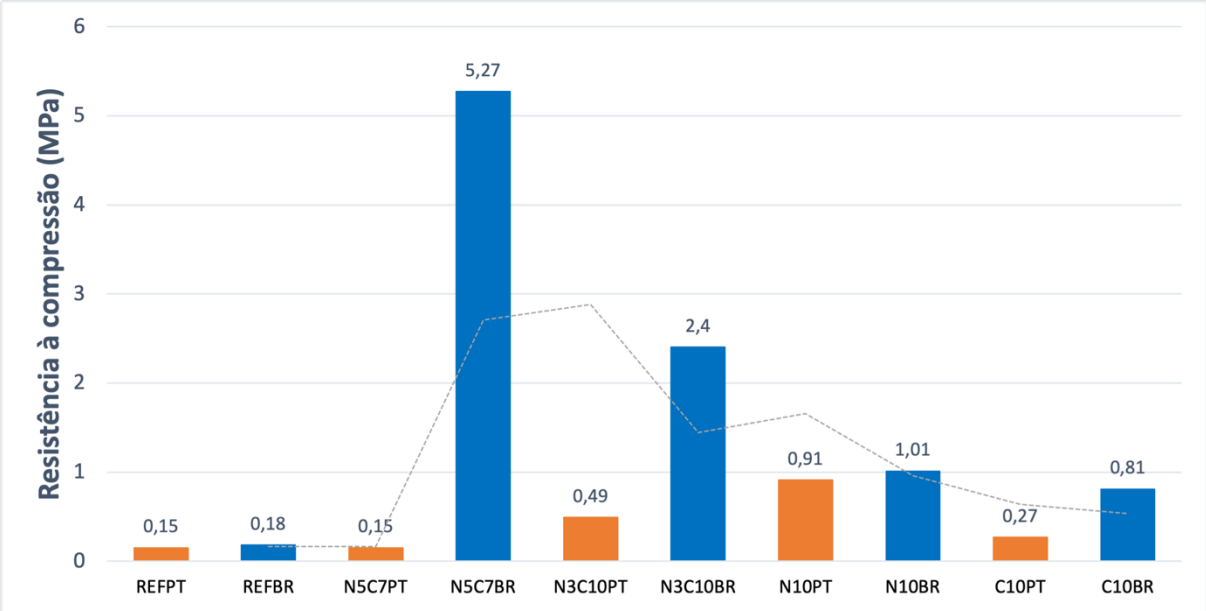


Figura 3 – Gráfico de resistência à compressão média aos 7 dias, PT (laranja) e BR (azul)

Quanto às relações identificadas nas misturas e suas correlações com a resistência mecânica, observou-se entre os melhores desempenhos, somente a amostra N10 está ajustada às recomendações originalmente propostas para ativação alcalina por Davidovits (1982): entre 0,2 e 0,48 para Na_2O/SiO_2 e entre 0,80 e 1,6 para Na_2O/Al_2O_3. Demais relações desse estudo não se enquadram nas recomendações do autor, possivelmente pelas baixas concentrações alcalinas. Para alguns pesquisadores, Zhang et al. (2013) a relação Na_2O/Al_2O_3 é mais influente na sintetização geopolimérica do que a temperatura – que nesse estudo foi constante - ou a relação SiO_2/Al_2O_3 .

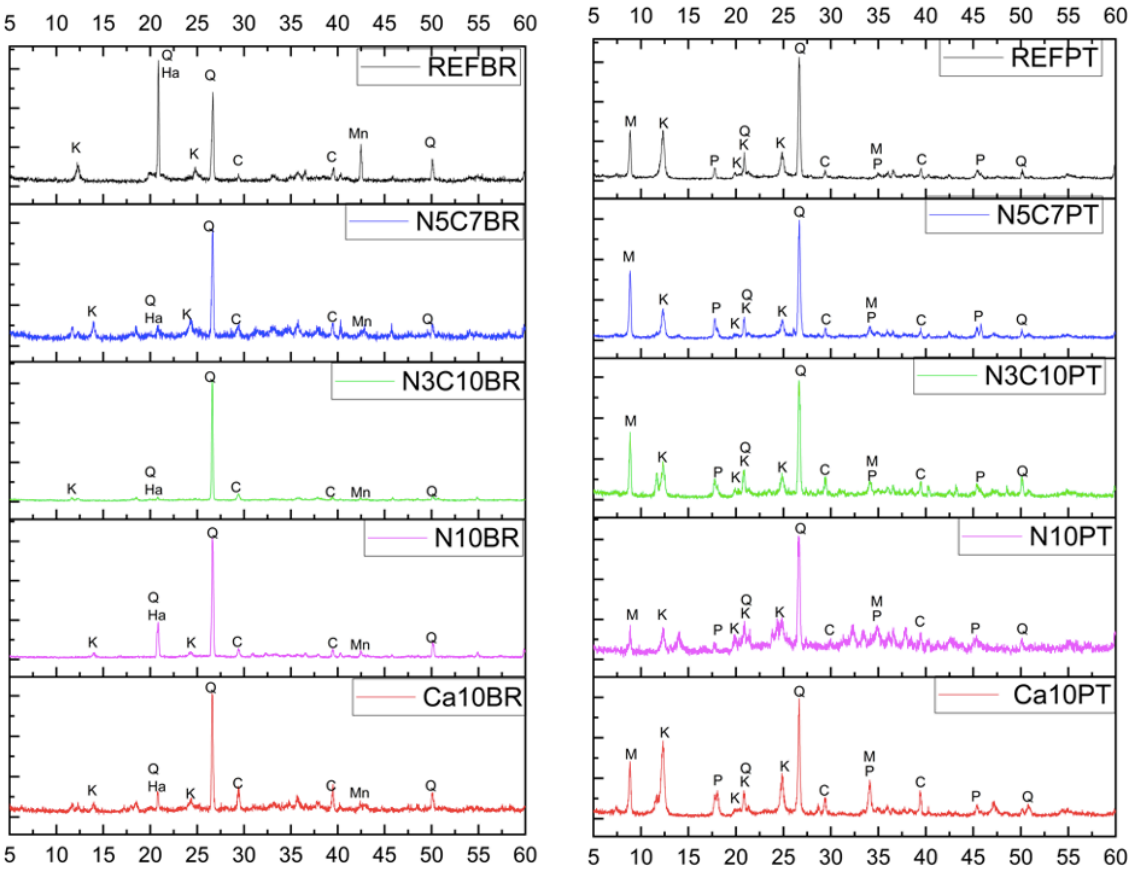
Entretanto, a relação molar global SiO_2/Al_2O_3 obedece parâmetros semelhantes aos encontrados na metodologia de outros autores (Gonçalves et al. 2023). A razão molar Na_2O/Al_2O_3 maior que 1,25 é defendida por Alastair et al. (2018), entretanto esses autores confirmaram a formação de fases geopoliméricas da illita não calcinada a partir de relações Na/Al levemente maiores que 0,5 e outras argilas na relação 1,25. Apesar de não ter sido identificada a illita na análise por DRX, o fato pode ser correlacionado ao bom comportamento da amostra N10PT, quando comparados às outras amostras portuguesas que obtiveram baixos valores de tensão, uma vez que nos Cambissolos é comum a presença de illita.

No estudo de Cristelo *et al.* (2012) que também avaliaram misturas em idades iniciais, o uso combinado de NaOH e Ca(OH)2 ativando solo de Portugal e cinzas volantes representou aumento dos níveis de resistência inicial, embora não seja confirmado o incremento significativo após o primeiro dia. Esses autores estudaram relações líquido/sólido entre 0,350 e 0,425 e ratificaram a forte dependência entre as relações Si/Al e Na/Si com o desempenho mecânico, porém para misturas auto adensáveis. Como o presente estudo utiliza a técnica da compactação e necessita de misturas mais secas, a relação líquido/sólido variou entre 0,12 e 0,18 – considerando que o ativador NaOH e água compõem a fase líquida.

O padrão de DRX do precursor brasileiro demonstrou na amostra controle picos intensos de quartzo, teor de 50%, e haloisita, além de outros menores de manganês e caulinita. Já na referência portuguesa, as fases cristalinas de maiores intensidades são de quartzo, com teor de 60%, e caulinita. Em comparação com a amostra de maior resistência, N5C7BR, identifica-se o consumo quase total do quartzo e haloisita e alargamento do pico de caulinita em 23° (2θ), como observa-se nos difratogramas da Figura 4.

As principais fases minerais da caulinita são o caulim, $Al_2(OH)_4Si_2O_5$, e o quartzo, SiO_2. Em todas as amostras, caulinita, quartzo e calcita foram identificados, sendo principal o pico de quartzo à 26,6° (2θ) mantido em semelhante intensidade e, conforme Lee et al. (2014), esses picos se assemelham às estruturas cristalinas pobres de C-S-H. Contudo nos melhores desempenhos N5C7BR e N3C10BR, o pico de haloisita inicialmente identificado em 21,6° (2θ) foi praticamente todo consumido.

A presença de caulinita e haloisita – que também faz parte do mesmo grupo de argilas – tradicionalmente é associada ao incremento de resistência mecânica à matriz, no caso desse estudo foi proveniente naturalmente ou por adição. Desse modo, os difratogramas relacionados às mais baixas resistências também identificam picos dessas agilas, porém em pequena intensidade como N5C7PT ou N10BR.



Legenda: K – Caulinita; C – Calcita; Ha – Haloisita; Q – Quartzo; Mn – Manganês (beta); P – Portlandita

Figura 4 – DRX das amostras BR e PT aos 7 dias.

Nas amostras com solo de Portugal, não há um comportamento claro do pico de caulinita em 25° (2θ): na amostra de maior resistência, N10, há um alargamento desse pico, entretanto na amostra C10 que possui baixo desempenho o pico se apresenta com maior intensidade e largura que a referência. Como não houve monitoramento dos picos em idades mais avançadas, não foi possível identificar nem relacionar na literatura o tipo de comportamento.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizado possui aplicação prática, porém difere da frequente execução tradicional e intuitiva da arquitetura de terra. Há necessidade de um estudo a nível químico para otimizar as dosagens e adequar os resultados. Uma boa parte das amostras se mostrou adequada para aplicação em taipa de pilão, validando o uso da ativação alcalina para esses casos, embora faltem avaliações sobre durabilidade do material. Logo, por meio dos resultados obtidos nessa pesquisa, foram identificadas algumas premissas:

- Influência da granulometria dos materiais: o solo com textura mais macia não necessariamente possui a maior quantidade de finos, tal como visto nessa pesquisa e tampouco somente a quantidade de finos interferiu na resistência mecânica. Dada a variedade de percentuais utilizados nas amostras, a influencia do ativador sobre a composição do solo é mais expressiva que a granulometria, observado nas amostras N5C7 e N3C10.

- A composição química dos precursores é essencialmente importante, tendo em vista as semelhantes condições de dosagem e preparo entre os corpos de prova avaliados nesse estudo e desempenhos completamente distintos. Desse modo, o comportamento dos argilominerais dos dois solos necessitam de maior avaliação, mesmo já sendo identificado que há diferente composição principalmente em relação ao óxido de ferro, Mn e Zr.
- Apesar da literatura identificar relações molares, líquido/sólido, Na/Si, Na/Al maiores que as aplicadas nesse experimento que utilizou baixas concentrações de ativadores, foi identificada a viabilidade de aplicação das misturas quanto o ganho de resistência à compressão. Assim, baixas concentrações de ativadores – nesse estudo nenhuma acima de 5,2M – podem gerar resultados adequados para a prática construtiva. Na amostra avaliada, o melhor desempenho mecânico validado para a terra compactada atingiu 5,3MPa com 7 dias, o que para a técnica normalmente é observado somente aos 28 dias.
- Considerando o desempenho da amostra N5C7BR em relação ao conjunto, evidencia-se que é complexa a inter-relação entre a mineralogia das matérias-primas e os efeitos dos ativadores em avaliações de idades iniciais.

Para futuros trabalhos, indica-se a análise da porosidade das amostras para compreender a uniformidade do preenchimento/endurecimento e possível presença do gel polimérico em conjunto com análises morfológicas de cada uma das amostras para melhor acompanhamento dos produtos formados. Também é indicada a necessidade de maiores acompanhamentos quanto a formação de eflorescências desde as idades iniciais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Alastair, M., Andrew, H., Pascaline, P., Mark, E., Pete, W. (2018). Alkali activation behaviour of un-calcined montmorillonite and illite clay minerals. Applied clay science, n. 166. http://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.011

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro.

Ávila, F., Puertas, E., Gallego, R. (2021) Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. Construction and Building Materials, v. 270. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435.

Bilondi, M., Toufigh, M., Toufigh, V. (2018). Experimental investigation of using a recycled glass powde-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. Construction and Building Materials, v.170. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049.

Caldas, L., Martins, A., Toledo Filho, L. (2021). Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. Parc: Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas/SP, V.12, n 00, 2021. http://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8656279.

Cristelo, N. et al. (2012). Soil stabilization using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. Construction and Building Materials, v.36, 727-735. http://doi.org/10.1016/j.conbuidmat.2012.06.037

Costa, L. (2020).Influencia da pozolanicidade na ativação alcalina. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Davidovits, J. (1982). Mineral polymers and methods of making then. United States Patent, 10p.

Gonçalves, L., Balestra, C., Gil, M. (2023). Evaluation of mechanical, physical, and chemical properties of ecological modular soil-alkali activated bricks without Portland cement. Environmental Development, v .48. http://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100932.

Kariyawasam, K., Jayasinghe, C. (2016). Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. Construction and Building Materials, v.105, 519-527. http://doi.org/10.1016/j.conbuidmat.2015.12.189.

Lee, N., Jang, J., Lee, K. (2014). Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash slag paste and mortar at early ages. Cement and concrete composites. V.53. http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.007.

Longhi, M. (2019). Eflorescencia em geopolimeros à base de mataculim: formação, efeito e mitigação. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: construção e estrutura (PPGCI), UFRGS, Porto.

Marsh, A., Heath, A., Patureal, P.,Evernden, M., Walk, P. (2018). Alkali activation behaviour of un-calcined montmorillonite and illite clay minerals. Applied Clay Science, v.166, n. October, 250-261.

Meek, A., Elchalakani, M. (2020). Alternative stabilized rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent. Constructions and Building Materials. v.265. http://doi.org/10.1016/j.conbuidmat.2020.122045

Neves, C., Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos, P., Hoffmann, M. (2010). Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo, PROTERRA. Disponível em: http://www.redeproterra.org

Nina, J. (2022). Durabilidade da Construção em Terra: Contributo para uma melhor aceitação deste material sustentável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Provis, J., Bernal, S. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. Annual Review of Materials Research, v. 44, n.1.

Toufigh, V., Karamian, M. (2021). Study of stress-strain andvolume change behavior of fly ash-GBFS based geopolymer rammed earth. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v.80, n.9. http://doi.org/10.1007/s10064-021-02292-5

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O PAPEL DOS FINOS RECICLADOS CARBONATADOS DO BETÃO COMO ADIÇÃO FÍLER

André Silva[1]; Rita Nogueira[2]; José Alexandre Bogas[2]

[1]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal
andre.f.rosario.marcelino.silva@tecnico.ulisboa.pt

[2]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal
rita.nogueira@tecnico.ulisboa.pt

[3]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal
abogas@civil.ist.utl.pt

RESUMO

A carbonatação dos finos de betão reciclado (FR) para serem utilizados como adição em novas misturas cimentícias é uma estratégia recente que promove a captura e armazenamento de CO2. Além disso, a utilização deste subproduto da reciclagem do betão tem também o potencial de reduzir as emissões de CO2, ao atuar como substituto parcial do cimento. Diferentes estudos têm demonstrado a contribuição positiva da carbonatação para o desempenho mecânico de novos materiais cimentícios produzidos com FR carbonatado. No entanto, estes resultados foram obtidos a partir de amostras de adição produzidas em ambiente laboratorial controlado e sem as impurezas associadas aos agregados, o que compromete uma generalização das conclusões obtidas. Assim, este estudo avalia o efeito da presença de impurezas de agregados no FR nas propriedades mecânicas e microestruturais de novos materiais cimentícios. Os resultados mostram que uma adição com origem em betão possui cerca de 19% da capacidade de armazenamento de carbono de uma adição com origem em pasta de cimento. Para uma percentagem de substituição do cimento de 15%, a presença de impurezas do agregado na adição prejudicou a evolução da resistência à compressão em média 6%. Para uma substituição de 25%, a distribuição granulométrica demonstrou causar um maior impacto na resistência à compressão do que a presença de impurezas.

Palavras-chave: Finos de betão reciclado; Utilização, armazenamento e captura de carbono; Processo de carbonatação eficiente; Emissões de dióxido de carbono

1 INTRODUÇÃO

O betão é o segundo material mais consumido no mundo, em volume, apenas ultrapassado pela água (Filippo, et al., 2019). Este elevado consumo origina uma emissão igualmente extensa de CO2 para a atmosfera, uma vez que o processo de fabrico dos seus componentes apresenta uma elevada pegada de carbono, nomeadamente a componente cimento (Lippiatt, et al., 2020; He, et al., 2019). Esta componente é responsável por cerca de 8% do total de CO2 emitido a nível mundial, resultado que deverá aumentar, tendo em conta a perspetiva da evolução do consumo de cimento até 2050 (Wu, et al., 2022). Além disso, 80-95% do CO2 total emitido pela indústria do betão é originado na fase de produção de cimento, o que realça a importância de investigar materiais com capacidade de substituir parcialmente o cimento, além da implementação de estratégias comuns de mitigação, como por exemplo, eficiência energética ou fontes de energia alternativas (Lippiatt, et al., 2020; He, et al., 2019).

Recentemente, a diminuição da disponibilidade de adições tradicionais para substituição parcial do cimento, consequência do declínio das indústrias associadas a elevadas emissões de carbono, e da ausência de outras opções semelhantes disponíveis, reacendeu a preocupação relativamente à transformação de resíduos de betão numa matéria-prima (Poon, et al., 2023). Os resíduos de betão reciclado são geralmente divididos em duas frações: a fração mais grossa, que dá origem ao agregado reciclado de betão (AR) destinado a substituir parcial ou totalmente o agregado; e uma fração fina, que é obtida como subproduto da produção de AR, designada por finos reciclados de betão (FR), com potencial para funcionar como adição (Poon, et al., 2023; Fang, et al., 2021). Embora o AR e o FR tenham sido amplamente investigados, as suas qualidades inferiores e as suas características intrínsecas específicas, nomeadamente a maior porosidade e o maior consumo de água de amassadura, dificultaram a difusão de ambas as soluções na indústria do betão (Bouarroudj, et al., 2021; Cong, et al., 2019).

A utilização do FR como adição tem potencial de promover a redução das emissões de CO2 por volume de betão pela substituição parcial do cimento (Poon, et al., 2023). Diferentes estratégias têm sido estudadas para melhorar as características do FR como adição. Uma estratégia que demonstrou resultados positivos foi a carbonatação prévia do FR (Mehdizadeh, et al., 2020; Mehdizadeh, et al., 2021; Zhang, et al., 2022). O processo de carbonatação do FR foi capaz de absorver cerca de 0,2 g de CO2 por g de FR e melhorar, simultaneamente, as características do FR como adição (Silva A. , et al., 2022; Silva A. , et al., 2022; Ouyang, et al., 2020). Os diferentes estudos realizados compararam materiais cimentícios com FR, como adição, antes e depois da carbonatação, sendo que o FR carbonatado apresentou consistentemente melhores resultados de resistência à compressão e porosidade do que o FR não carbonatado (Zajac, et al., 2022). Assim, esta estratégia não só promove a redução das emissões de CO2 através da substituição parcial do cimento no betão, como também captura CO2, armazenando-o.

Estudos anteriores focaram-se no efeito que o processo de carbonatação tem nas propriedades químicas e físicas do FR, mostrando diferentes impactos na evolução da hidratação dos materiais cimentícios com FR, como adição, carbonatado e não carbonatado (Mehdizadeh, et al., 2021; Zhang, et al., 2022). No entanto, os mesmos estudos, visando definir uma base de referência, utilizaram FR com origem numa pasta de cimento totalmente hidratada, sem impurezas de agregados, muito diferente do FR real. De notar que FR com origem em betão tem partículas compostas por agregados cobertos, parcial ou totalmente, por pasta de cimento (denominados neste artigo por impurezas) que tornam o FR num material mais heterogéneo. Com vista a colmatar esta lacuna, o presente trabalho recorreu a FR proveniente de pasta de cimento sem impurezas de agregado e a betão britado e moído. Os dois tipos de FR assim obtidos foram carbonatados e utilizados como adições em novos materiais à

base de cimento. Esta abordagem permitiu avaliar o impacto das impurezas dos agregados nas características das adições carbonatadas e, consequentemente, no processo de endurecimento de novos materiais cimentícios. Assim, o objetivo deste estudo é compreender a influência das impurezas dos agregados nas propriedades mecânicas de argamassas compostas por adições cimentícias carbonatadas recicladas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Neste estudo foi utilizado cimento Portland (PC) CEM I 42.5R com uma composição mineralógica de C3S=56,7%, C2S=16,6%, C3A=10,0%, C4AF=9,2%, superfície específica de 452 m2/kg e densidade de 3.070 kg/m3. A composição química do PC é CaO=62,76%, SiO2=19,42%, Al2O3=5,39%, Fe2O3=3,00%, Mg0=1,74%, K20=0,53%, Na2O= 0,12%. A água de mistura foi fornecida pela rede de abastecimento. O CO2 foi fornecido pela AirLiquide, com uma pureza de 99,995%. Foi utilizado fíler calcário comercial com um teor de CaO acima dos 70%. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica do PC e do fíler calcário

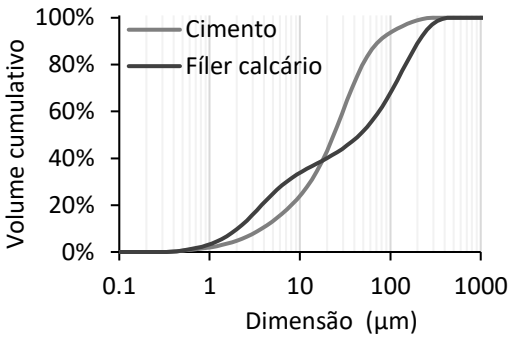


Figura 1 – Granulometria do cimento e fíler calcário

O plastificante utilizado neste estudo foi o Master Ease 5025, com uma densidade de 1,1 g/cm3. As características dos agregados finos e grossos utilizados na produção do betão usado no FR são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características dos agregados usados no betão destinado ao FR

Parâmetro	Norma	Areia		Brita de calcário		
		Areia fina	Areia grossa	Brita fina	Brita grossa 1	Brita grossa 2
Massa volúmica seca (kg/m^3)	EN 1097-6	2598	2599	2669	2683	2650
Absorção de água 24h (%)	EN 1097-6	0.15	0.26	0.39	0.31	0.46
Massa volúmica aparente (kg/m^3)	EN 1097-6	1588	1606	1424	1420	1462
Dimensão (d_i/D_i)	EN 12620	0/1	0/2	2/8	4/11.2	11.2/20

2.2 MÉTODOS

Foram produzidos dois tipos de adições recicladas neste estudo, que utilizaram como materiais precursores espécimes de betão (B) e de pasta de cimento (P). Os espécimes foram produzidos, moldados em moldes cúbicos e curados em câmara húmida durante mais de 90 dias. A pasta de cimento utilizada na produção da adição P foi produzido com uma razão água/cimento de 0.45. O

betão utilizado na produção da adição de B foi produzido utilizando uma composição de betão padrão descrita no Quadro 2.

Quadro 2 – Composição do betão precursor da adição B

Água/cimento	Cimento	Agregado grosso	Agregado fino	Água
0.55	360 kg/m^3	400 L/m^3	266 L/m^3	198 L/m^3

O método de produção, utilizado para a obtenção das adições recicladas, foi delineado de forma a reduzir o tamanho do espécime cúbico inicial a um pó com D_{90}<250 µm. O método de produção utilizado na transformação dos espécimes precursores em adição começou pela secagem em estufa 100ºC durante 2 dias. Após o período de secagem, foram utilizados britadores de diferentes tamanhos para reduzir o tamanho dos fragmentos obtidos. De seguida, um moinho de rolos foi utilizado para moer o material proveniente dos britadores. Após um período de secagem adicional de 2 dias, para minimizar a adesão do material às paredes, um moinho de bolas foi utilizado para obter a adição com partículas com a dimensão desejada. A adição em pó resultante foi peneirada através de uma malha de 250 µm, revelando que menos de 2% do conteúdo ficou retido.

O processo de carbonatação foi realizado numa câmara com um volume interno de ≈83 litros, descontado o volume de 4 tabuleiros e a estrutura de prateleira utilizada para suporte. Neste processo 1400 g de FR foram divididos em 4 tabuleiros, garantindo uma espessura de FR de 5 mm em cada tabuleiro. Além disso, o teor inicial de água do FR foi aumentado para o intervalo de 15-20% (Silva A. , et al., 2022). Relativamente ao procedimento do processo de carbonatação, foi aplicado um número específico de ciclos de carbonatação dependente do teor de pasta de cimento hidratada na amostra de FR. Assim, o processo de carbonatação consistiu no seguinte procedimento para cada ciclo, independentemente do número de ciclos aplicados: a câmara de carbonatação foi selada; foi fornecida uma concentração de CO2 (volumétrica) de cerca de 43%±2% (equivalente 66.7 g de CO2) nos primeiros 2 minutos do ciclo, à humidade relativa e à temperatura ambiente; após a concentração desejada ter sido atingida, o fornecimento de CO2 foi interrompido; o ciclo do processo de carbonatação foi monitorizado durante 2 horas; após o término do último ciclo do processo a porta foi aberta, repondo a concentração de CO2 atmosférica. Para determinar o número de ciclos de carbonatação necessários para a carbonatação do FR, deve ser estimado o teor de pasta de cimento hidratado. Considerando a composição de cada espécime acima descrita, a adição P é composta por pasta de cimento 100% hidratada e a adição B é composta por cerca de 20% de pasta de cimento hidratada. Considerando o objetivo de absorção de CO2 de 20% em termos de pasta de cimento hidratada e o teor de CO2 em cada ciclo, o número necessário de ciclos é de 5 para a adição P e de 1 ciclo para a adição B, como resumido no Quadro 3.

Quadro 3 – Dados alvo para a carbonatação de cada adição

	P	B
Absorção alvo de CO_2 (% massa)	20%	4%
Quantidade de CO_2 necessário (g)	280	56
Número de ciclos necessários	5	1
CO_2 total fornecido (g)	333.7	66.7
Eficiência alvo da carbonatação	84%	84%

Para a análise da influência das adições recicladas em materiais cimentícios, foram concebidas quatro argamassas à base de cimento: uma sem qualquer adição, uma com fíler calcário comercial e duas com diferentes tipos de FR carbonatado, nomeadamente cP e cB. As argamassas foram produzidas com a mesma relação água/ligante e fluidez. Para tal, utilizou-se uma percentagem diferente de plastificante para gerir a fluidez das argamassas, afetadas pelas adições de FR. As composições da argamassa estão resumidas na Quadro 4.

Quadro 4 – Composição dos espécimes analisados

Espécime	Tipo de adição	Água/ ligante	Percentagem de substituição	Plastificante (% ligante)	Traço	Agregado fino e grosso
CEM	Sem adição	0.5	0%	0.3%	3	70%/30%
FILE 15%	Fíler calcário (FIL)	0.5	15%	0.3%	3	70%/30%
FILE 25%	Fíler calcário (FIL)	0.5	25%	0.3%	3	70%/30%
cBE 15%	Betão carbonatado (cB)	0.5	15%	0.6%	3	70%/30%
cBE 25%	Betão carbonatado (cB)	0.5	25%	0.6%	3	70%/30%
cPE 15%	Pasta cimentícia carbonatada (cP)	0.5	15%	0.9%	3	70%/30%
cPE 25%	Pasta cimentícia carbonatada (cP)	0.5	25%	0.9%	3	70%/30%

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada numa balança NETZSCH STA 449F3. Cada amostra, com cerca de 60 mg, foi aquecida a uma taxa de 10ºC/min em atmosfera fluindo com gás He, até uma temperatura máxima de 1000°C. As gamas de temperatura de cada perda de massa foram determinadas pelo método stepwise. Para uma comparação correta entre os resultados, cada amostra foi normalizada usando a perda por ignição (LOI). A estimativa do CO_2 ligado devido à carbonatação foi determinada na gama dos 550° e 800°C. A estimativa da água ligada foi calculada como a soma de i) perda de massa na gama de 80°C e 550°C e ii) massa de H_2O consumida durante a reação de carbonatação (CO_2 ligado multiplicado pela razão molar entre H_2O e CO_2) (Wang, et al., 2019; Ashraf & Olek, 2018). A técnica de difração laser de distribuição de tamanho de partículas foi realizada utilizando o Malvern Mastersizer MS3000 (0,01 µm a 3500 µm), equipado com a unidade de dispersão húmida Hydro LV. Os ensaios de espalhamento e massa volúmica no estado fresco foram realizadas segundo a norma EN 1015-3 e a EN1015-6, respetivamente. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NP EN 196-1, numa máquina universal Formtest-Sneider, modelo D-7940, utilizando uma célula de carga de 200 kN. O ensaio de porosidade foi realizado com base na norma NP EN 1936.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DAS ADIÇÕES

A Figura 1 mostra o conteúdo de CO_2 e H_2O ligados em cada adição, antes (-esq) e depois (-dir) do processo de carbonatação, obtido através da análise TG. Considerando a composição do precursor de B (Quadro 2) e o teor de água ligada de 0.23 g por g de cimento, a composição esperada do B deverá ser de cerca de 20% de pasta de cimento hidratada, 30% de agregado silicioso fino e 50% de agregado calcário grosso antes do processo de carbonatação (Scrivener, et al., 2016)

Assim, considerando que a perda de massa dos agregados siliciosos finos durante a análise de TG é insignificante; que a perda de massa da pasta de cimento hidratada é composta por cerca de 90% de H_2O e 10% de CO_2; e que 44% da perda de massa do agregado grosso de calcário é composta por CO_2, o resultado esperado do TG para o B é de 84% de perda de CO_2 e 16% de perda de H_2O, um resultado

semelhante ao resultado observado na Figura 2-esq. Assim, confirmando a composição química de B antes do processo de carbonatação acima referido.

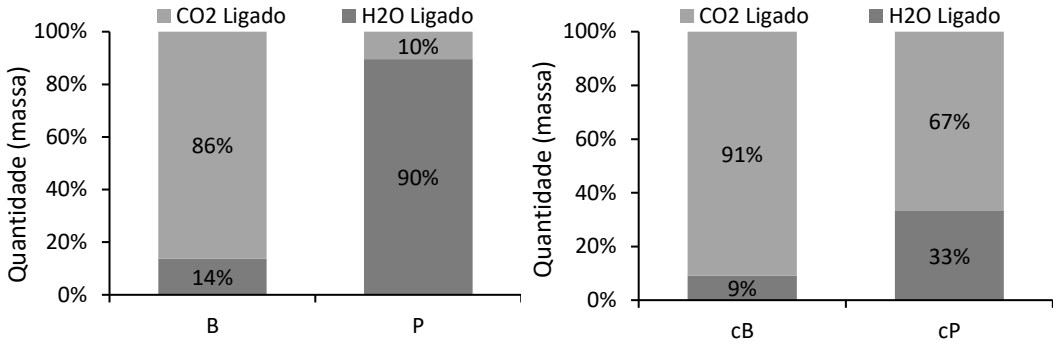


Figura 2 – Quantidade de CO2 e H2O ligados em cada adição, antes (-esq) e depois (-dir) do processo de carbonatação

Após o processo de carbonatação (Figura 2-dir) o cB apresenta uma diminuição da água e um aumento do CO2 ligado, resultado associado à reação de carbonatação dos 20% de pasta de cimento presente no cB. Além disso, é expectável que o grau de carbonatação da pasta de cimento em cB apresente um valor semelhante ao cP, como discutido abaixo (Silva A. , et al., 2022). Estudos prévios assentes na aplicação do mesmo tipo de processo de carbonatação defendem que o cP apresenta uma composição química composta inteiramente por pasta de cimento carbonatado, que se distribui principalmente em carbonato de cálcio (60%) e silicato de cálcio hidratado descalcificado (20%) (Silva A. , et al., 2022).

A Figura 3 mostra a absorção de CO2 de cada adição FR carbonatada, estimada através da análise de TG, e utilizando os valores apresentados na Figura 2. Considerando que apenas 20% do cB foi carbonatado, associado ao teor de pasta de cimento, a absorção normalizada de CO2 (para o teor de pasta de cimento) aumenta de cerca de 4% para 22% para o cB, valor semelhante ao cP, com 23%, confirmando o grau de carbonatação semelhante. No entanto, em termos de massa total, o armazenamento de carbono do cB representa apenas cerca de 19% da capacidade de armazenamento de carbono do cP.

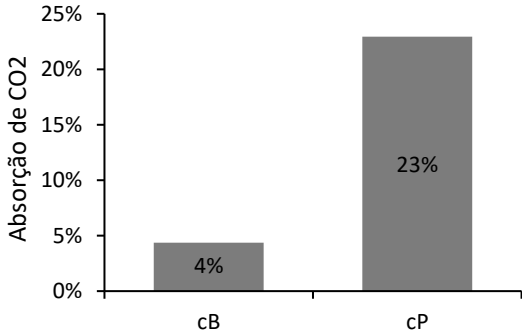


Figura 3 – Absorção de CO2 (massa) em cada adição

Para avaliar as características físicas das adições FR, foi realizada uma análise granulométrica em cada adição reciclada antes e depois do processo de carbonatação, ilustrada na Figura 4. A reação de carbonatação originou uma diminuição da quantidade de partículas abaixo dos 10 μm, independentemente do tipo de adição. De facto, a carbonatação diminuiu esta fração de 17% para 10% em cB e de 34% para 22% em cP. Esta redução de partículas abaixo dos 10 μm é acompanhada por um aumento da quantidade de partículas acima deste valor. Isto é atribuído a uma aglomeração de produtos carbonatados, e consequentemente, a formação de partículas de maior dimensão

(Ouyang, et al., 2020). No entanto, para B, este aumento não se verifica, uma vez que este apresentou um maior teor de partículas na gama 100-250 μm do que o cB. Note-se que a curva cB apresenta um ombro a cerca de 50 μm, o que poderá ajudar a compreender esta diferença, uma vez que o rearranjo das partículas foi focado numa gama específica em vez de na totalidade das partículas acima dos 10 μm, como ocorreu no cP.

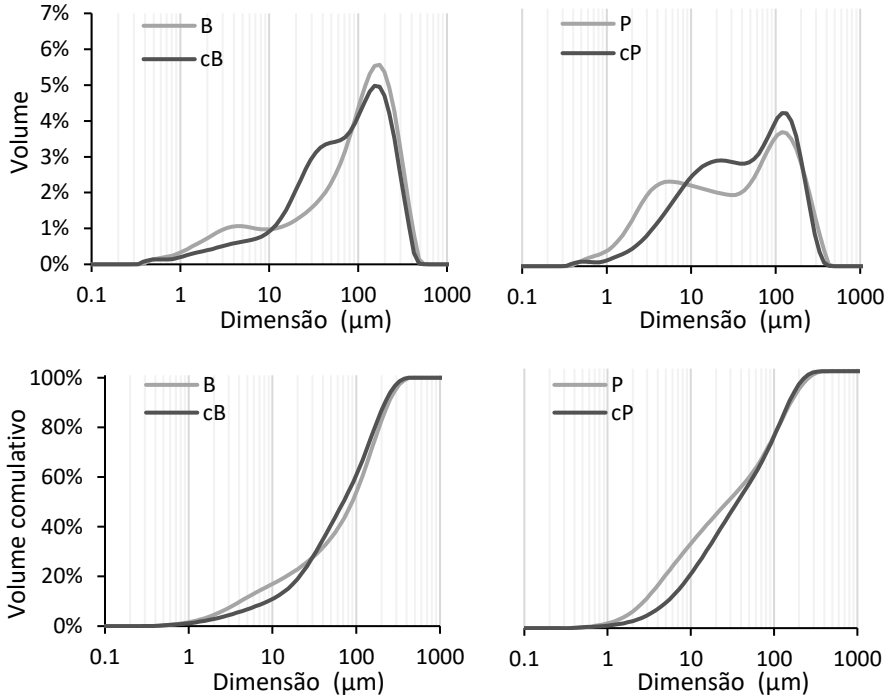


Figura 4 – Granulometria das partículas de cada adição

Adicionalmente, a diminuição da percentagem de partículas abaixo dos 10 μm verificada nas duas adições e o facto de apenas a pasta de cimento ser capaz de carbonatar, sugerem que em cB há uma elevada presença de partículas de pasta de cimento nesta gama de tamanhos de partícula. Enquanto para o cP, a aglomeração de partículas resultante do processo de carbonatação originou um aumento da dimensão média das partículas, de 30 μm para 40 μm, o mesmo resultado não foi obtido para o cB. Em cB ocorreu uma tendência oposta, onde o tamanho médio das partículas diminuiu de 90 μm para 70 μm, o que pode ser atribuído ao aparecimento do ombro de 50 μm e ao aumento desigual de partículas acima do limiar de 10 μm.

A Figura 5 mostra uma comparação da distribuição granulométrica dos materiais utilizados como ligante neste estudo, comparando as adições de FR (linha contínua) com os materiais comerciais (linha tracejada), cimento e fíler calcário. Note-se que o FIL apresenta uma ampla distribuição de tamanhos de partículas, com uma distribuição semelhante ao cB para as partículas de maior tamanho, e com um segundo pico de partículas nos ≈4 μm, abaixo do pico das partículas de cimento. Enquanto o cB apresenta 80% das suas partículas acima do pico das partículas de cimento, o cP apresenta apenas 64%, uma vez que o ombro menor do cP está abaixo do pico do cimento. No geral, as adições utilizadas neste estudo apresentam a seguinte ordem decrescente do tamanho médio de partícula: cB, cP e FIL. Assim, desprezando a composição química e focando apenas a distribuição granulométrica, espera-se um melhor desempenho do FIL, seguido do cP e depois do cB. Esta hipótese será discutida nas secções seguintes.

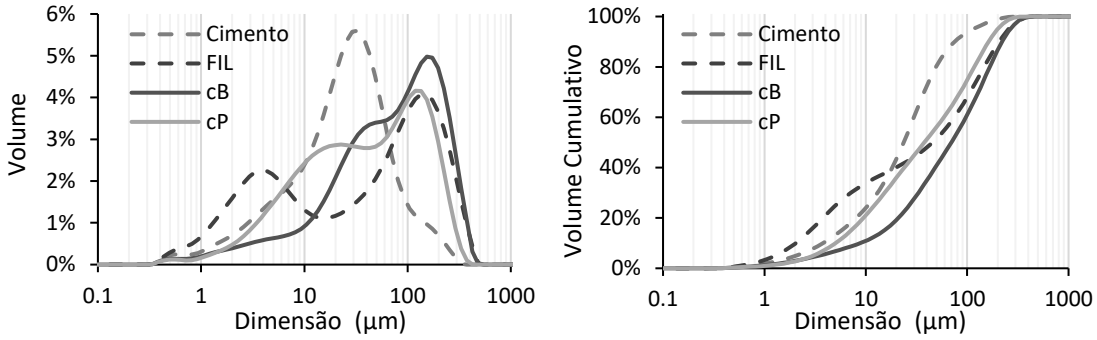


Figura 5 – Comparação das partículas das adições e cimento

3.2 ESTADO FRESCO

A Figura 6 apresenta os resultados do espalhamento e massa volúmica fresca para cada espécime ensaiado. Os resultados da Figura 6-esq indicam um espalhamento decrescente para o cBE e cPE com o aumento da percentagem de substituição e um resultado inverso para o FILE.

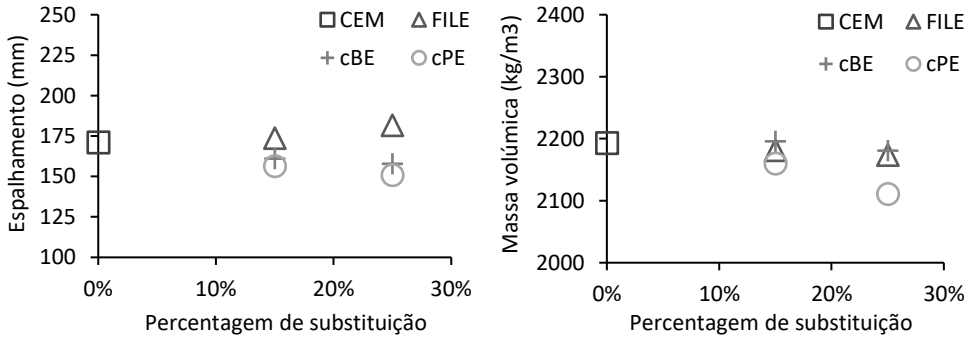


Figura 6 – Resultados de espalhamento (-esq) e de massa volúmica fresca (-dir)

Os resultados apresentados na Figura 6-dir indicam que para uma percentagem de substituição de 15% todas as amostras apresentam uma massa volúmica fresca semelhante. No entanto para uma percentagem superior, cPE apresenta uma ligeira diminuição da massa volúmica fresca, quando comparado com os restantes espécimes.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 7 apresenta a resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias, para 15% (-esq) e 25% (-dir) de substituição de cimento. Uma interpretação geral da Figura 7 revela que o CEM apresenta uma resistência à compressão superior às restantes argamassas, resultado expectável tendo em conta o seu maior teor em cimento. Para uma substituição de 15%, o cPE e o FILE apresentaram uma resistência à compressão (f_c) semelhante (< 3%) em todas as idades. Além disso, a comparação com as adições acima referidas revela que, com exceção dos 3 dias, f_c de cBE apresenta um valor ligeiramente inferior (< 4%). Pelo contrário, para uma substituição de 25%, o FILE apresentou f_c superior a todas as outras argamassas com adição. Em contrapartida, o cBE apresentou a menor f_c. A menor f_c inicial do cBE pode estar relacionada com o seu tamanho mais grosseiro e, portanto, menor nucleação e efeito filler. No entanto, as diferenças entre misturas tendem a aumentar após 7 dias, sugerindo que o efeito de nucleação sobre as partículas muito finas não é a única razão para os resultados diferentes.

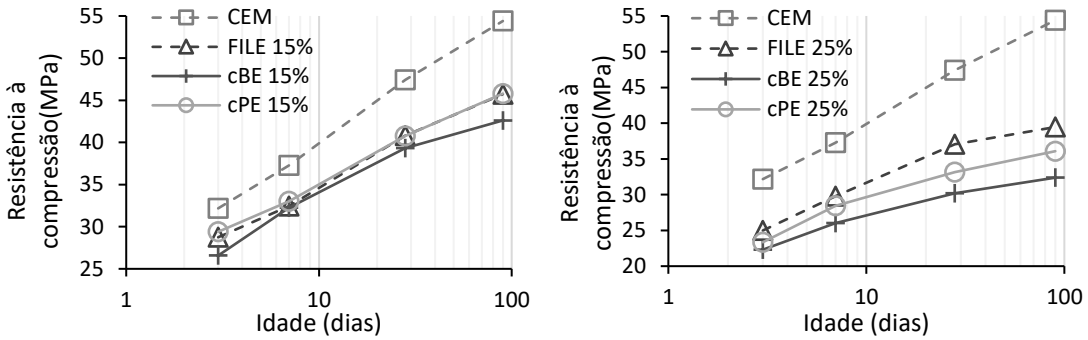


Figura 7 – Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias, considerando 15% (-esq) e 25% (-dir) de substituição de cimento

Os resultados de f_c sugerem que, em idades mais tardias, para a substituição de 15%, a composição mineralógica da adição teve maior influência na evolução da reação de hidratação do que a distribuição granulométrica das partículas. Assim, uma percentagem de substituição de 15% originou, em idades posteriores (≥7 dias), um f_c semelhante entre cPE e FILE, que apresentam maior quantidade de compostos carbonatados do que cBE. Além disso, este resultado sugere também que para uma substituição de 15%, as partículas de natureza siliciosa do agregado contribuíram negativamente para a evolução da f_c, uma vez que o cBE apresentou uma f_c inferior ao cPE. Um resultado que sugere ainda a possibilidade de que os FILE e os cPE permitiram uma melhor nucleação e desenvolvimento de produtos de hidratação nas suas superfícies.

Para uma substituição de 25%, os resultados sugerem que a distribuição granulométrica da adição afeta em maior grau a evolução da f_c, uma vez que o cPE e o FILE apresentam resultados de resistência à compressão diferentes. Dois efeitos podem afetar a evolução da f_c. Por um lado, em percentagens de substituição mais elevadas, a natureza porosa do FR pode também assumir uma maior relevância. Em idades avançadas a resistência da argamassa pode ser limitada pela resistência das partículas do FR, que diminui com o aumento da porosidade. Neste caso, o cP apresenta uma maior quantidade de pasta hidratada e uma maior porosidade que o cB. Por outro lado, a maior afinidade química entre o FR e os produtos de hidratação origina uma maior resistência da argamassa. No presente caso, verifica-se que a composição química e a maior área superficial do cP são fatores que favorecem a nucleação dos produtos de hidratação.

A redução da f_c ao longo do tempo no cBE em comparação com o FILE também pode ser explicada pela natureza porosa das partículas de cB. A porosidade intra-partícula destas adições pode limitar a evolução da f_c, especialmente a longo prazo. Como referido, este aspeto é mais importante para substituições de cimento mais elevadas. Neste caso, os FR de tamanho mais grosso (cB) estão também associados a uma porosidade mais grosseira, levando a uma menor resistência. Portanto, a eficiência do cB, em comparação com outras adições, é simultaneamente reduzida pelo seu tamanho mais grosseiro e composição química menos compatível.

Para uma melhor comparação entre a argamassa com adições e o CEM, é importante comparar a f_c em relação ao teor de cimento. A Figura 8 mostra os resultados de f_c normalizados (f_c / teor de cimento no ligante) para o teor de cimento de cada argamassa e relativos à f_c do CEM para 28 (-esq) e 90 (-dir) dias, para cada percentagem de substituição de cimento.

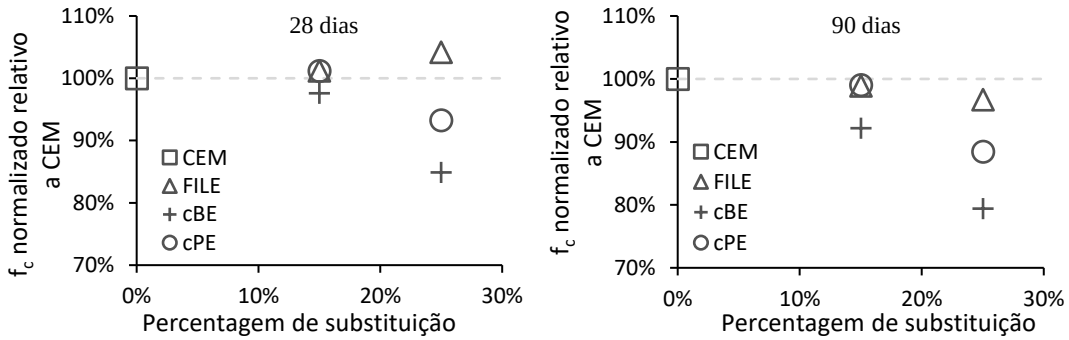


Figura 8 – Resistência à compressão normalizados para o teor de cimento de cada argamassa e relativos à resistência à compressão do CEM para 28 (-esq) e 90 (-dir) dias

Aos 28 e 90 dias, (Figura 8-esq) tanto o cPE como o FILE apresentaram uma f_c normalizada semelhante à das argamassas CEM, para uma substituição de 15%. Isto mostra que a adição reciclada carbonatada sem as impurezas do agregado não afeta significativamente a resistência à compressão. No entanto, em relação à reação pozolânica reportada por outros estudos, esta reação não foi confirmada no presente trabalho, uma vez que todas as argamassas com adições de FR revelaram uma f_c semelhantemente ou inferior às argamassas CEM.

3.4 POROSIDADE

A Figura 9 mostra a variação da porosidade ao longo do tempo (-esq) para uma percentagem de substituição de 25%, e a variação da porosidade com a percentagem de substituição (-dir), aos 28 dias. A porosidade do CEM foi consideravelmente inferior à das restantes argamassas, tanto aos 28 como aos 90 dias. Embora a porosidade tenha diminuído ao longo do tempo em todas as argamassas, a redução tanto no FILE como no cPE foi superior a 13%, enquanto para o cBE foi inferior a 9%. Isto sugere que as impurezas do agregado tiveram uma maior influência do que a distribuição granulométrica das adições, mesmo para uma percentagem de substituição de 25%. Resultado que apenas se observou na resistência à compressão para substituição de 15%. Este resultado corrobora a discussão feita anteriormente sobre o duplo efeito das adições de FR no desenvolvimento da resistência à compressão. Os resultados de porosidade revelam um resultado semelhante em argamassas com adição, independentemente da percentagem de substituição. Embora uma maior percentagem de substituição tenha originado um resultado de porosidade 1-2% superior, as diferentes argamassas com adições mantiveram uma ordem decrescente de porosidade semelhante: cPE, FILE, cBE. Além disso, apesar dos diferentes resultados de porosidade para cada percentagem de substituição, todos os valores estavam dentro do intervalo relativamente pequeno de 9%-12%, sugerindo uma semelhança de porosidade bastante elevada aos 28 dias.

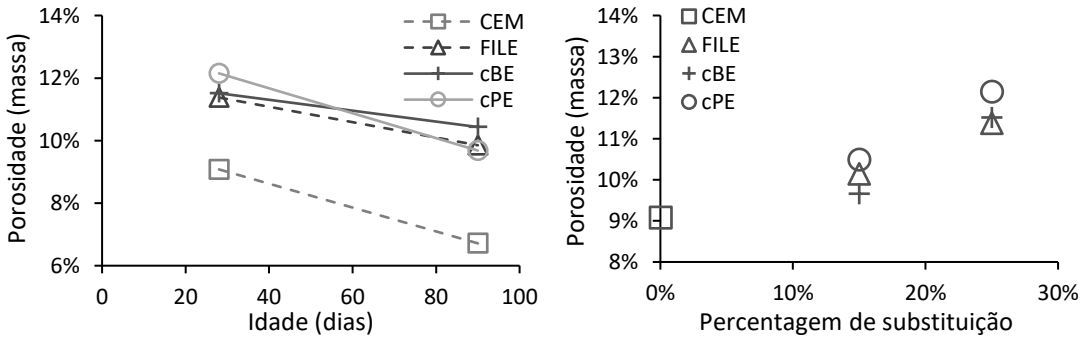


Figura 9 – Variação da porosidade por idade (-esq) e por percentagem de substituição (-dir)

De salientar a menor porosidade aos 28 dias das argamassas cBE do que FILE ou cPE. Isto não era esperado, uma vez que a hidratação foi mais relevante nas argamassas com adições referidas em último lugar. Além disso, a natureza porosa do FR também deverá contribuir para um maior aumento da porosidade. É possível que a secagem antes dos ensaios de porosidade não tenha sido suficiente para eliminar a água nos poros muito pequenos das partículas de FR, reduzindo a porosidade aparente das argamassas. Esta tendência foi invertida aos 90 dias.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo foram utilizadas duas adições recicladas para produzir argamassas à base de cimento, de forma a avaliar o impacto que as impurezas dos agregados têm nas características das adições. A caracterização das adições carbonatadas recicladas revelou que o cB apresenta cerca de 19% da capacidade de armazenamento de carbono do cP. Relativamente às características físicas, o processo de carbonatação foi também responsável pela diminuição de partículas inferiores a 10 µm independentemente da adição FR carbonatada. Relativamente ao tamanho médio das partículas, a carbonatação causou um aumento do tamanho médio das partículas no cP e diminuição no cB, resultado relacionado com a diferente distribuição granulométrica das partículas.

Os resultados de resistência à compressão revelaram que a presença de impurezas de agregado na adição FR carbonatada contribui negativamente para a evolução da reação de endurecimento da argamassa para uma percentagem de substituição de 15%. No entanto, para uma substituição de 25%, a distribuição granulométrica da adição demonstrou um maior impacto no resultado da resistência à compressão do que a presença de impurezas, apesar de contribuir de forma semelhante para uma redução do resultado da resistência à compressão. Os resultados da evolução da resistência à compressão estiveram associados a um duplo efeito das adições FR, nomeadamente a capacidade resistente das partículas e a afinidade química.

Para uma resistência à compressão normalizada ao teor de cimento, o cPE revelou uma resistência à compressão semelhante à CEM tanto para 28 como para 90 dias, um resultado positivo que revela o valor do cP e promove a investigação contínua sobre tecnologias capazes de produzir FR sem impurezas agregadas. Além disso, a menor porosidade aos 90 dias para o cPE deixa antever uma melhoria da microestrutura porosa nas idades posteriores, sugerindo que para idades superiores a 90 dias a ausência de impurezas de agregado na adição poderá originar uma argamassa com melhor desempenho nos testes de durabilidade.

Globalmente, os resultados obtidos nesta secção revelaram que a ausência de impurezas de agregado é benéfica para o desempenho mecânico dos materiais de base cimentícia que incorporam adições de FR carbonatado. Resultado que prove a procura de estratégias capazes de remover o agregado dos resíduos de betão demolido, pois não só a remoção das impurezas do agregado origina uma adição de FR com uma capacidade de absorção de carbono significativamente superior, como as características do FR carbonatado como adição são melhoradas.

REFERÊNCIAS

Ashraf, W., & Olek, J. (2018). Elucidating the accelerated carbonation products of calcium silicates using multi-technique approach. Journal of CO2 Utilization(23), 61-74.

Bouarroudj, M., Rémond, S., Bulteel, D., Potier, G., Michel, F., Zhao, Z., & Courard, L. (2021). Use of grinded hardened cement pastes as mineral addition for mortars. Journal of Building Engineering(34), 101863.

Cong, L., Jialin, L., Jing, C., Hailun, W., & Dong, L. (2019). Study on the Application of Recycled Fine Powder in Ready-Mixed Concrete. MATEC Web of Conferences(278), 01010.

Fang, X., Xuan, D., Zhan, B., Li, W., & Poon, C. (2021). A novel upcycling technique of recycled cement paste powder by a two-step carbonation process. Journal of Cleaner Production(290), 125192.

Filippo, J., Karpman, J., & DeShazo, J. (2019). The impacts of policies to reduce CO2 emission within the concrete supply chain. Cement and Concrete Composites(101), 67-82.

He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. Construction and Building Materials(211), 965-973.

Lippiatt, N., Ling, T.-C., & Pan, S.-Y. (2020). Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective. Journal of Building Engineering(28), 101062.

Mehdizadeh, H., Ling, T.-C., Cheng, X., & Mo, K. (2020). Effect of particle size and CO2 treatment of waste cement powder on properties of cement paste. Can. J. Civ. Eng.

Mehdizadeh, H., Ling, T.-C., Cheng, X., Pan, S.-Y., & Mo, K. (2021). CO2 treatment of hydrated cement powder: Characterization and application consideration. Journal of Materials in Civil Engineering(33), 04021041.

Ouyang, X., Wang, L., Xu, S., Ma, Y., & Ye, G. (2020). Surface characterization of carbonated recycled concrete fines and its effect on the rheology, hydration and strength development of cement paste. Cement and Concrete Composites(114), 103809.

Poon, C., Shen, P., Jiang, Y., Ma, Z., & Xuan, D. (2023). Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review. Cement and Concrete Research(173), 107284.

Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). A Pratical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press.

Silva, A., Nogueira, R., Bogas, A., Abrantes, J., Wawrzynczak, D., Sciubidlo, A., & Majchrzak-Kuceba, I. (2022). Valorisation of recycled cement paste: feasibility of a short duration carbonation process. Materials(15), 6001.

Silva, A., Nogueira, R., Bogas, A., Wawrzynczak, D., Sciubidlo, A., & Majchrzak-Kuceba, I. (2022). Parametric study towards optimization of a short duration carbonation process of recycled cement paste. Materials(15), 6513.

Wang, D., Fang, Y., Zhang, Y., & Chang, J. (2019). Changes in mineral composition, growth of calcite crystal, and promotion of physico-chemical properties induced by carbonation of β-C2S. Journal of CO2 Utilization(34), 149-162.

Wu, Y., Mehdizadeh, H., Mo, K., & Ling, T.-C. (2022). High-temperature CO2 for accelerating the carbonation of recycled concrete fines. Journal of Building Engineering(52), 104526.

Zajac, M., Skibsted, J., Bullerjahn, F., & Skocek, J. (2022). Semi-dry carbonation of recycled concrete paste. Journal of CO2 Utilization(63), 10211.

Zhang, Y., Chen, H., & Wang, Q. (2022). Accelerated carbonation of regenerated cementitious materials from waste concrete for CO2 sequestration. Journal of Building Engineering(55), 104701.

Tema 2. Materiais inovadores

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O EFEITO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO BETÃO PRODUZIDO COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Zhiyou Jia [a]; Sandra Cunha [a]; José Barroso de Aguiar [a]

[a]CTAC-Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal.

pg39237@uminho.pt; sandracunha@civil.uminho.pt; aguiar@civil.uminho.pt

RESUMO

Com o aumento populacional global, o consumo de energia, especialmente durante a fase de utilização dos edifícios, tornou-se uma das maiores preocupações políticas, sociais e ambientais. A dependência predominante de combustíveis fósseis para obtenção de energia resulta na sua escassez, com impactos ambientais significativos. A urbanização acelerada gera também grandes volumes de resíduos de construção e demolição (RCD). Para abordar esses desafios, propõe-se a integração de materiais de mudança de fase (PCM) em RCD. Neste estudo, um PCM adequado ao conforto térmico para o interior dos edifícios (temperatura de transição de 22 ℃) foi combinado com RCD substituindo os agregados naturais no betão. Os materiais foram caracterizados, resultando em três composições: Betão referência (REF), 50% de RCD (50RCD), e 50% de RCD funcionalizado com PCM (50RCD-PCM) em substituição dos agregados naturais. Os resultados indicaram que a incorporação de PCM melhorou a trabalhabilidade e reduziu a absorção de água do betão. No entanto, verificou-se uma diminuição de aproximadamente 16,5% na resistência à compressão devido à presença do agregado funcionalizado. Este estudo fornece dados relevantes para a aplicação de PCM em betão sustentável, destacando considerações essenciais sobre as suas propriedades físicas e mecânicas.

Palavras-chave: Betão sustentável, materiais de mudança de fase, resíduos de construção e demolição, propriedades físicas mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

O betão tornou-se um dos materiais de construção mais utilizado na indústria da construção atualmente. É amplamente utilizado em estradas, pontes, edifícios residenciais e outros campos da construção. De acordo com as estatísticas da Global Cement and Concrete Association (GCCA) em 2021, cerca de 40% do betão mundial é utilizado em edifícios residenciais. O agregado natural necessário para a produção de betão tradicional representa cerca de 75% do seu volume total. Sabe-se, que a exploração agregada natural tem causado sérios problemas ecológicos e ambientais. Por outro lado, uma grande quantidade de resíduos sólidos é produzida durante a fase de construção e demolição dos edifícios, denominada de resíduos de construção e demolição (RCD). Os RCDs normalmente são compostos por betão, argamassa, tijolo, cerâmicos, vidro, plástico, madeira, etc. Após o seu processamento, pode obter-se um agregado reciclado de boa qualidade. Vários investigadores têm vindo a estudar o RCD como substituto dos agregados naturais na produção de betão (*Santiago et al.* 2009; Phutthimethakul *et al.* 2020; Esquinas 2020) valorizando os RCDs, reduzindo a sobre-exploração de agregados naturais e maximizando os benefícios ambientais e económicos no setor da construção (Ginga *et al.* 2020). No entanto, a enorme produção de RCD e sua baixa taxa de reutilização são uma contradição, especialmente em países em desenvolvimento. Por exemplo, de acordo com Housing and Urban Development da China (2021), a produção anual de RCD é cerca de 2,3 bilhões de toneladas, e a sua taxa de utilização é inferior a 5% (Huang *et al.* 2018); The time of India (2020) relatada a produção anual de RCD da Índia em cerca de 5 milhões de toneladas.

Por outro lado, Mac *et al.* (2018) mencionou que cerca de 40% do consumo total de energia ocorre durante a fase de utilização dos edifícios. A Agência Internacional de Energia (2018) relata que a forma predominante de consumo de energia nos edifícios se encontra associada ao aquecimento e arrefecimento dos espaços internos, representando cerca de 50% a 63%. Uma grande quantidade de energia é obtida com base em combustíveis fosses, o que não apenas leva à exaustão de recursos energéticos, mas também gera grandes quantidades de gases de efeito estufa. Em conformidade com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 mencionado na Agenda 2030 (2015) das Nações Unidas é impreterivel garantir o acesso a energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos. Assim, a energia solar tem vindo a ganhar destaque como fonte de energia sustentável e limpa (Rathore *et al.* 2022; Li *et al.* 2021). Os Materiais de Mudança de Fase (PCM) com base nas suas características de calor latente podem absorver/liberar energia, ocorrendo a sua mudança de fase (ex. sólido - líquido) a uma determinada temperatura, alcançando assim o efeito de regular a temperatura no interior dos edificios (Antonella *et al.* 2020). Existem inúmeros estudos sobre o PCM aplicado em argamassas (Antonella *et al.* 2020; Rathore *et al.* 2022; Cunha *et al.* 2015, 2017), betão (Cellat *et al.* 2017; Cabeza *et al.* 2007), tijolos (Shen *et al.* 2021) e placa de gesso/plástico (Rida *et al.* 2021), etc., por meio de métodos de encapsulamento (Cunha *et al.* 2017; Rida *et al.* 2021), imersão (Cabeza *et al.* 2007; Ling *et al.* 2013), incorporação direta (Cunha *et al.* 2015; Cellat *et al.* 2017) e estabilização (Lv *et al.* 2017; Antonella *et al.* 2020; Shen *et al.* 2021; Rathore *et al.* 2022).

O encapsulamento, o método de aplicação direta ao PCM inclui o microencapsulamento e o macroencapsulamento, consiste em envolver o PCM em microcápsulas ou macrocápsulas, o que pode evitar que o PCM reaja com o ambiente circundante. As cápsulas podem ser adicionadas de forma flexível a vários materiais, como argamassa, betão, etc., tornando a aplicação de PCM mais flexível. Cunha *et al.* (2017) estudaram a incorporação de microcápsulas de PCM com dimensões de 5,8 a 339 µm em argamassas. Os resultados mostraram que a incorporação de microcápsulas de PCM causou uma diminuição na trabalhabilidade, um aumento na porosidade e uma diminuição do seu comportamento mecânico. No entanto, o processo de encapsulação é relativamente complexo, a preparação de microcápsulas requer um investimento adicional, pelo que o seu custo é geralmente é

elevado.

O método de estabilização consiste em absorver o PCM líquido num material de suporte poroso (por exemplo RCD, agregado leve ou outros agregados), compô-lo por meio de solidificação e, em seguida, misturá-lo em argamassa ou betão, o que melhora a estabilidade e a flexibilidade do PCM. Seu processo operacional é relativamente complexo em comparação com o método de incorporação direta, sendo necessário caracterizar as propriedades físicas do PCM e dos materiais de suporte (como temperatura de transição do PCM, expansão volumétrica e capacidade absorção dos materiais, etc.) para determinar a sua viabilidade e teor de absorção ótimo. Este método foi investigado por vários pesquisadores. Por exemplo, Antonella *et al.* (2020) estudaram a pedra de Lecce com distribuição de tamanho entre 1.6 e 2.0 mm como material de suporte para absorção de PCM e reutilização em argamassas. A análise da microestrutura das argamassas revelou uma boa interação entre os diferentes componentes, e os resultados térmicos mostraram um bom desempenho. Shen *et al.* (2021) estudaram a agregado leve com porosidade de 58% para absorver parafina posteriormente aplicada em betão. Os resultados dos ensaios térmicos revelaram que as propriedades térmicas do betão aumentaram em 41.23% quando o teor de parafina foi de 6% (90 kg/m^3) da massa total do betão.

Neste trabalho, o RCD foi funcionalizado com PCM (RCD-PCM) à pressão atmosférica durante 4 horas, sendo o RCD funcionalizado utilizado na preparação de betão substituindo os agregados naturais. Foram desenvolvidas três composições distintas, nomeadamente o betão referência (REF), betão com substituição de 50% de agregado natural por RCD (50RCD) e betão com substituição de 50% de agregado natural por RCD funcionalizado com PCM (50RCDPCM). A quantidade de água do betão fresco, a massa volúmica, a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão, a resistência à compressão e a resistência à flexão do betão endurecido foram determinadas. Desta forma, o impacto da adição de PCM nas propriedades físicas e mecânicas do betão do betão sustentável foram analisadas e discutidas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

O RCD é um agregado reciclado comercial de uma estação de reciclagem localizada em Portugal. A distribuição original de tamanho do RCD estava entre 0 e 10 mm. Após a passagem por um peneiro de abertura de 4 mm, obteve-se a distribuição de partículas do RCD entre 4-10 mm. A curva de distribuição de tamanho do RCD é apresentada na Figura 1.

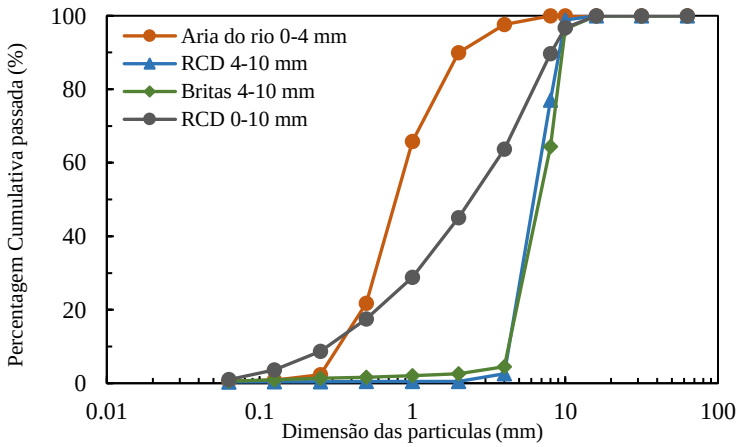


Figura 1. Granulometria dos agregados.

Os agregados naturais selecionados foram uma brita comercial e uma areia de rio. O PCM selecionado para estudo foi uma parafina pura, comercializada pela empresa Rubitherm (Alemanha). Trata-se de um PCM orgânico, com temperatura de transição de 22 ℃, o que é adequado para as temperaturas de conforto no interior dos edifícios. A variação volumétrica máxima do PCM durante a sua transição de fase foi de 2.7%, pelo que não é expectável que confira danos na microestrutura dos betões desenvolvidos. De acordo com o produtor, a massa volúmica do PCM no estado sólido é de 0,76 kg/L, a massa volúmica no estado líquido é de 0,7 kg/L e a sua entalpia é de 190 kJ/kg (Rubitherm 2020). O cimento utilizado foi fornecido por uma empresa portuguesa (SECIL) sendo do tipo CEM I 42.5R, com massa volúmica de 3142 kg/m^3. O quadro 1 apresenta a massa volúmica e absorção de água dos diferentes agregados utilizados para a produção dos betões em estudo.

Quadro 1 – Massa volúmica e absorção de água dos agregados.

Parâmetros	Areia 0-4	Brita 4-10	RCD 4-10
Massa volúmica seca (kg/m^3)	2563	2197	2134
Massa volúmica saturada (kg/m^3)	2593	2208	2294
Absorção de água (%)	1.19	0.51	7.82

De acordo com a norma EN 933-1 (2012), a granulometria dos agregados foi determinada. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 1. nade acordo com a Figura 1 pode observar-se que a curva de distribuição granulométrica do RCD e da brita são praticamente coincidentes, o que contribui para a redução de possíveis diferenças de comportamento no betão originadas pela substituição do agregado natural por agregado RCD funcionalizado com PCM.

Neste estudo, a técnica de estabilização de PCM em agregados foi aplicada. A avaliação da absorção de PCM pelo RCD foi realizada sob condições de pressão atmosférica, avaliando a capacidade de absorção em intervalos de uma e quatro horas. Para garantir a absorção ótima de PCM pelos RCD, foi realizada uma etapa de pré-secagem dos agregados em estufa a uma temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. Para avaliar efetivamente a capacidade do RCD em absorver PCM líquido, tornou-se imperativo manter o PCM no seu estado líquido durante todo o procedimento experimental. Para tal, o PCM foi submetido a uma temperatura controlada de 30 °C, ultrapassando intencionalmente a sua temperatura de transição (aproximadamente 22 °C). Posteriormente, os RCD foram imersos no PCM líquido por uma e quatro horas, com agitação periódica usando uma barra de aço a cada 15 minutos para garantir uma absorção uniforme. Após um período de imersão de uma ou quatro horas no PCM líquido, o RCD foi retirado usando um coador e depois arrefecido à temperatura ambiente, resultando na formação de agregados térmicos. Os resultados detalhando a absorção de PCM pelo RCD durante os testes de imersão de uma e quatro horas são apresentados no Quadro 2. Visando atingir a dosagem máxima de PCM, um tempo de imersão de quatro horas foi selecionado como a duração ideal para a etapa de funcionalização do agregado.

Quadro 2 – Absorção do PCM por RCD (%).

Tempo de imersão	Teor de absorção (%)
Uma hora	7.47
Quatros horas	8.02

2.2 FORMULAÇÃO DOS BETÕES

Neste estudo, foram formuladas três composições de betão. O betão de referência, designado como REF, foi preparado seguindo o método Faury. A dosagem de cimento adotada foi de 400 kg/m^3. Para obter melhor trabalhabilidade do betão fresco, o abaixamento do betão fresco foi controlado dentro

da faixa de 13 a 14 cm ajustando a relação água/cimento. Posteriormente, mais duas composições foram desenvolvidas, nomeadamente 50RCD e 50RCD-PCM, substituindo 50% da brita por 50% de RCD e 50% de RCD-PCM, respetivamente. Mantenha a unidade de volume do betão consistente durante a substituição. Uma vez que a areia de rio, RCD e brita foram utilizados após secagem a 105 °C por 24 horas, consequentemente, a saturação com água foi considerada como parte do processo de absorção para os agregados secos. O Quadro 3 apresenta as composições desenvolvidas.

Quadro 3 – Composições de betão (kg/m^3).

Misturas	Cimento	Água	Areia do rio	Brita	RCD	RCD-PCM	Água de saturação
REF	400	220	393	1035	0	0	10
50RCD	400	230	393	552	552	0	50.6
50RCD-PCM	400	240	393	541.6	0	541.6	7.4

Todas as amostras foram preparadas em ambiente laboratorial, de acordo com a norma EN 12390-1 (2003). Nove provetes cúbicos com dimensões de 50 mm × 50 mm × 50 mm foram produzidos, sendo quatro provetes utilizados para o ensaio da absorção de água por imersão e massa volúmica do betão e cinco provetes para o ensaio de determinação da resistência à compressão. Adicionalmente, três provetes prismáticos com dimensões de 40 mm×40 mm×160 mm foram desenvolvidos para ensaio de determinação da resistência à flexão. Após o ensaio de resistência à flexão, os provetes passaram por um processo de secagem em um forno ajustado a uma temperatura de 60 °C. A secagem continuou até que uma massa constante fosse alcançada, indicando que a alteração de massa era inferior a 0,1% dentro de um período de 24 horas. Posteriormente, o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado.

2.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Este estudo teve como objetivo investigar de forma abrangente a trabalhabilidade, as propriedades físicas e mecânicas do betão. Os principais ensaios conduzidos neste trabalho incluíram o abaixamento, a massa volúmica, a absorção de água por imersão, a absorção de água por capilaridade, a resistência à compressão e a resistência à flexão. Para avaliar a trabalhabilidade do betão fresco, seguiu-se a norma EN 12350-2 (2002). Este ensaio avaliou a trabalhabilidade, bem como permitiu ajustes na quantidade de água utilizada para alcançar uma trabalhabilidade ótima. Posteriormente, todas as amostras de betão passaram por um período de cura de 28 dias em água para garantir uma hidratação adequada e o desenvolvimento das propriedades mecânicas.

A massa volúmica foi determinada seguindo a norma NP 581 (1969). A absorção de água por imersão, avaliando a capacidade do betão de absorver água quando submerso, foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 394 (1993). A resistência à compressão foi determinada de acordo com a norma EN 12390-3 (2003), com uma velocidade de ensaio de 2,9 kN/s. O ensaio de resistência à flexão foi realizado seguindo a norma EN 12390-5 (2003), com uma taxa de carga de ensaio de 50 N/s. O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a norma LNEC E 393 (1993). Este ensaio mensurou a quantidade de água absorvida pela amostra em vários intervalos de tempo, totalizando 150 horas de ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 QUANTIDADE DE ÁGUA UTILIZADA

A Figura 2 apresenta a dosagem de água utilizada na formulação dos deferentes betões desenvolvidos. O abaixamento do betão fresco foi controlado dentro da faixa de 13 a 14 cm. A incorporação de 50% de RCD em substituição do agregado natural, necessário originou um aumento na quantidade de água de 4.5%, o que pode ser justificado pela superfície irregular dos agregados de RCD, juntamente com a presença de partículas finas aderidas a eles. Da mesma forma, quando 50% de RCD-PCM substituiu os agregados naturais, foi possível verificar um aumento de 4.3 % na quantidade de água adicionada à mistura, em comparação com a composição 50RCD. Este aumento pode ser justificado pelo facto de que os agregados de RCD funcionalizados com PCM possuam ainda poros que não estejam completamente saturados com PCM, absorvendo água durante o processo de fabrico do betão.

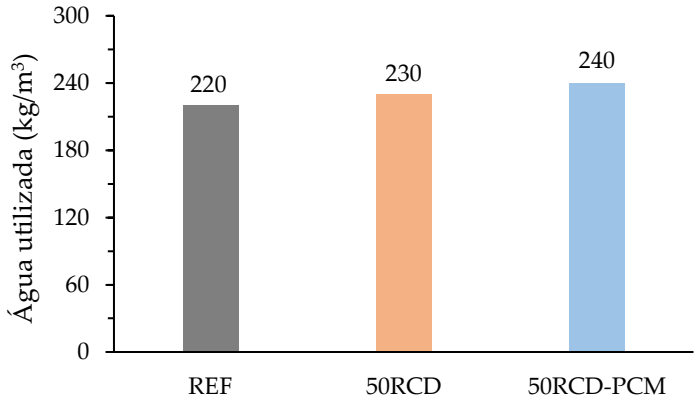


Figura 2 – Água utilizada no betão.

3.2 MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica dos betões desenvolvidos encontra-se na Figura 3, tendo sido possível observar que a massa volúmica seca do betão referencia (REF) é 4.5% superior à massa volúmica composição com incorporação de 50% RCD e cerca de 7.4% superior à composição com incorporação de 50% RCD-PCM. Uma análise mais detalhada dos dados do Quadro 1 revela que esta tendência pode ser atribuída à massa volúmica seca superior da brita em comparação com o RCD. O PCM tem possui uma massa volúmica mais baixa, reduzindo ainda mais a massa volúmica do betão com incorporação do agregado funcionalizado com PCM.

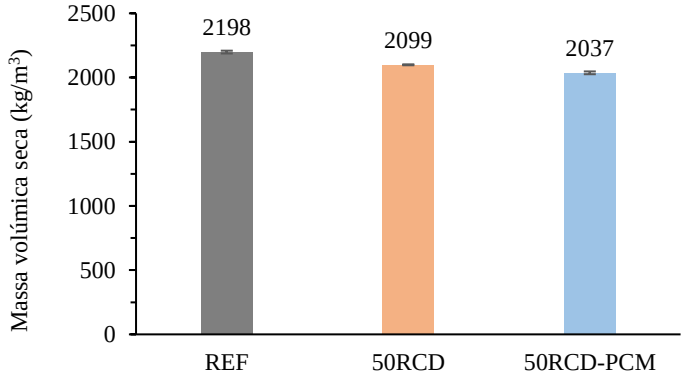


Figura 3 – Massa volúmica seca de betões (kg/m^3).

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados de absorção de água por imersão. O betão referência (REF) demonstrou uma menor capacidade de absorção de água por imersão, aproximadamente 23,5% menor do que a composição com incorporação de 50% de RCD (50RCD) e cerca de 18,1% menor do que a composição com 50% de RCD funcionalizado com PCM (50RCD-PCM).

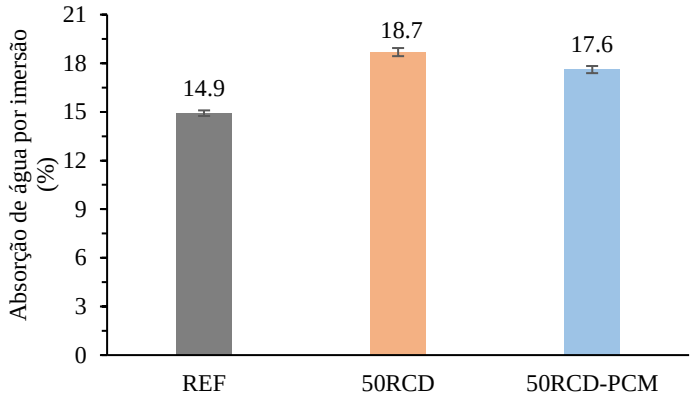


Figura 4 – Absorção de água por imersão de betões (%).

Por outro lado, a absorção de água por imersão da composição 50RCD-PCM é aproximadamente 5,9% menor do que a composição 50RCD. O betão referência (REF) consistentemente exibe características de absorção de água mais baixas quando comparado com misturas de betão que incorporam RCD. Ao comparar com a incorporação de betão com RCD não funcionalizado, torna-se evidente que a incorporação de betão com RCD funcionalizado tende a reduzir a absorção de água por imersão. Estes resultados são também influenciados pelas maiores relações água – cimento das composições com incorporação de RCD. É de notar que a maior capacidade de absorção de água do RCD também contribui para os resultados identificados.

3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água por capilaridade dos betões desenvolvidos teve início no primeiro contato do betão com a água, tendo sido desenvolvida por um período de 150 horas, até à estabilização da massa dos elementos de ensaio. Os resultados são apresentados na Figura 5. Além disso, quando considerados junto aos princípios que regem a absorção de água por capilaridade (Wang et al. 2021), os resultados apresentados sugerem que a composição com incorporação de 50% de RCD funcionalizado com PCM (50RCD-PCM) possui uma menor microposrosidade.

As curvas de absorção de água por capilaridade tanto do betão referência e do betão com incorporação de 50% de RCD apresentam uma tendência semelhante durante as primeiras 41 horas de ensaio. No entanto, após esse ponto, a absorção de água por capilaridade da composição 50RCD gradualmente ultrapassa a curva da composição de referência (REF). No entanto, é importante observar que, após essa fase, todas as misturas apresentam uma absorção contínua de água até atingirem essencialmente um estado de massa constante.

Os coeficientes de absorção de água por capilaridade foram determinados, e os resultados são apresentados no Quadro 4. Notavelmente, a mistura 50RCD-PCM exibiu um coeficiente de absorção de água por capilaridade significativamente menor, indicando sua superior resistência à absorção de

água por capilaridade. Em contraste, o 50RCD demonstrou o coeficiente de absorção de água por capilaridade mais alto, superando o de 50RCD-PCM em aproximadamente 43,4% e ultrapassando a mistura REF em 8,9%. Esses fenômenos podem ser elucidados pela presença de PCM nos poros capilares do RCD, pelo que o PCM efetivamente obstrui a ocorrência de fenômenos capilares em grande medida, levando a uma redução no coeficiente de absorção de água por capilaridade e contribuindo para a diminuição da microporosidade. A presença de um maior coeficiente de absorção de água por capilaridade na composição com incorporação de 50% de RCD encontra-se associada à maior capacidade de absorção de água do agregado reciclado não funcionalizado, comparativamente ao agregado natural (brita).

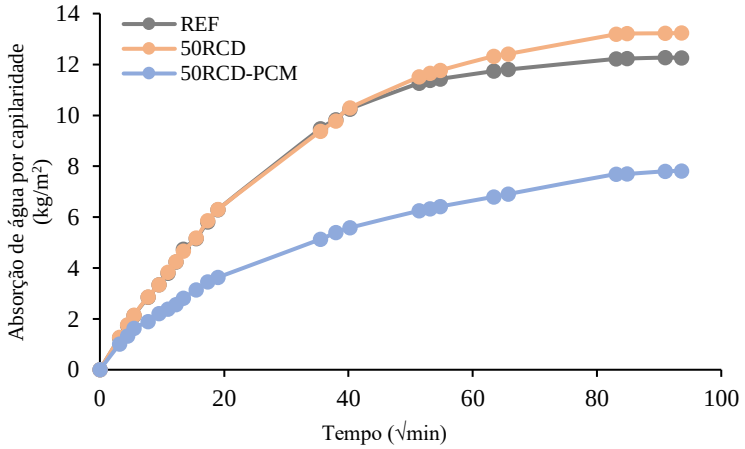


Figura 5 – Absorção de água por capilaridade (kg/m^2).

Estas descobertas destacam as diferenças significativas nas propriedades de absorção de água por capilaridade entre as misturas, com o 50RCD-PCM apresentando o desempenho mais favorável em termos de coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Quadro 4 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/(m^2·min$^{0.5}$)).

Composições	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/(m^2·min$^{0.5}$))
REF	0.116
50RCD	0.1274
50RCD-PCM	0.0721

3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 6, torna-se evidente que a resistência à compressão do betão de referência é superior à do betão com incorporação de 50% de RCD (50RCD) em cerca de 37.1% e em cerca de 64.3% à do betão com incorporação de agregado funcionalizado com (PCM). Além disso, a resistência à compressão do betão com incorporação de RCD funcionalizado diminuiu 16.5% comparativamente à do betão de referência. Vale ressaltar que, com o mesmo conteúdo de RCD, a incorporação de betão com RCD funcionalizado apresentou resistência à compressão ligeiramente inferior. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que o PCM aderindo à superfície do RCD pode resultar em uma ligação menos eficaz entre a matriz de cimento e os agregados (Cellat *et al.* 2017; Kumar 2022). Por outro lado, a presença de uma maior relação água-cimento (Quadro 3 e Figura 2) e maior macroporosidade (Figura 4), também são fatores que contribuem par a diminuição da resistência à compressão dos betões com incorporação de RCD e RCD funcionalizado com PCM.

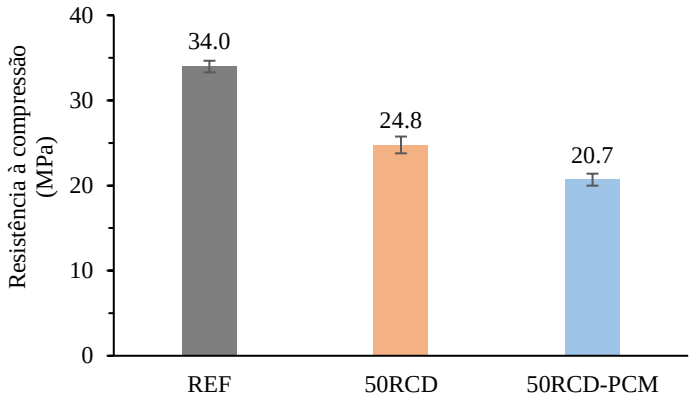


Figura 6 – Resistência à compressão do betão (MPa).

3.6 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A Figura 7 apresenta a resistência à flexão dos diferentes betões desenvolvidos, tendo sido possível observar que a composição de referência e a composição com incorporação de 50% de RCD apresentam resistências à flexão idênticas de 6 MPa. No entanto, a incorporação de RCD funcionalizado com PCM originou uma diminuição na resistência à flexão de cerca de 23% comparativamente com as composições REF e 50RCD. Este comportamento encontra-se relacionado com a fragilização da microestrutura do betão devido à acumulação de PCM na superfície do agregado, fragilizando a ligação entre a pasta de cimento e o agregado funcionalizado, tal como exposto anteriormente. Foram ainda observadas variações relativamente substanciais entre as três amostras de REF, indicando algum grau de variabilidade no seu desempenho à flexão.

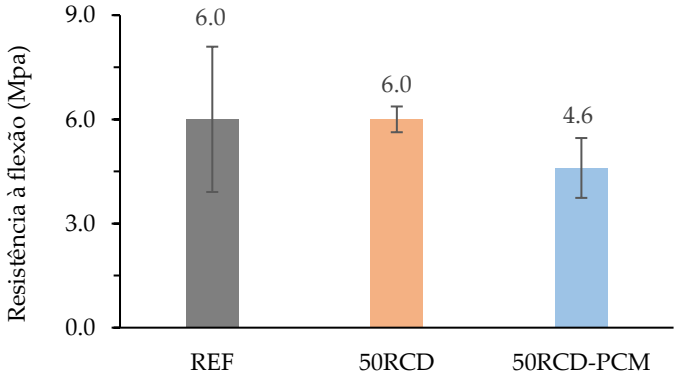


Figura 7 – Resistência à flexão (MPa).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho aborda a integração inovadora de resíduos de construção e demolição como substituto do agregado natural em betões, funcionalizando-os com materiais de mudança de fase. Esta abordagem encara três preocupações primordiais na indústria da construção: a gestão eficiente dos recursos naturais, o tratamento dos resíduos de construção e demolição e a melhoria da eficiência energética dos edifícios. No entanto, a incorporação de RCD funcionalizado com PCM, impacta significativamente as propriedades físicas e mecânicas do betão.

A partir do consumo de água do betão fresco, fica evidente que a presença de RCD influencia significa

tivamente a trabalhabilidade do betão. O RCD exige uma quantidade maior de água para atingir a flui dez desejada. Por outro lado, no caso do RCD funcionalizado, o PCM ocupa efetivamente os poros do RCD, contudo, alguns dos poros do RCD ainda apresentam capacidade de absorção de água. Consequ entemente, essa modificação resulta em uma maior exigência de água, aprimorando a trabalhabilida de do betão.

Os resultados da massa volúmica seca do betão apresentam a mesma tendência que a massa volúmica seca do agregado. Ou seja, quanto maior a massa volúmica seca do agregado, maior a massa volúmica seca do betão. A partir dos resultados de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, foi possível verificar a incorporação de 50% RCD originou uma maior absorção de água. A incorporação de 50% RCD funcionalizado com PCM apresentou um baixo coeficiente de absorção de água por capilaridade, o que se encontra relacionado com o fato do PCM preencher parcialmente os poros do RCD, o que efetivamente impede a ocorrência de fenômenos capilares no betão, resultando numa redução do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Com base nos resultados dos ensaios mecânicos, é evidente que a composição com incorporação de agregado funcionalizado com PCM (50RCD-PCM) exibiu valores relativamente mais baixos de resistência à compressão e flexão. O principal fator que contribui para esse fenômeno é a presença de PCM aderindo à superfície do RCD, o que altera a ligação entre a pasta de cimento e o agregado. Consequentemente, esta alteração reduz o atrito interno dentro do betão, levando à redução observada tanto na resistência à compressão quanto na resistência à flexão. Estas descobertas destacam a importância de considerar o impacto do PCM nas propriedades físicas e mecânicas do betão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito da bolsa de doutoramento com referência UI/BD/152844/2022.

REFERÊNCIAS

Antonella, S., Jose L., Aguiar J., Mariateresa L., Cunha S., Frigione M. (2020). Thermal Performance of Mortars Based on Different Binders and Containing a Novel Sustainable Phase Change Material (PCM). Materials, 13:e2055. https://doi.org/doi:10.3390/ma13092055.

Baeyens, A., Tom, G. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York. https://doi.org/10.1163/15718093-12341375.

Cabeza, L. F., Cecilia, C., Miquel, N., Marc, M., Ron, L., Oihana, Z. (2007). Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings. Energy and Buildings, 39(2):113–119. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030.

Cellat, K., Beyza, B., Berk, K., Yeliz, K., Halime, P. (2017). Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings. Journal of Clean Energy Technologies, 5 (1):64–68. https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.1.345.

Cunha, S., Aguiar, J., Victor, F. (2017). Durability of Mortars with Incorporation of Phase Change Materials Microcapsules. Revista Romana de Materiale, 47:166–75.

Cunha, S., Aguiar, J., Victor, F., António, T. (2015). Mortars Based in Different Binders with Incorporati on of Phase-Change Materials: Physical and Mechanical Properties. European Journal of Environm

ental and Civil Engineering 19:1216–1233. https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1008651.

European Committee for Standardization (CEN), EN 12390-1, Hardened Concrete Tests, Part 1: Shape, Dimensions and Other Requirements for Specimens and Moulds, (2003).

European Committee for Standardization (CEN), EN-12350-2, Fresh Concrete Tests, Part 2: Slump Test, (2002).

European Committee for Standardization (CEN), EN 12390-3, Hardened Concrete Tests, Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, (2003).

European Committee for Standardization (CEN), EN 12390-5, Ensaios Do Betão Endurecido Parte 5: Resistência à Flexão de Provetes, (2003).

European Committee for Standardization (CEN), EN 933-1, Tests of Geometric Properties of Aggregates; Part 1: Particle Size Analysis; Sieving Method, (2012).

Esquinas, A. R. (2020). Mechanical and Durability Performance of Mortars with Fine Recycled Concrete Aggregates and Reactive Magnesium Oxide as Partial Cement Replacement. Cement and Concrete Composites, 105:1–10. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103420.

GCCA. (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London. https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap.pdf.

Ginga, C.P., Jason, M., Ongpeng, C., Klarissa, M. (2020). Circular Economy on Construction and Demolition Waste. Materials, 13:e2970. https://doi.org/10.3390/ma13132970.

Housing and Urban-Rural Development. (2021). China Promotes Construction Waste Management and Resource Utilization, Beijing. http://www.gov.cn/xinwen/2021-12/09/content_5659650.htm.

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y. Bleischwitz, R., Ren, J. (2018). Construction and Demolition Waste Management in China through the 3R Principle. Resources, Conservation and Recycling, 129:36–44.

International Energy Agency (IEA). (2018). Energy Efficiency 2018, Beijing. www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm.

Instituto Portugês da Qualidade (IPQ), NP-581, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de britas e godos, (1969).

Instituto Portugês da Qualidade (IPQ), NP-954, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias, (1973).

Jia, Z., Aguiar, J., Cunha, S., Jesus, C. (2023). Green Thermal Aggregates: Influence of the Physical Properties of Recycled Aggregates with Phase Change Materials. Materials, 16:e6267. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16186267.

Kumar, C. (2022). Experimental Investigation on the Properties of Cemen−PCM Mortars. IranianJournal of Science and Technology, 46:4233–4241. https://doi.org/10.1007/s40996-022-00874-1.

Ling, T. C., Poon, C. (2013). Use of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Concrete: A n Overview. Construction and Building Materials, 46:55–62. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), LNEC E 393, Betão: Determinação de

absorção de água por capilaridade, (1993).

Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), LNEC E 394, Betão: Determinação de absorção de água por imersão, (1993).

Lv, P., Liu, C., Rao, Z., (2017). Review on Clay Mineral-Based Form-Stable Phase Change Materials: Preparation, Characterization and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68:707–726. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.014.

Mac, P., Cao, X., Buonocore, J., Cedeno-Laurent J., Spengler J., Bernstein A., Allen J. (2018). Energy Savings, Emission Reductions, and Health Co-Benefits of the Green Building Movement. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 28(4):307–318. https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9.

Phutthimethakul, Lalitsuda, Kumpueng, P., Nuta, S. (2020). Use of Flue Gas Desulfurization Gypsum, Construction and Demolition Waste, and Oil Palm Waste Trunks to Produce Concrete Bricks. Crystals, 10:e709. https://doi.org/10.3390/cryst10080709.

Rathore, Pushpendra S., Naveen G., Devanand Y., Shailendra S., Sanjay K. (2022). Thermal Performance of the Building Envelope Integrated with Phase Change Material for Thermal Energy Storage: An Updated Review. Sustainable Cities and Society, 79:e103690.

Rida, Mohamad, and Sabine, H. (2021). The Influence of Macro-Encapsulated PCM Panel's Geometry on Heat Transfer in a Ceiling Application. Advances in Building Energy Research, 16(4):445-465 https://doi.org/10.1080/17512549.2021.1965022.

Rubitherm. (2020). RT22HC Technical Parameters. www.rubitherm.com.

Santiago, E., Lima, P.R.L., Leite, M.B., Toledo F. (2009). Mechanical Behavior of Recycled Lightweight Concrete Using EVA Waste and CDW under Moderate Temperature. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2 (3):211–221. https://doi.org/10.1590/s1983-41952009000300001.

Shen, Y., Liu, S., Zeng, C., Zhang, Y., Li, Y., Han, X., Liu, Y., Yang, X. (2021). Experimental Thermal Study of a New PCM-Concrete Thermal Storage Block (PCM-CTSB). Construction and Building Materials 293:e123540. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123540.

The time of India. (2020). India Recycles Only 1% of Construction and Demolition Waste, Study Finds.

Wang, R., Qingjun, Z., Yang, L. (2022). Deterioration of Concrete under the Coupling Effects of Freeze – Thaw Cycles and Other Actions: A Review. Construction and Building Materials, 319:e126045. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126045.

Wang, Y., Wenzhuo, W., Dengjia, W., Yanfeng, L., Jiaping, L. (2021). Study on the Influence of Sample Size and Test Conditions on the Capillary Water Absorption Coefficient of Porous Building Materials. Journal of Building Engineering, 43(13):e103120. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103120.

Wang, Y., Meng, X., Juan, Z. (2023). Mechanical Properties and Damage Model of Modified Recycled Concrete under Freeze-Thaw Cycles. Journal of Building Engineering, 78:e107680.

Zhi, L., Lu, Y., Huang, R., Chang, J., Yu, X., Jiang, Yu, L., Roskilly, A. (2021). Applications and Technologi cal Challenges for Heat Recovery, Storage and Utilization with Latent Thermal Energy Storage. App lied Energy, 283:23. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARGAMASSAS AUTOCOMPACTÁVEIS PRODUZIDAS COM CINZAS VOLANTES, SÍLICA DE FUMO E ÓXIDO DE GRAFENO

Pedro Raposeiro da Silva[a,b]

[a] IPL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007, Lisboa, Portugal pedro.msilva@isel.pt

[b] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

RESUMO

O presente artigo tem como objectivo apresentar os resultados obtidos na campanha experimental para o estudo da verificação do desempenho de argamassas autocompactáveis produzidas com recurso a cinzas volantes, sílica de fumo e óxido de grafeno.

Para esse efeito, produziu-se um total de 9 amassaduras autocompactáveis organizadas em 3 grupos com 3 misturas cada, nomeadamente: 3 misturas só com cimento e óxido de grafeno, 3 misturas com cimento, cinzas volantes e óxido de grafeno e finalmente 3 misturas com cimento, sílica de fumo e óxido de grafeno. Em cada grupo, o óxido de grafeno variou entre 0%, 0,02% e 0,06%. No grupo de misturas com cinzas volantes, estas foram utilizadas em substituição volumétrica de 30% de cimento. No grupo de misturas com sílica de fumo, estas corresponderam a 10% da massa de cimento.

Da análise de resultados, foi possível observar uma redução da trabalhabilidade que é facilmente compensada pela correcção das quantidades de amassadura com a utilização, por exemplo, de um superplastificante. O contributo do óxido de grafeno foi mais significativo na resistência à compressão do que na resistência à flexão. Relativamente à durabilidade, verifica-se que existe alguma dispersão de resultados, não sendo possível, nesta fase e sem um estudo mais detalhado, retirar uma conclusão objectiva. No entanto, os resultados obtidos demonstram indicadores promissores no que respeita ao comportamento mecânico das misturas estudadas.

Palavras-chave: Argamassa autocompactável, Óxido de grafeno, Cinza volante, Sílica de fumo

1 INTRODUÇÃO

O óxido de grafeno (OG), emergiu como um nanomaterial promissor na área dos materiais de construção, principalmente na melhoria de desempenho das propriedades de materiais cimentícios, como a argamassas e betões. As propriedades estruturais e químicas únicas do OG permitem-lhe melhorar significativamente a resistência e a durabilidade das argamassas, dando resposta a algumas das desvantagens inerentes aos materiais cimentícios tradicionais (Shamsaei, et al., 2018).

Os principais atributos que definem a qualidade dos materiais de base cimentícia são a sua resistência e durabilidade. A argamassa deve suportar diversas acções, como a compressão e a tracção, mantendo a sua integridade ao longo do tempo. As argamassas tradicionais, no entanto, são frequentemente frágeis, com baixa resistência à tracção e elevada porosidade, o que pode comprometer as suas propriedades mecânicas e o seu temo de vida útil (Kim K. Y., et al, 2013). Foi demonstrado que a incorporação de GO em argamassas melhora significativamente essas propriedades mecânicas. O OG actua como agente de nucleação, promovendo a formação e distribuição uniforme de produtos de hidratação. Isto leva a uma microestrutura mais densa e a uma resistência à compressão e à tracção significativamente maior. Por exemplo, as argamassas modificadas com OG apresentam uma maior resistência à fissuração e uma melhor capacidade resistente, que são factores críticos para a sua durabilidade e tempo de vida útil (Czarnecki L., 2013).

A durabilidade das argamassas representa a sua capacidade de resistir a ataques ambientais e químicos, como por exemplo o do CO_2 e dos iões cloretos. A elevada superfície especifica e os grupos funcionais do OG aumentam a aderência da argamassa aos substratos e melhoram a sua durabilidade global (Bagheri A., et al., 2022). A natureza hidrofílica do OG pode melhorar a interacção com a matriz de cimento, levando a uma melhor dispersão. Isto resulta em argamassas menos porosas e mais resistentes à permeabilidade à água e aos gases, factores críticos para a sua durabilidade a longo prazo em ambientes agressivos. Além disso, o OG auxilia na redução da porosidade dos compósitos cimentícios a um nível micro/nano, o que aumenta ainda mais sua resistência a ataques químicos (Xu Y., et al., 2018).

Apesar dos resultados promissores, a aplicação do OG em larga escala em argamassas ou betões enfrenta ainda desafios económicos e tecnológicos (Chuah S., et al., 2014). A produção e dispersão do OG em escala comercial necessita ainda de ser optimizada. Além disso, a trabalhabilidade das argamassas modificadas com OG pode ser comprometida devido à sua elevada superfície especifica e à forte capacidade de absorção de água do OG, o que pode reduzir a fluidez da mistura de cimento (Shang, et al., 2015). Este problema pode ser mitigado através da utilização de aditivos redutores de água e superplastificantes, mas é necessária mais investigação para encontrar o equilíbrio ideal entre a potencial perda de trabalhabilidade e a melhoria de desempenho desejada.

Existe, portanto, um interesse significativo em verificar a viabilidade de produção de argamassas auto-compactáveis com a mistura de oxido de grafeno, de modo a oferecer à indústria um produto de elevado desempenho que dê resposta às actuais exigências dos materiais de construção e reabilitação e que, em simultâneo, possibilite diminuir o consumo de cimento.

As propriedades exclusivas do óxido de grafeno (OG), como a sua superfície rugosa, exercem uma influência positiva no comportamento mecânico da pasta de cimento. A utilização de pequenas quantidades de OG, a partir de apenas 0,05% da massa de cimento, pode resultar num aumento de 15 a 33% na resistência à compressão e de 41 a 59% na resistência à flexão, respectivamente (Hou P. et al., 2013). As excelentes características do óxido de grafeno proporcionam-lhe um futuro promissor quando combinado com cimento, criando um nanocompósito (Lv S. et al., 2013). O módulo de

elasticidade do OG é estimado em cerca de 1 TPa (Kuilla T. et al., 2010). Ele e Shi (2008) mencionam que a incorporação de OG na mistura de cimento melhorou a resistência à penetração de cloretos e ao transporte de iões. É também esperado que a adição de OG a argamassas de cimento aumente a resistência ao transporte de fluidos e à agressão de produtos químicos (Lv S. et al., 2013).

No que diz respeito à influência do OG nas propriedades das argamassas e pastas de cimento no estado fresco, é relevante destacar o estudo de Wang et al. (2015). Este estudo demonstrou que, com o aumento da dosagem de OG, a fluidez e o tempo de presa das pastas de cimento diminuíram, enquanto a viscosidade aumentou. Particularmente, com a adição de até 0,03% de OG, houve uma mudança significativa na fluidez, viscosidade e tempo de presa. Este comportamento indica que a adição de OG pode tornar as pastas de cimento mais espessas e acelerar o processo de hidratação do cimento. Segundo os autores (Wang et al., 2015), a diminuição da fluidez e o aumento da viscosidade podem ser atribuídos ao efeito das dimensões nanométricas e da superfície específica do OG. A elevada superfície específica combinada com grupos funcionais contendo oxigénio no OG pode contribuir para o aumento da interação com o cimento hidratado.

Lv et al. (2013) avaliaram o comportamento mecânico de argamassas com a adição de OG em proporções de 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% e 0,05% em relação à massa de cimento. Concluíram que a resistência à tração e flexão aumentaram com a dosagem de OG até 0,03%. No entanto, ao aumentar a dosagem de OG acima de 0,03%, observaram uma diminuição gradual dessas resistências. As resistências à tração e flexão com 0,03% de OG aos 28 dias de idade aumentaram 78,6% e 60,7%, respectivamente, em comparação com a mistura de referência (sem OG). A resistência à compressão aumentou até uma dosagem de 0,05% de OG, representando um aumento de 47,9% aos 28 dias em relação à mistura sem OG. Sun et al. (2020) também analisaram a resistência à flexão e compressão de argamassas com diferentes proporções de OG, mas obtiveram resultados significativamente inferiores aos relatados por Lv et al. (2013). Os autores relataram aumentos de 6,25% na resistência à flexão e 13,23% na resistência à compressão nas misturas optimizadas com OG em comparação à mistura de referência.

A incorporação de OG em argamassas tem apresentado resultados promissores no aumento da sua durabilidade. Wang et al. (2019) relataram que a adição de GO aumenta a resistência à compressão e reduz a permeabilidade, o que auxilia na protecção da argamassa contra a penetração de. Além disso, Devi S.S. e Khan R.A. (2020) salientam que, embora a melhoria de durabilidade seja evidente, a extensão dessas melhorias pode variar com base na dosagem de OG utilizada.

Nesse sentido, pretende-se, neste trabalho, através de uma extensa campanha experimental, validar a viabilidade de utilizar óxido de grafeno como adição para melhorar o desempenho de argamassas auto-compactáveis relativamente ao comportamento no estado fresco, mecânico e de durabilidade com recurso aos seguintes ensaios de caracterização: espalhamento no mini-cone, escoamento no mini-funil-V, resistência à compressão e à flexão, absorção de água por capilaridade, resistividade eléctrica, e determinação da retracção.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

- Cimento e adições: um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1 (Portland tipo I 52,5 R, com massa volúmica de 3200 kg/m^3); cinza volante (CV) de acordo com as NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2300 kg/m^3; sílica de fumo (SF) de acordo com a NP EN 13263-1, com uma massa volúmica de 2010 kg/m^3; a superfície especifica do C, da CV e da SF foram de 325, 430 e 15.000 m^2/kg, respectivamente.
- Agregados: duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620, uma areia grossa$_{(0/4)}$ com massa volúmica de 2550 kg/m^3, módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina$_{(0/1)}$ com massa volúmica de 2580 kg/m^3, módulo de finura de 2,03 e absorção de água de 0,70%.
- água e adjuvantes: água da rede pública de acordo com a NP EN 1008; um superplastificante (S_p) de elevado desempenho, forte redutor de água, de acordo com as NP EN 934-1 e NP EN 934-2 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1,07 kg/m^3).
- Óxido de grafeno: óxido de grafeno fornecido pela *Sigma-Aldrich*, com uma dispersão em água de 4 mg/ml.

2.2 QUANTIDADES DE AMASSADURA

As quantidades de amassadura apresentadas no Quadro 1 foram calculadas seguindo o método descrito por Nepomuceno et al. (2012). Verifica-se que foram preparadas 9 misturas: 3 contendo apenas C e OG, 3 com C, CV e OG, e outras 3 com C, SF e OG, de acordo com a seguinte nomenclatura:

C0 = 100%C | **CV0** = 70%C + 30%CV | **SF0** = 100%C + 10%SF
C2 = 100%C + 0,02%OG | **CV2** = 70%C + 30%CV + 0,02%OG | **SF2** = 100%C + 10%SF + 0,02%OG
C3 = 100%C + 0,06%OG | **CV6** = 70%C + 30%CV + 0,06%OG | **SF6** = 100%C + 10%SF + 0,06%OG

O OG foi calculado em relação à massa de cimento e a respectiva água de diluição foi subtraída à água de amassadura (os valores de água e de OG apresentados no Quadro 1 são os efectivos). A SF foi calculada em acréscimo do cimento correspondendo a 10% do seu volume. A CV foi calculada em substituição do cimento correspondendo a 30% do seu volume.

Quadro 1 – Quantidades de amassadura

Quantidades de amassadura [kg/m^3]		C	CV	SF	S_p	A	AF $_{0/1}$	AG $_{0/4}$	OG [mg/m^3]	A/C	A/MC
Cimento	**C0**	350	---	---	5,9	270	761	758	---	0,770	0,770
	C2		---	---	6,4				122,5		
	C6		---	---	6,4				367,5		
cimento +cinzas volantes	**CV0**	245	53	---	5,4	282	759	756	---	1,150	0,950
	CV2			---	5,9		758	755	85,8		
	CV6			---	5,9		758	755	257,3		
cimento +silica de fumo	**SF0**	350	---	22	7,5	287	722	720	---	0,820	0,772
	SF2		---		7,5				122,5		
	SF6		---		7,5				367,5		

C=cimento; CV=cinzas volantes; SF=sílica de fumo; A=água; AF=areia fina; AG=areia grossa; MC=material cimenticio

2.3 ENSAIOS E PREPARAÇÃO DE PROVETES

O ensaio de espalhamento no mini-cone para a determinação do diâmetro médio de espalhamento (D_m) expresso através da área de espalhamento relativa (G_m) foi realizado utilizando o método proposto por Okamura et al. (2000).

O ensaio de escoamento no mini-funil-V para a determinação do tempo de escoamento (t) expresso através da velocidade relativa de escoamento (R_m) foi realizado utilizando o método desenvolvido por Okamura et al. (2000).

Os ensaios de compressão e de flexão foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 1015-11, aos 7, 28 e 91 dias de idade, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x40 mm por cada mistura e idade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base no procedimento descrito na EN 13057, aos 28 e 91 dias de idade, durante 72 horas de ensaio, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x40 mm.

O ensaio de resistividade eléctrica foi realizado com base num procedimento interno do laboratório de materiais de construção do ISEL, nos 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x40 mm da resistência à flexão/compressão por cada mistura e aos 28 e 91 dias de idade.

A determinação da retracção foi realizada de acordo com a especificação LNEC E398 em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x40 mm tendo iniciado logo após a desmoldagem (24+/-1 hora) e decorrido até aos 120 dias de idade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS NO ESTADO FRESCO

São apresentados, na Figura 1, os resultados no estado fresco, nomeadamente: espalhamento no mini-cone (D_m), área de espalhamento relativa (G_m), tempo de escoamento no mini-funil (t) e velocidade relativa de escoamento (R_m).

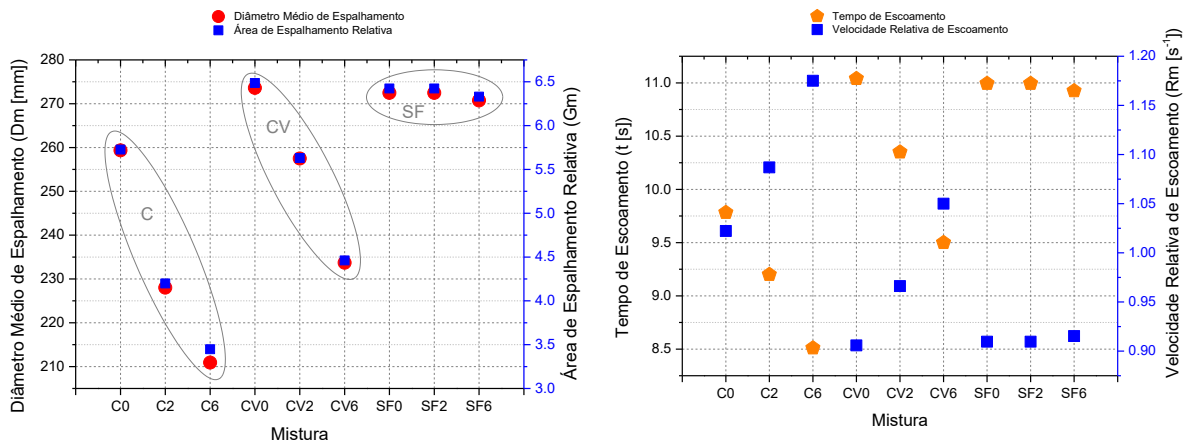


Figura 1 – Espalhamento no mini-cone (esq) e escoamento no mini-funil V (dta)

Os resultados apresentados relativamente ao mini-cone permitem essencialmente avaliar o diâmetro de espalhamento das AAC. É possível observar que, os resultados obtidos por todas as misturas podem

ser considerados satisfatórios, variando entre 210 e 275 mm. Em geral, foi possível constatar uma boa distribuição do agregado, sendo de notar a não ocorrência de exsudação nem de segregação.

A influência do OG no espalhamento é significativa, resultando numa perda de trabalhabilidade entre 12% e 19% nas misturas com 100%C e entre 5% e 15% nas misturas com 70%C+30%CV. Este comportamento pode ser atribuído à elevada superfície específica do OG, que ao ser adicionado às argamassas, pode causar a aglomeração das partículas de cimento, promovendo a formação de flóculos que, consequentemente, reduzem a trabalhabilidade das misturas (Lv S. et al., 2013; Wang Q. et al., 2015). Em contraste, nas misturas com SF, a perda de trabalhabilidade é mínima (< 1%). Neste caso, a maior superfície específica da SF pode desempenhar um papel crucial na manutenção da trabalhabilidade, superando e/ou anulando o efeito do OG.

Os valores médios ilustrados na figura 1, referentes ao tempo de escoamento no mini funil V, permitem avaliar a aptidão das AAC para passar por pequenas aberturas. A partir dos resultados observados, verifica-se que os valores médios de todas as misturas estudadas se classificam como auto-compactáveis, variando geralmente entre 8,5 e 11 segundos.

Pode-se concluir, com base na análise conjunta dos dois ensaios (mini-cone e mini-funil), que todas as misturas analisadas apresentam coesão e um aspeto viscoso, sem comprometer a sua capacidade de deformação.

3.2 RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Compressão e flexão

Os resultados da resistência à compressão e à flexão estão apresentados na Figura 2. Os dados indicam um aumento significativo nas resistências tanto à compressão quanto à flexão. A inclusão de OG eleva a resistência à compressão, aos 28 dias, entre 20 a 24% e a resistência à flexão entre 3 a 10%, nas misturas com 100%C. Para as misturas com 70%C+30%CV, o aumento observado é de 16 a 21% na resistência à compressão e de 13 a 20% na resistência à flexão. No entanto, nas misturas contendo SF, o incremento de resistência aos 28 dias é mais modesto, não excedendo 5% na compressão e 2% na flexão. O referido aumento da resistência das argamassas com a adição do OG ao C e às CV pode ser atribuído à forte interligação entre o OG e a matriz cimenticia (Pan Z. et al., 2015).

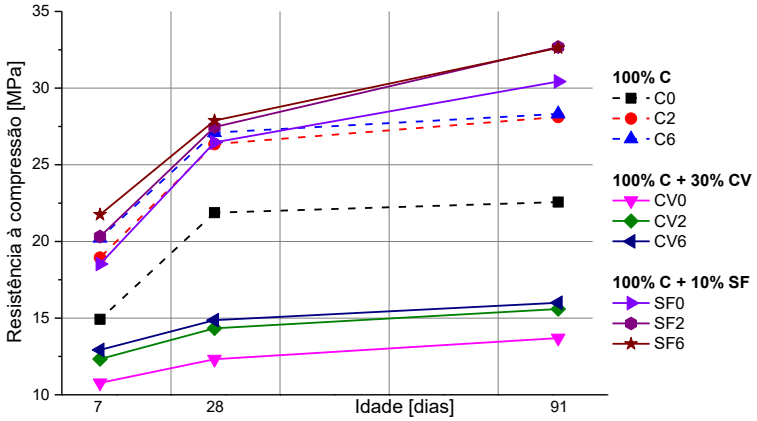


Figura 2 – Variação da resistência à compressão com a idade

No geral, verificam-se valores mais significativo de resistência nas misturas com SF do que nas restantes misturas, apesar das diferenças na razão A/C entre as 3 famílias de AAC, possivelmente devido ao efeito da SF no processo de endurecimento e evolução da resistência das argamassas.

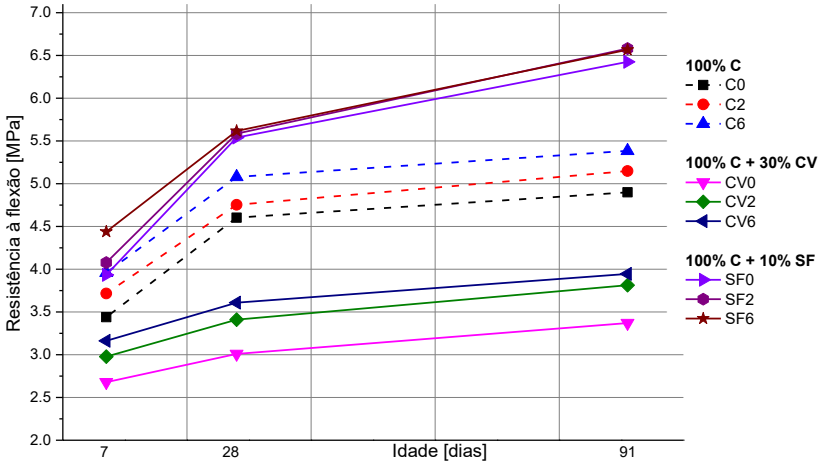


Figura 3 – Variação da resistência à flexão com a idade

3.2.2 Resistividade Eléctrica

Apresentam-se, na Figura 4, os valores médios de resistividade eléctrica (RE) para as idades estudadas (28 e 91 dias). Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que, de acordo com o espectável, a RE aumenta com a idade de ensaio para todas as misturas. No entanto, observa-se que a referida variação é mais significativa nas misturas sem OG com aumentos de 54% para a C0, 89% no CV0 e 97% com a SF. Nas restantes misturas observa-se que o aumento de RE é ligeiramente superior nas misturas com 0,02% de OG e que os valores mais notórios correspondem às misturas com SF e só com C. analisando as misturas individualmente conclui-se que a adição de OG provoca, no geral, uma diminuição da RE que se torna mais acentuada aos 91 dias de idade.

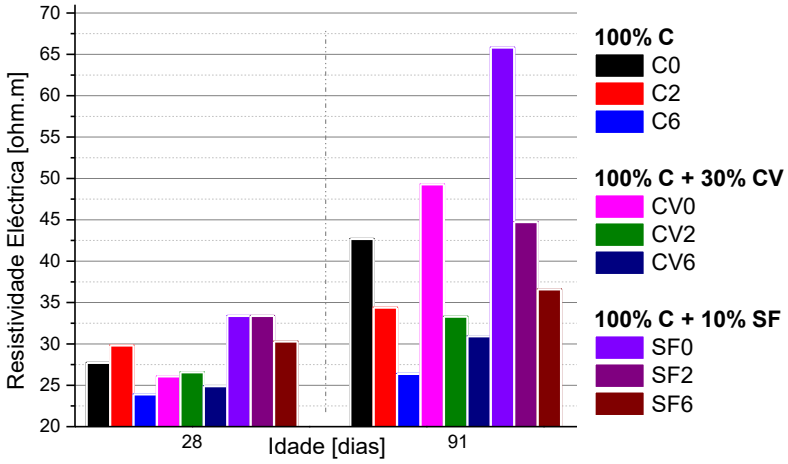


Figura 4 – Resistividade eléctrica aos 28 e 91 dias para todas as misturas

Os resultados observados no presente trabalho encontram-se de acordo com o reportado por outros autores. Por exemplo, Bhatrola K. ET AL. (2023), no seu estudo sobre o comportamento mecânico e a RE de argamassas produzidas com OG, apresentam variações de RE com a adição de OG semelhantes, ou seja, a RE aumenta gradualmente com a idade e as misturas sem OG apresentaram melhores resultados, no entanto, com o aumento do teor de OG a RE diminuiu. Os autores sugerem que os referidos efeitos podem estar associados à formação de mais C-S-H e C-H nas misturas de referência o que pode contribuir para a melhoria da sua RE por comparação com as restantes.

3.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

Nas Figuras 6 e 7, são exibidos os valores de absorção de água por capilaridade e os respectivos coeficientes de absorção aos 28 e 91 dias de idade. Em relação a este mecanismo de transporte, observa-se um comportamento consideravelmente distinto daquele verificado na resistência mecânica. Nas misturas com C, nota-se que a C2 apresenta um desempenho mais favorável comparado às demais, enquanto a C6 apresentou valores de absorção superiores aos da mistura de referência. Esta tendência manteve-se constante nas duas idades analisadas (28 e 91 dias). No caso das misturas com SF, verifica-se um desempenho inferior em comparação com as outras propriedades.

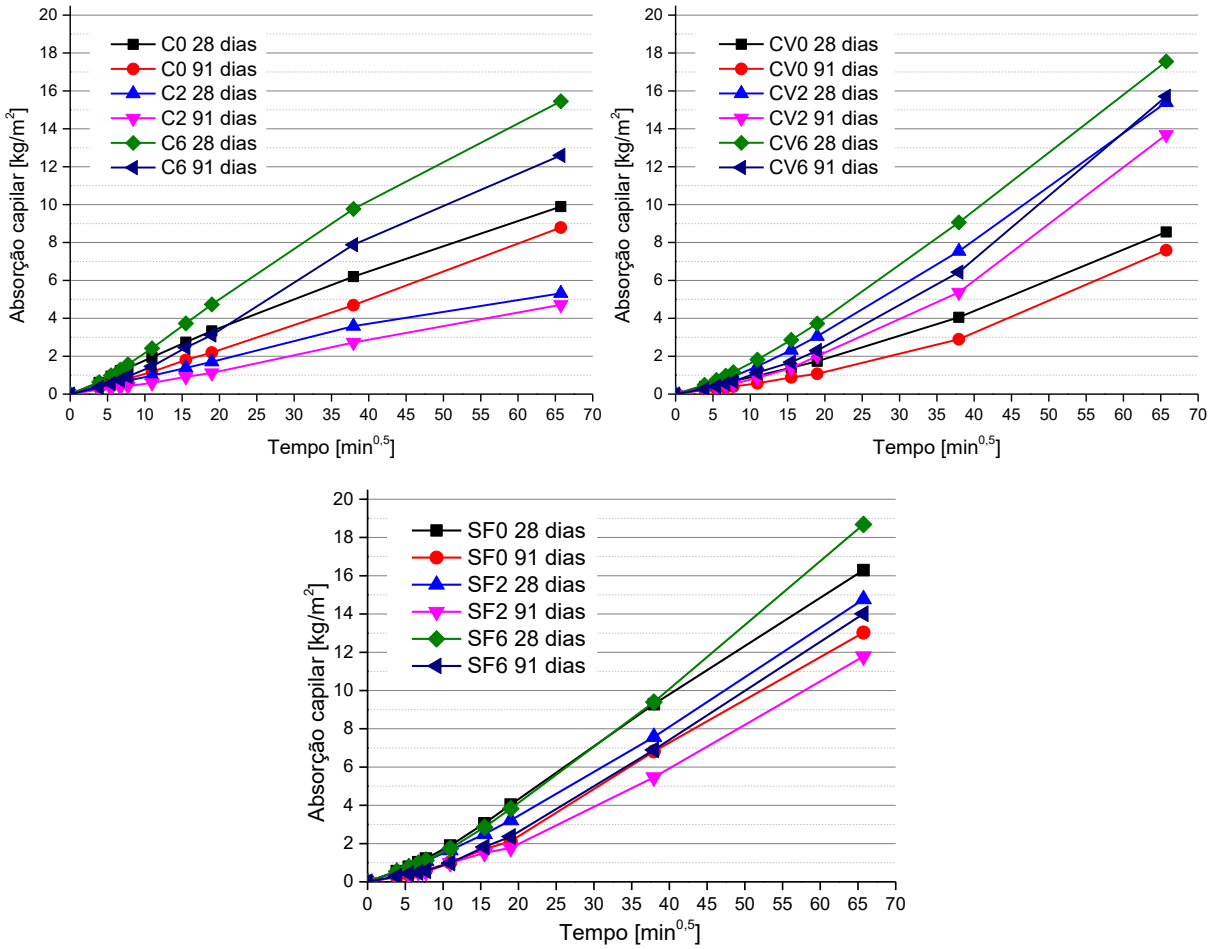


Figura 6 – Absorção capilar aos 28 e 91 dias para todas as misturas

Nas misturas com 70%C+30%CV, observa-se um comportamento diferente: a adição de OG não trouxe qualquer benefício na absorção de água por capilaridade nas duas idades estudadas. Nessas misturas, com o aumento de OG, verificou-se um aumento tanto na absorção quanto no respectivo coeficiente. Contudo, como seria de esperar, o desempenho global das misturas melhora com a idade.

Nas misturas com SF, a adição de 0,02% de OG resultou numa diminuição da absorção capilar quando comparada com as adições de 0% e 0,06%. Estes resultados estão em concordância com os observados por outros pesquisadores. Lv S. et al. (2013) relatam que a adição de OG aumenta a quantidade de pequenos poros na matriz cimentícia, elevando significativamente a quantidade de poros com dimensões inferiores a 15 nm. Outros estudos (Lv S. et al., 2013a; Panzavolta S. et al., 2014) indicam que a adição de OG pode levar a um aumento na fracção de poros capilares na faixa de 100 a 1000 nm.

As variações nos valores apresentados estão claramente associadas às diferenças no tipo de OG, bem como às diferentes dosagens estudadas por estes autores.

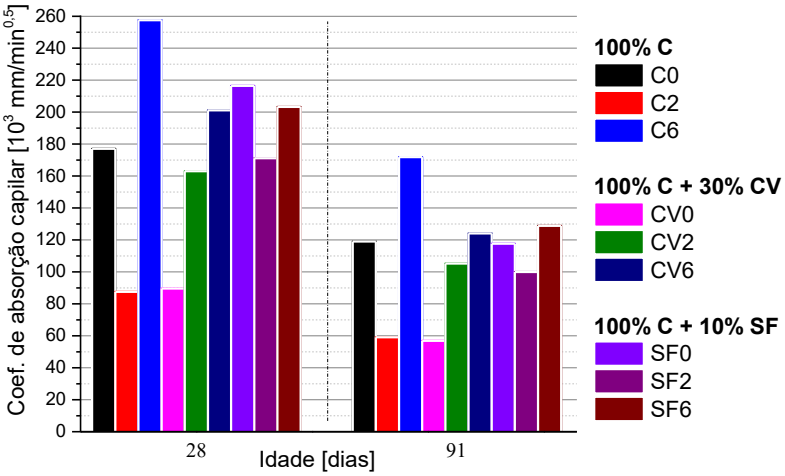


Figura 7 – Coeficientes de absorção capilar aos 28 e 91 dias para todas as misturas

3.2.4 Retracção

Na Figura 8 encontram-se representadas as curvas de variação da retracção ao longo do tempo (120 dias) para todas as misturas estudadas.

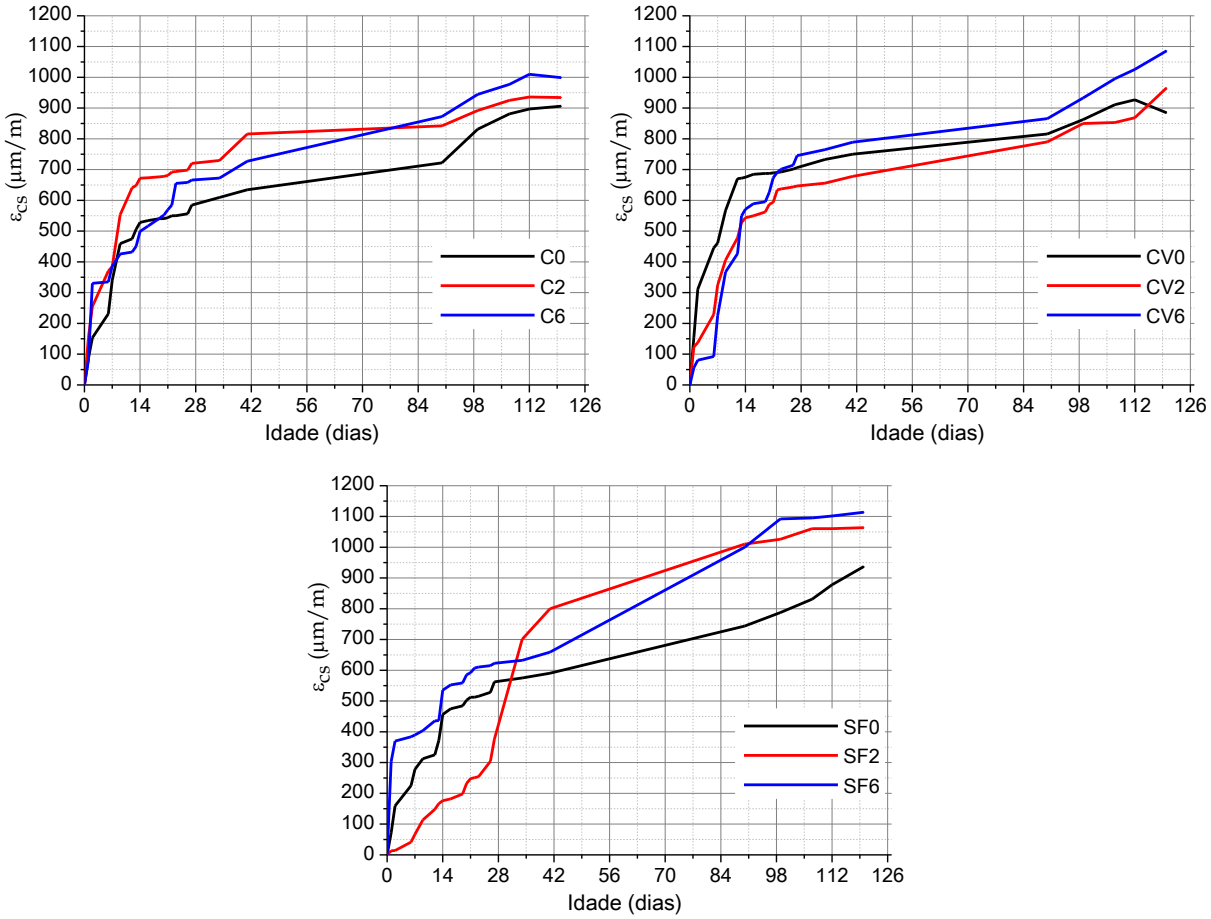


Figura 8 – retracção total para todas as misturas

Com a análise da figura verifica-se que a retracção total aumenta com a adição de OG. o referido aumento representa entre 3 e 10% nas misturas 100%C, 9 a 22% nas misturas com CV e 13 a 18% nas de SF. No geral, a variação da retracção total entre as 3 famílias estudadas é mínima com um valor total aos 120 dias de 946 μm para as misturas 100%C, 978 μm nas misturas com CV e 1038 μm nas de SF.

Observando a Figura 8 verifica-se que o OG apresenta uma maior influencia na retracção total nas primeiras idades de ensaio, claramente com valores mais acentuados de variação até aos 28 dias. Posteriormente, a taxa de aumento da deformação por retracção das argamassas estudadas diminui.

Aos 120 dias verifica-se que a referida taxa de crescimento diminui significativamente. As misturas com 0,02% de OG são as que representam uma menor influencia na retracção total e a sua variação em relação à mistura de referência varia entre 3 e 13%.

Os resultados apresentados no presente trabalho estão de acordo com o observado por outros autores, nomeadamente, Chen Z. et al. (2020) que apresentam variações semelhantes. Os autores referem o aumento do grau de hidratação provocado pela adição de OG pode reduzir o volume total de pasta e, como consequência, aumentar a tensão de retracção das argamassas.

4 CONCLUSÕES

A utilização do OG permitiu a produção de ACC com um desempenho satisfatório no estado fresco, apesar de ter havido alguma perda de trabalhabilidade, a qual foi compensada pelo ajuste nas dosagens de superplastificante. Esta diminuição de desempenho aconteceu principalmente devido à elevada superfície específica das partículas de OG, que tende a dificultar a dispersão das partículas de cimento, limitando assim o seu escoamento.

A incorporação de OG aumentou de forma significativa o desempenho mecânico de todas as misturas analisadas. Aos 28 dias, observou-se um aumento de 23% na resistência à compressão na mistura com C e 0,06% de OG, e de 20% na mistura com CV e 0,06% de OG, comparando com as misturas de referência. Esta melhoria generalizada no comportamento mecânico de todas as misturas está intimamente ligada à melhor interligação entre o OG e a matriz cimentícia, assim como ao seu papel no processo de hidratação do cimento, actuando como um catalisador na reacção. Para as misturas com SF, verificou-se um aumento geral da resistência mecânica em todas as composições, embora o efeito do OG tenha sido menos pronunciado, com uma variação de aproximadamente 7% em relação à mistura de referência. No geral verifica-se que a melhoria do desempenho mecânico das misturas com a adição de OG está fortemente relacionado com a melhoria da microestrutura devido ao efeito regulador de OG, acelerando o processo de hidratação, regulando os cristais de hidratação, optimizando a estrutura dos poros e melhorando a interface de ligação da matriz cimenticia.

Relativamente à absorção de água por capilaridade, o comportamento observado é diferente do desempenho mecânico. Nas misturas com 100% de C, houve uma melhoria com a adição de 0,02% de OG, mas esta melhoria desaparece quando a quantidade de OG é aumentada para 0,06%. Nas misturas binárias, a adição de OG resultou numa perda geral de desempenho. Embora as propriedades do OG tenham uma influência significativa no desempenho das misturas, vários estudos indicam que a adição de OG tende a aumentar a quantidade de poros capilares.

No caso da RE e da retracção foi possível observar que as misturas com OG apresentam no geral desempenhos inferiores quando comparados com as misturas de referência. Por um lado, os referidos efeitos podem estar associados à formação de mais C-S-H e C-H nas misturas de referência o que pode

contribuir para a melhoria da sua RE e por outro o grau de hidratação provocado pela adição de OG pode reduzir o volume total de pasta e, como consequência, aumentar a tensão de retracção das argamassas.

Em suma, a incorporação de OG na produção de argamassas proporciona melhorias significativas, especialmente no desempenho mecânico. Embora existam ainda desafios relacionados com a viabilidade económica e técnica, a investigação contínua e os avanços tecnológicos deverão facilitar a adoção generalizada de argamassas com OG na indústria da construção, promovendo práticas de construção mais duráveis, eficientes e sustentáveis. Contudo, será crucial realizar mais estudos para avaliar a influência da adição de OG na durabilidade das misturas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio do IPL através do financiamento do projecto de investigação científica "LOWCO2MPOSITES - Durable environmental-friendly cement composites using very low binder contents (IPL/2022/ LOWCO2MP_ISEL)". Agradece-se igualmente o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Bagheri, A. (2022). Graphene oxide-incorporated cementitious composites: a thorough investigation, Mater. Adv., 3, 9040. https://doi.org/10.1039/D2MA00169A

Bhatrola K., Maurya S.K., Kaur R., Kothiyal N.C. (2023). Mechanical and electrical resistivity performance of Pozzolana Portland cement mortar admixed graphene oxide, Materials today: Proceedings, 78, 830-8. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.414

Chen Z., Xu Y., Hua J., Wang X., Huang L. and Zhou X. (2020). Mechanical Properties and Shrinkage Behavior of Concrete-Containing Graphene-Oxide Nanosheets, materials, 13, 590. https://www.mdpi.com/1996-1944/13/3/590

Chuah S., et al. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide (Review), Constr. Build. Mater., 73, 113-124. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040

Czarnecki, L. (2013). Sustainable concrete; is nanotechnology the future of concrete polymer composites?, Adv. Mater. Res., 687, 3‑11. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.3

Devi, S.S. and Khan, R.A., (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete, Journal of Building Engineering, volume 27. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101007

He, X., & Shi, X. (2008). Chloride Permeability and Microstructure of Portland Cement Mortars Incorporating Nanomaterials, Transportation Research Record, 2070(1), 13-21. https://doi.org/10.3141/2070-03

Hou P. et al. (2013). Modification effects of colloidal nanoSiO2 on cement hydration and its gel property, Compos Part B: Eng, 45(1), 440–8. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.056

Kim, K.Y.; Yun, T.S.; Park, K.P. (2013). Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography, Cem. Concr. Res., 50, 34‑40. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.020

Kuilla T., Bhadra S., Yao D., Kim N.H., Bose S., Lee J.H. (2010). Recent advances in grapheme-based polymer composites, Prog Polym Sci,35(11), 1350–75. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005

Lv S., Ma Y., Qiu C., Zhou Q. (2013a). Regulation of go on cement hydration crystals and its toughening effect. Mag Concr Res, 65:1246–54. https://doi.org/10.1680/macr.13.00190

Lv S., Ma Y., Qiu Ch., Liu J., Sun T., Zhou Q., (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites, Constr. Build. Mater., 49, 121–7. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022

Lv, S. H., Deng, L. J., Yang, W. Q., Zhou, Q. F., & Cui, Y. Y., (2016). Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites, Cement & Concrete Composites, 66, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.007

Nepomuceno, M., Oliveira, L., Lopes, S.M.R. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, Constr. Build. Mater., 26, 317–326. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027

Okamura h., Ozawa K, Ouchi M. (2000). Self-Compacting Concrete, Structural Concrete Journal, Thomas Telford Ltd, vol. 1, No. 1, pp. 3-17. https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/stco.2000.1.1.3

Pan Z., He L., Qiu L., Korayem A. H., Li G., Zhu J. W., Collins F., Li D., Duan W. H., Wang M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite, Cement & Concrete Composites 58, 140–147. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001

Panzavolta S., Bracci B., Gualandi C., Focarete M.L., Treossi E., Kouroupis-Agalou K., et al. (2014). Structural reinforcement and failure analysis in composite nanofibers of graphene oxide and gelatin. Carbon,78:566–77. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.040

Shamsaei, et al. (2018). Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review, Constr. Build. Mater., 183, 642–660. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.201

Shang, et al. (2015). Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes, Constr. Build. Mater., 96, 20–28. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.181

Sun, H., Ling, L., Ren, Z., Memon, S. A., & Xing, F. (2020). Effect of graphene oxide/graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation, Nanomaterials, 10(1), 113. https://doi.org/10.3390/nano10010113

Wang Y., et al. (2019). Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties of Cement Mortar and its Strengthening Mechanism, Materials, 12(22), 3753. https://doi.org/10.3390/ma12223753

Wang, Q., Wang, J., Lu, C. X., Liu, B. W., Zhang, K., & Li, C. Z., (2015). Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement, New Carbon Materials, 30(4), 349–356. https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60194-9

Xu Y., et al. (2018). A holistic review of cement composites reinforced with graphene oxide, Constr. Build. Mater., 171 , 291 —302. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.147

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ENVELHECIMENTO NATURAL DE REVESTIMENTOS DE COR ESCURA COM NANOMATERIAIS PARA ETICS

Bruno Santos[a]; Rita Carvalho Veloso[b,c]; Andrea R. Souza[b]; Joana Maia[b]; Daniela Silva[a]; João Ventura[c]; Nuno M. M. Ramos[b]

[a]Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201909855@up.pt, up202106385@edu.fe.up.pt

[b]CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, joanamaia@fe.up.pt, up201001431@edu.fe.up.pt, andrea.souza@fe.up.pt, nmmr@fe.up.pt

[c]IFIMUP, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal, up201001431@edu.fe.up.pt, joventur@fc.up.pt

RESUMO

Diversas metas estabelecidas em diretivas da União Europeia resultam na promoção do uso de materiais e sistemas com melhor desempenho térmico, como o Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS), oferecendo diversos benefícios. Contudo, a aplicação de cores escuras intensifica as tensões térmicas, resultando em fissuras e degradação precoce. Uma solução para mitigar este efeito é a inclusão de nanomateriais funcionais nos revestimentos de fachadas, permitindo um aumento da reflexão da radiação solar na região do infravermelho próximo (NIR), sem alteração sensível da cor pretendida.

No presente trabalho, investigou-se a durabilidade de revestimentos escuros para ETICS modificados com nanomateriais de refletância melhorada, por exposição natural, quanto às suas propriedades óticas. Para tal, construiu-se um protótipo, na cidade do Porto, com aplicação de ETICS e revestimentos orgânicos contendo diferentes formulações de nanomateriais.

Após um mês de exposição, os resultados mostraram que o tipo de nanopartícula influencia significativamente a manutenibilidade das propriedades do revestimento, assim como as propriedades estéticas, com o nanocompósito desenvolvido a contribuir para uma menor alteração das propriedades óticas, apontando a uma maior durabilidade. Embora a curta duração da exposição tenha revelado variações nas propriedades óticas inicialmente medidas, não foram observadas fissuras ou manchas nos revestimentos.

Palavras-chave: Durabilidade, ETICS, Nanomateriais, Fachadas, Revestimentos

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção é um dos que mais impacta o ambiente de forma negativa, devido à emissão de gases de efeito de estufa (UN, 2021). Por esse motivo, a União Europeia, com o Acordo de Paris, impôs regras e medidas a serem tomadas visando a neutralidade carbónica até 2050, para a qual contribuem materiais e sistemas com melhor desempenho térmico e, consequentemente, contribuindo para a descarbonização dos edifícios. Uma das soluções mais utilizadas é o Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior – ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*). Comparado a outros sistemas de isolamento para fachadas, o ETICS apresenta aspetos melhorados tanto a nível térmico, acústico como de condensações internas, corrigindo pontes térmicas, e cumprindo eficazmente os requisitos (Borsoi et al., 2017).

Observa-se um grande interesse e procura na aplicação de cores escuras em ETICS, tanto por razões estéticas como para esconder os efeitos da poluição atmosférica (Ramos et al., 2021a). Existem vários estudos sobre ETICS, principalmente com foco na análise do desempenho higrotérmico, na correção de pontes térmicas e riscos de condensações. No entanto, estes sistemas sofrem flutuações térmicas superfíciais significativas (ampliadas pela aplicação de cores escuras), causado variações dimensionais e, naturalmente, fissuração (Daniotti et al., 2013; Shen et al., 2011; Yuan et al., 2022). A presença de cores escuras na camada de acabamento resulta numa maior absorção da radiação solar, o que intensifica as tensões térmicas (Veloso et al., 2023). Xiong et al. (2018) identificou que estas fissuras têm origem nuam acumulação de calor à superfície quando exposta à radiação solar, resultando em tensões termo-induzidas e fenómenos de expansão-contração, associados às diferenças abruptas de temperatura e humidade (Marčiukaitis, 2012; Pereira et al., 2018). Estas oscilações térmicas experimentais conduzem a deformações estruturais, atingindo o painel isolante, facilitando a penetração de água no sistema e, consequentemente, resultando numa degradação prematura de todo o sistema ETICS, comprometendo a sua durabilidade e vida útil (Kvande et al., 2018).

É importante realçar que o sistema, por ser multicamada, não apresenta a mesma vulnerabilidade à exposição solar, devendo o foco ser dirigido para os revestimentos de acabamento, que por serem delgados, são particularmente sensíveis às variações térmicas (especialmente com cores escuras). Assim, a incorporação de materiais funcionais, como os nanomateriais com melhoria da refletância solar, podem contribuir para a diminuição da temperatura superficial, auxiliando no desempenho energético do edifício (Akbari et al., 2005), e principalmente para melhorar durabilidade destes sistemas (Ramos et al., 2021b).

A exposição dos ETICS aos agentes atmosféricos, principalmente dos revestimentos, conduz a degradação significativa com o tempo, a qual prejudica o desempenho do sistema de isolamento térmico (Kumar et al., 2022). Estudos como o de Paolini et al. (2014) e Saafi and Daouas (2018) demonstram que os revestimentos podem ter a sua refletância reduzida até 80% do valor original durante os primeiros anos de exposição. Contudo, o uso de nanomateriais refletantes pode auxiliar na manutenibilidade da refletância ao longo do tempo (Coser et al., 2015; Ramos et al., 2020; Revel et al., 2014). No entanto, é imperativo avaliar o comportamento a longo prazo do uso dos nanomateriais, visto que o seu desempenho está relacionado com o tipo de nanocompósito (Veloso et al., 2021), condição de exposição do revestimento (cobertura, fachada, presença ou não de proteções solares como palas), da cor do revestimento, entre outros fatores ambientais como poluição ou ambientes marinhos (Dornelles et al., 2015; Parracha et al., 2022; Takebayashi et al., 2016).

Deste modo, este estudo propõe avaliar a durabilidade, por exposição natural, de revestimentos de cor escura para ETICS, modificados com nanomateriais com refletância melhorada. Para tal, foi

construído um protótipo na cidade do Porto, à escala real, com aplicação de um sistema comercial ETICS, com poliestireno expandido (EPS), e revestido com um acabamento orgânico incorporando diferentes formulações de nanomateriais com potencial de refletância melhorada. Este trabalho focou-se na avaliação das propriedades termo-óticas dos revestimentos e consequente observação da degradação derivada da exposição natural. A aplicação destes revestimentos em condições de exposição e escala reais permitirá dar contributos para redesenhar sistemas construtivos de fachada e identificar os desafios do uso destes nanomateriais em larga escala, e em condições distintas de exposição climática.

Este trabalho desenvolve-se no âmbito do projeto NIRWal e surge no seguimento de projetos de investigação e doutoramento, nos quais foram desenvolvidos e testados os processos de obtenção e incorporação dos nanomateriais, em laboratório, garantindo as condições de aplicabilidade em sistemas ETICS com base nos requisitos da EOTA (2019).

2 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 ENQUADRAMENTO

Como contributo para a mitigação dos efeitos adversos do uso de cores escuras em revestimentos de fachadas com ETICS, foi desenvolvida uma estratégia de redução da absorção de radiação solar na região do infravermelho, que assenta na inclusão de nanomateriais refletantes na base dos revestimentos, como é o caso de um nanocompósito polimérico vocacionado para colorantes escuros.

Apresenta-se na Figura 1, o fluxograma de investigação, desde o desenvolvimento das formulações com nanomateriais, caracterização laboratorial e avaliação da durabilidade.

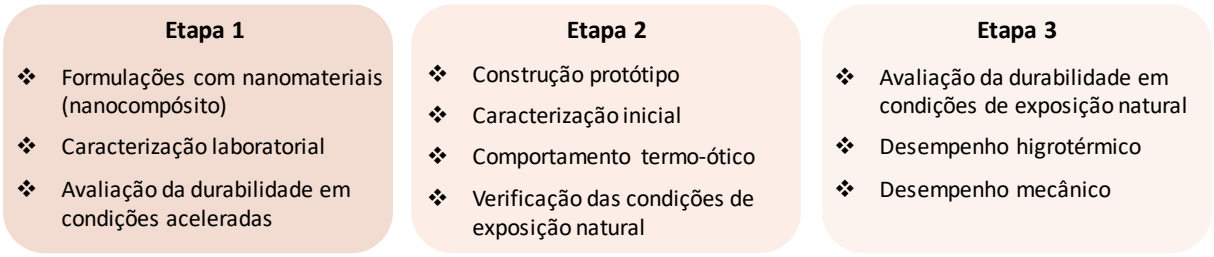


Figura 1 – Fluxograma de investigação

A Etapa 1 decorreu no âmbito do projeto de investigação EnReflect e de uma tese de Doutoramento em Engenharia Civil-FEUP (2019-2023), onde foi feito todo o desenvolvimento e caracterização laboratorial das formulações com nanomateriais, incluindo um nanocompósito (com óxido de cobre e dióxido de titânio), tendo sido possível demonstrar o seu contributo no aumento da refletância na região do infravermelho próximo em revestimentos escuros. A Etapa 2, consiste em parte no presente trabalho, compreende a construção e aplicação à escala real das formulações em estudo e de uma caracterização inicial das propriedades termo-óticas. A Etapa 3 consiste nos restantes trabalhos em curso e futuros de avaliação do desempenho higrotérmico e mecânico, a decorrer até ao final de 2024.

2.2 MATERIAIS E SISTEMAS EM ESTUDO

2.2.1 Composição dos materiais e sistemas

O estudo focou-se na avaliação de desempenho de um sistema ETICS, aplicado sobre um suporte leve de OSB, seguindo as recomendações definidas pela ETA 22/0327 (Itecons, 2022) e constituído pelas camadas ilustradas na Figura 2: (1) placa de OSB de 22mm de espessura, (2) argamassa de colagem (base cimenticia), (3) isolamento térmico EPS 100 com 4 cm de espessura, (4-5) argamassa de barramento (base cimentícia) em duas camadas, reforçada com rede de fibra de vidro e (6) revestimento de acabamento final (base orgânica) (Weber, 2023), com e sem colorante modificado.

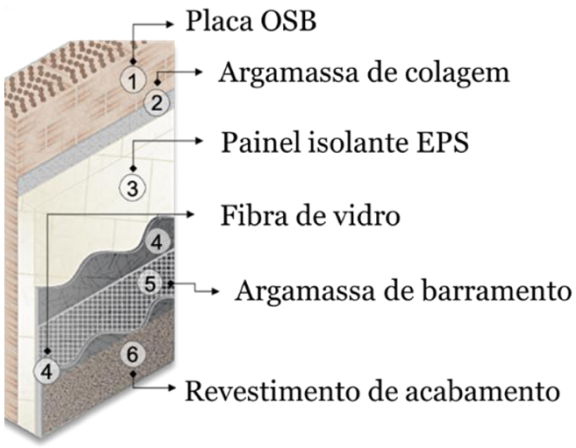


Figura 2 – Descrição da composição do sistema ETICS

Os sistemas em estudos apresentaram a mesma configuração de 1-5, diferindo apenas no revestimento de acabamento, no qual foi usado um colorante para conferir a cor escura e onde se incorporaram os nanomateriais. Cada uma das composições estudadas é apresentada no Quadro 1, sendo indicando o tipo de nanomateriais utilizado, a quantidade de polímero utilizado, na dispersão prévia das nanopartículas, em relação ao colorante, e a quantidade de colorante em relação à argamassa de revestimento.

Quadro 1 – Composição das amostras aplicadas ao revestimento

Amostra	Nanomaterial	%p/p de polímero em relação ao colorante	%p/p de colorante em relação à base de acabamento
Standard	-	-	6%
F1	TiO_2 30 nm	8%	6%
F2	CuO/TiO_2	8%	6%
F3	SiO_2 µm	-	6%

A amostra de referência (standard) apresenta apenas o colorante escuro. As amostras F1 e F3 apresentam na sua composição nanopartículas comerciais de dióxido de titânio e dióxido de silício, respetivamente. A amostra F2 tem a inclusão do nanocompósito (CuO/TiO_2) desenvolvido na Etapa 1 (Figura 1). O mesmo foi sintetizado em laboratório no Instituto de Física dos Materiais da Universidade do Porto, é composto por dois tipos de nanomateriais distintos, óxido de cobre (II) (CuO) e dióxido de

titânio (TiO_2), adaptando o procedimento descrito em (Nguyen et al., 2013). O colorante usado é uma dispersão comercial à base de óxido de ferro (II, III) com índice cor PBk11 e 48% teor de pigmento, à base de água com propilenoglicol como co-solvente.

Salienta-se que a incorporação do SiO_2 (F3) foi realizada diretamente no colorante, enquanto que para a incorporação do TiO_2 (F1) e do nanocompósito CuO/TiO_2 (F2) foi necessário fazer previamente a mistura num polímero, de modo a garantir uma boa dispersão no colorante escuro.

2.2.2 Caso de estudo – protótipo

Para a análise da aplicabilidade e durabilidade das soluções (Etapa 2 - Figura 1) foi construído um protótipo (Figura 3) com o sistema apresentado na Figura 2. Sendo que em cada orientação de fachada foram aplicadas as composições apresentadas no Quadro 1 (Figura 3b)

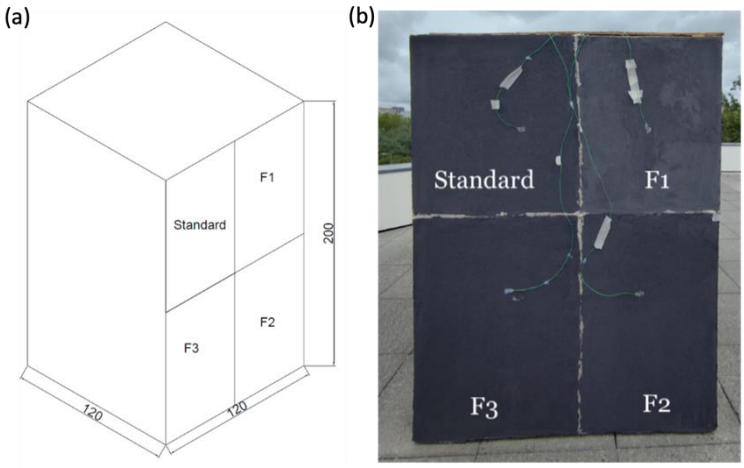


Figura 3 – Configuração do protótipo: (a) Geometria e esquema de aplicação e (b) revestimentos aplicados

O protótipo está localizado na cobertura do edifício da UPTEC Asprela II, na cidade do Porto-PT, conforme apresentado na **Error! Reference source not found.**.

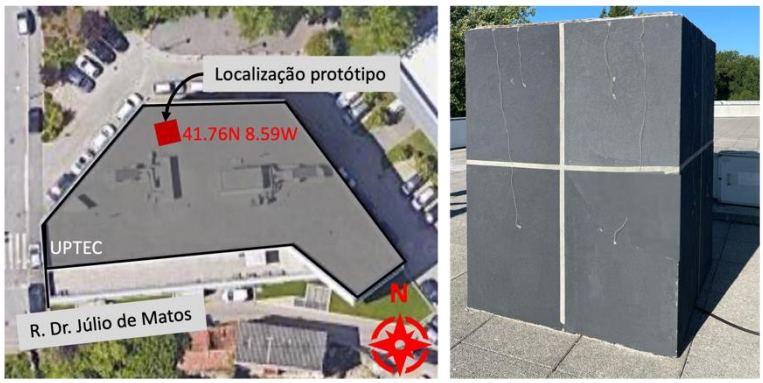


Figura 4 – Localização do protótipo em planta

Para verificação das condições de exposição foram recolhidos os parâmetros climáticos da temperatura e humidade relativa do ar, na estação meteorológica do Laboratório de Física e Técnolofia

das Construções, LFTC/FEUP, entre os dias 13 de abril e 23 de maio de 2024, como apresentado na Figura 5.

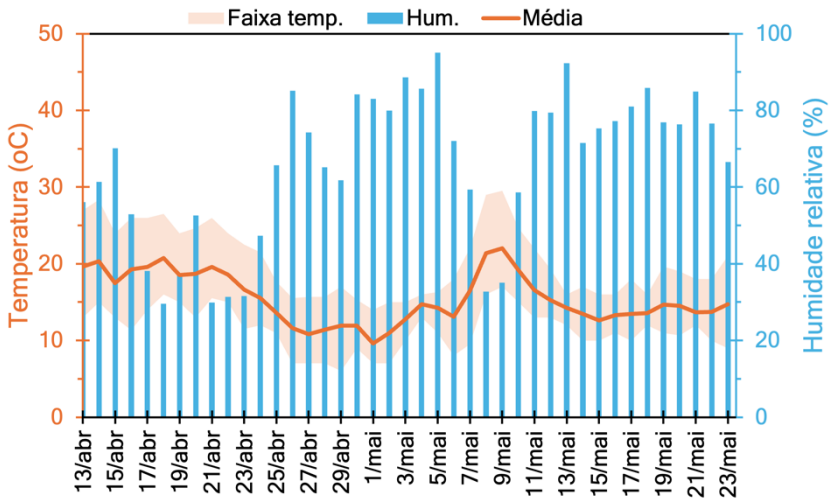


Figura 5 – Perfil climático durante tempo de exposição (1 mês)

O período de avaliação do comportamento termo-ótico descrito no presente trabalho, corresponde, portanto, ao período de um mês de exposição natural, com incidência apenas na fachada sul do protótipo, nesta fase do estudo.

2.3 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

2.3.1 Refletância

O ensaio da refletância foi realizado de acordo com a norma ASTM E903 (2020), de modo a avaliar a quantidade de energia solar absorvida e refletida por um designado material, tendo por base a exposição deste a uma fonte que simula a radiação solar.O cálculo da refletância total (SR) foi efetuada com base no método das ordenadas e tabelas da ASTM G197 (2021) e dada pela Eq. (1).

$$SR = \sum_{i=1}^{100} R\lambda_i/100 \quad (1)$$

Onde R é a refletância total lida pelo espectrofotómetro na ordenada i correspondente ao valor λ do comprimento de onda entre 200 e 2500 nm conforme a tabela X2 da ASTM E903 (2020). Já a refletância na região infravermelha próxima (SR_{NIR}) e do visível (SR_{Vis}) foram calculadas com base nas Eq. (2) e Eq. (3), respetivamente.

$$SR_{NIR} = \sum_{i=46}^{100} R\lambda_i/100 \quad (2)$$

$$SR_{Vis} = \sum_{i=3}^{45} R\lambda_i/100 \quad (3)$$

As medições foram realizadas com um espectrofotómetro modular (Ocean Optics), modelos FLAME-T e FLAME-NIR, equipado com uma esfera integradora de 30 mm de diâmetro. Durante as medições foi utilizado um padrão branco Spectralon® para a recolha da linha de base, em intervalos de 5 nm, tendo em conta que a precisão absoluta devia ser menor que aproximadamente 2%. Este método experimental permitiu calcular a refletância das amostras na região UV-VIS e NIR, uma vez que a região do UV representa apenas 5% da radiação solar, não se apresentam os resultados nesta faixa, apesar de ser contabilizado no cálculo de refletância total.

2.3.2 Cor

A cor é uma propriedade correlacionada com refletância na região do visível e também importante para a caracterização estética dos revestimentos de fachada. A cor foi avaliada conforme as coordenadas do espaço CIELab (ISO 11664-4, 2019) utilizando-se as leituras do espectrofotómetro FLAME-T com configuração do iluminante D65 e 10º como ângulo do observador. Segundo a ISO 11664-4 (2019) o parâmetro de cor L^* corresponde à luminosidade, que varia entre 0 (tons escuros) e 100 (tons claros), a coordenada a* corresponde à variação de cor verde (-a*) à magenta (+a*) e a coordenada b^* da cor azul (-b*) à amarela (+b*). Por se tratar de uma análise matemática da cor é possível calcular a diferença de cor (ΔE) entre dois materiais ou mesmo entre a condição nova e envelhecida, tendo como base a Eq. (4).

$$\Delta \mathrm{E}^*_{\mathrm{ab}} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (4)$$

Estudos como de Mokrzycki and Tatol (2011), Cozza et al. (2015) e Parracha et al. (2021) definem como limite de variação perceptível ao olho humano valores de ΔE entre 2 e 3, sendo aplicado nesse estudo o valor limite de 3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 IMPACTO DA EXPOSIÇÃO NATURAL NAS PROPRIEDADES ÓTICAS DE REVESTIMENTOS ESCUROS COM NANOMATERIAIS REFLETANTES

3.1.1 Refletância

Apresentam-se na Figura 6 os resultados para a refletância total, visível e infravermelho próximo para os sistemas antes e após um mês de envelhecimento. Devido à sua cor escura, é espectável que todas as amostras apresentem baixa refletância na região do visível, cerca de 15-20 %.

Os valores obtidos evidenciam um aumento considerável para as amostras submetidas a envelhecimento natural. É notório que a amostra Standard sofre um aumento significativo em todas as regiões, destacando a região NIR com 61% (Figura 6a). Da mesma forma, as amostras F1 (Figura 6b) e F3 (Figura 6d) apresentam valores elevados de refletância, com 42% e 31% de aumento para a região NIR, respetivamente. A amostra com o nanocompósito (F2) apresenta o menor aumento com apenas 18% na região NIR e mantendo a sua refletância na região visível (Figura 6c), indicando que a incorporação deste compósito pode ajudar a atenuar os efeitos da radiação solar na alteração das propriedades iniciais.

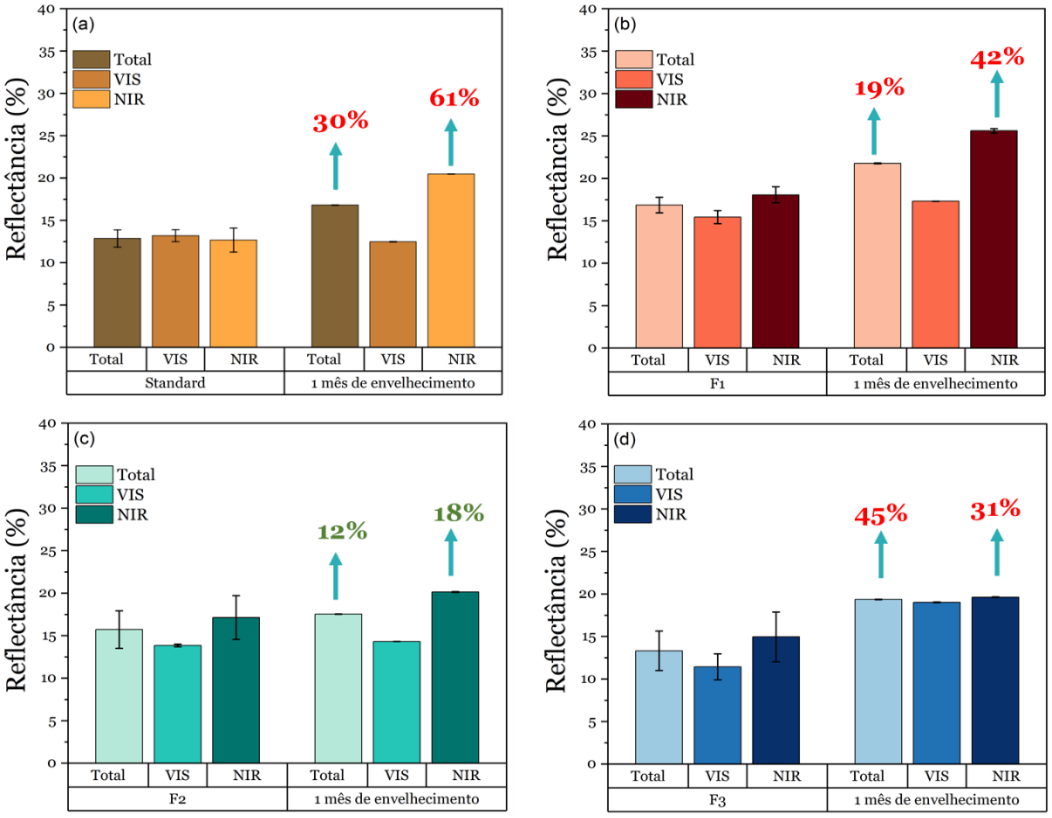


Figura 6 – Variação da refletância antes e após 1 mês de exposição natural de (a) amostra standard, (b) F1 (TiO_2), (c) F2 (nanocompósito) e (d) F3 (SiO_2).

3.1.2 Cor

O Quadro 2 apresenta os valores das coordenadas CIELab antes e após o envelhecimento, onde é possível verificar que a amostra F1 apresenta o valor de L^* 8% maior que o padrão (standard), indicando que essa amostra é mais clara que as restantes para a condição sem envelhecimento. Após envelhecimento, é possível verificar que todas as amostras ficam mais claras, exceto a amostra F1, o que indica que cada nanopartícula apresenta um diferente comportamento à exposição natural.

Quadro 2 – Variação dos parâmetros colorimétricos antes e após um mês de exposição natural

Amostra	Sem envelhecimento			Após envelhecimento (1 mês)		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Standard	47.31±1.02	1.59±0.41	-0.99±1.05	50.52±3.16	-5.82±1.84	0.98±1.11
F1	50.93±1.89	1.75±0.63	-1.124±0.93	49.84±1.04	-11.14±1.84	-1.26±1.11
F2	47.15±0.70	-0.75±0.44	-1.31±0.35	48.92±2.30	-4.39±2.23	-3.43±0.69
F3	47.76±1.55	-0.30±1.09	1.69±1.55	52.12±0.85	-4.88±0.85	-1.19±1.28

Também se analisou a variação da cor, através do cálculo da diferença de cor. Primeiramente foi analisado o efeito da incorporação das nanopartículas na cor em comparação com a amostra standard (Figura 7a), seguido do efeito do envelhecimento comparando cada amostra envelhecida com a correspondência original não envelhecida (Figura 7b).

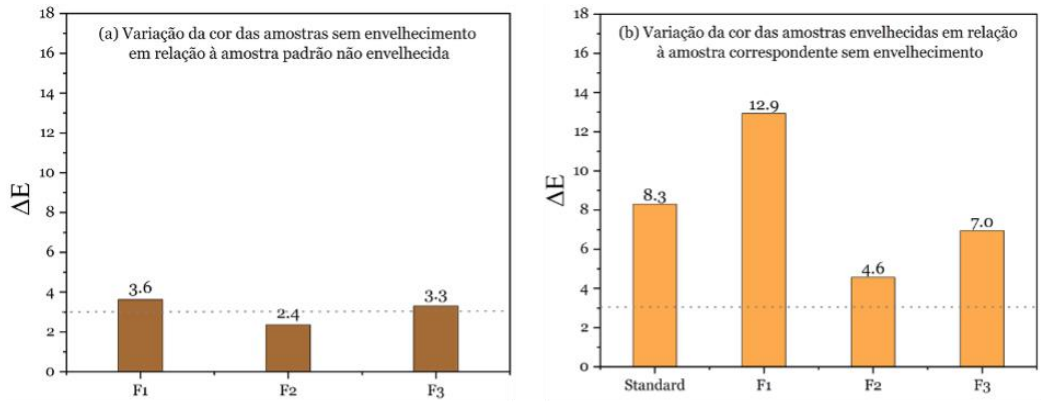


Figura 7 – Estudo da variação da cor em relação (a) à amostra padrão, sem envelhecimento, e (b) à amostra correspondente após envelhecimento

Na condição de caracterização sem envelhecimento, é possível verificar que a inclusão das nanopartículas não modifica a cor em valores muito superiores ao limite de 3 para a perceção ao olho humano, sendo que o nanocompósito CuO/TiO_2 – F2 é a amostra com menor diferença de cor em relação a amostra standard (Figura 7a). Na Figura 7b verifica-se que a amostra F2 apresenta menor valor de degradação em relação à condição sem envelhecimento, comportamento similar ao encontrado nos valores de refletância. Observa-se que, exceto para a amostra F1, o uso de nanopartículas reduz a degradação da cor comparando com a amostra standard sem nanomateriais. Como tal, a avaliação da cor e das suas diferenças pode ser um bom indicativo de durabilidade dos sistemas.

4 CONCLUSÕES

Este estudo compreende a apresentação de resultados parciais do projeto NIRWall e teve como principal objetivo avaliar a durabilidade, por exposição natural, de ETICS com nanomateriais com propriedades refletantes incorporados no revestimento de acabamento de cor escura. Para esse efeito, avaliou-se a degradação da refletância e a variação de cor dos revestimentos após um mês de exposição na cidade do Porto.

Os resultados mostraram que existe uma influência do tipo de nanopartícula utilizada, principalmente na manutenibilidade das propriedades do revestimento do sistema ETICS após um mês de exposição, destacando-se:

- A viabilidade do uso de nanopartículas em situações reais de aplicação no sistema ETICS;
- Os sistemas com nanomateriais apresentam uma maior refletância quando comparados com o sistema standard, sem nanopartículas;
- O tipo de nanopartícula afeta as propriedades estéticas de cor do revestimento;
- O nanocompósito desenvolvido contribuiu para uma menor alteração das propriedades óticas, o que pode indicar uma maior durabilidade.

Apesar da curta duração de exposição, foi possível encontrar variação das propriedades óticas inicialmente medidas. No entanto, não se observaram alterações quanto ao aspeto dos revestimentos, nomeadamente fissuração e machas. Salienta-se que, como continuação da atual investigação, continuarão a ser realizados ensaios de refletância e cor, assim como das propriedades higrotérmicas

e mecânicas relantes no desempenho de ETICS. Além disso, será feita uma monitorização constante da temperatura superficial durante o tempo de exposição do protótipo, conforme definido no âmbito do projeto NIRWall.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Projeto NIRWall, financiado por BIP Proof da Universidade do Porto; por Financiamento Base - UIDB/04708/2020 DOI: 10.54499/UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 DOI: 10.54499/UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). As autoras Rita Carvalho Veloso e Andrea Souza agradecem o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutoramento 2020.08418.BD DOI: 10.54499/2020.08418.BD e SFRH/BD/148785/2019 DOI: 10.54499/SFRH/BD/148785/2019.

REFERÊNCIAS

Akbari, H., Levinson, R., & Rainer, L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*, *37*(10), 1007-1016. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.013

ASTM E903. (2020). Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM G197. (2021). Standard table for reference solar spectral distributions: Direct and diffuse on 20o tilted and vertical surfaces. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Borsoi, G., Gomes, M. G., Silvestre, J. D., Dionísio, A., Malanho, S., Veiga, R., . . . Santos, L. (2017). *Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS): Desempenho, durabilidade e recomendações técnicas*. CERIS.

Coser, E., Moritz, V. F., Krenzinger, A., & Ferreira, C. A. (2015). Development of paints with infrared radiation reflective properties. *Polímeros*, *25*(3), 305-310. https://doi.org/10.1590/0104-1428.1869

Cozza, E. S., Alloisio, M., Comite, A., Di Tanna, G., & Vicini, S. (2015). NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. *Solar Energy*, *116*, 108-116. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.004

Daniotti, B., Paolini, R., & Re Cecconi, F. (2013). Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS Cladding. In *Durability of Building Materials and Components* (pp. 127-171). https://doi.org/10.1007/978-3-642-37475-3_6

Dornelles, K., Caram, R., & Sichieri, E. (2015). Natural Weathering of Cool Coatings and its Effect on Solar Reflectance of Roof Surfaces. *Energy Procedia*, *78*, 1587-1592. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.216

EOTA. (2019). EAD 040083-00-0404: External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with renderings. In. Brussels, BE: European Assessment Document.

ISO 11664-4. (2019). Colorimetry - Part 4 - CIE 1976 L*a*b* Colour space. In. Viena, AT: European Committee for Standardization.

Itecons. (2022). *ETA 22/0327: webertherm classic*. https://www.itecons.uc.pt/attachments/163

Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., & Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. *Cleaner Engineering and Technology*, *11*. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100555

Kvande, T., Bakken, N., Bergheim, E., & Thue, J. (2018). Durability of ETICS with Rendering in Norway—Experimental and Field Investigations. *Buildings*, *8*(7). https://doi.org/10.3390/buildings8070093

Marčiukaitis, G. (2012). The Influence of Sudden Increase in Temperature and Humidity on Stress-Strain States in Exterior Finishing Layers of Multileaf Walls with Flexible Ties. *Statyba*, *4*(3), 219-226. https://doi.org/10.1080/13921525.1998.10531408

Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour Difference ΔE - a Survey. *MG&V*, *20*(4), 383-411.

Nguyen, T. H., Nguyen, T. L., Ung, T. D. T., & Nguyen, Q. L. (2013). Synthesis and characterization of nano-CuO and CuO/TiO2 phocatalysts. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, *4*(2). https://doi.org/10.1088/2043-6262/4/2/025002

Paolini, R., Zinzi, M., Poli, T., Carnielo, E., & Mainini, A. G. (2014). Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: Natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings. *Energy and Buildings*, *84*, 333-343. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.008

Parracha, J. L., Borsoi, G., Veiga, R., Flores-Colen, I., Nunes, L., Garcia, A. R., . . . Faria, P. (2021). Effects of hygrothermal, UV and SO2 accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments. *Building and Environment*, *204*, 108151. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108151

Parracha, J. L., Borsoi, G., Veiga, R., Flores-Colen, I., Nunes, L., Viegas, C. A., . . . Faria, P. (2022). Durability assessment of external thermal insulation composite systems in urban and maritime environments. *Science of the Total Environment*, *849*, 157828. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157828

Pereira, C., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2018). Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings. *Engineering Failure Analysis*, *90*, 103-115. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.028

Ramos, N. M. M., Maia, J., Souza, A. R., Almeida, R. M. S. F., & Silva, L. (2021a). Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS. *Infrastructures*, *6*(6). https://doi.org/10.3390/infrastructures6060079

Ramos, N. M. M., Maia, J., Souza, A. R., Almeida, R. M. S. F., & Silva, L. (2021b). Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS. *6*(6), 79. https://www.mdpi.com/2412-3811/6/6/79

Ramos, N. M. M., Souza, A. R., Maia, J., Almeida, R. M. S. F., & Kalamees, T. (2020). Colour degradation of façade coatings – the effect of nanopigments incorporation. *E3S Web of Conferences*, *172*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017224004

Revel, G. M., Martarelli, M., Emiliani, M., Celotti, L., Nadalini, R., De Ferrari, A., . . . Beckers, E. (2014). Cool products for building envelope - part II: Experimental and numerical evaluation of thermal performances. *Solar Energy*, *105*, 780-791. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.035

Saafi, K., & Daouas, N. (2018). A life-cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. *Energy*, *152*, 925-938. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.010

Shen, H., Tan, H., & Tzempelikos, A. (2011). The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study. *Energy and Buildings*, *43*(2-3), 573-580. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.024

Takebayashi, H., Miki, K., Sakai, K., Murata, Y., Matsumoto, T., Wada, S., & Aoyama, T. (2016). Experimental examination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging. *Energy and Buildings*, *114*, 173-179. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.019

UN. (2021). *The Heat Is On - A world of climate promises not yet delivered*. United Nations Environment Programme.

Veloso, R. C., Dias, C., Souza, A. R., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2023, 12-14 Jun). Improving the optical properties of finishing coatings for façade systems. 13th Nordic Symposion on Building Physis - NSB 2023, Aalborg, Denmark.

Veloso, R. C., Souza, A., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2021). Nanomaterials with high solar reflectance as an emerging path towards energy-efficient envelope systems: a review. *Journal of Materials Science*, *56*(36), 19791-19839. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06560-3

Weber, S.-G. (2023). *Ficha técnica weberplast decor plus*. https://construir.saint-gobain.pt/sites/mac3.saint-gobain.pt/files/assets/MAM/assets/1/125D8AC2C38D4A498675522E0CD98E10/doc/59AF54FB8D75435C894E156759DEEC73/Ficha_Tecnica_weberplast_decor_plus.pdf

Xiong, H., Xu, J., & Yuan, K. (2018). Experimental study on the temperature field of ETICS cladding system with finishing colorful steel plate. *Journal of Building Engineering*, *18*, 438-447. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.015

Yuan, K., Xiong, H., Wen, M., & Xu, J. (2022). Visualization of localized deformation of external thermal insulation composite systems during aging. *Applied Thermal Engineering*, *206*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118108

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VARIABILIDADE DA MEDIÇÃO EM LABORATÓRIO DO FLUXO DE CALOR EM PAREDES HETEROGÉNEAS

Manuel Ribas[a]; Ricardo Almeida[a,b]; Eva Barreira[a]

[a]CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201806851@fe.up.pt (MR), barreira@fe.up.pt (EB)

[b]Instituto Politécnico de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Campus Politécnico, 3504-510 Viseu, Portugal, ralmeida@estgv.ipv.pt (RA)

RESUMO

O consumo energético associado ao aquecimento e arrefecimento de espaços interiores dos edifícios constitui uma parcela significativa da energia total consumida. Perante a necessidade de mitigação dos impactos ambientais gerados pelo consumo de combustíveis fósseis, o desenvolvimento de materiais e elementos construtivos energeticamente mais eficientes apresenta-se como uma área com um grande potencial de desenvolvimento. A avaliação do desempenho energético dos elementos construtivos baseia-se sobretudo na medição da sua resistência térmica, ou em laboratório, normalmente através do método da *Hot Box*, descrito na EN 1934:1999, ou *in situ*, utilizando o método do termofluxímetro, conforme o indicado na ISO 9869-1:2014. Para o cálculo deste parâmetro, é fundamental a medição rigorosa do fluxo de calor.

Apesar dos procedimentos normalizados, é frequente encontrarem-se na literatura valores do fluxo de calor muito diversos, em diferentes pontos da mesma parede de alvenaria, quer seja devido à heterogeneidade intrínseca deste tipo de elemento construtivo, quer seja pelas incertezas associadas ao procedimento de medição. Assim, o presente trabalho pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento nesta área ao avaliar o impacto das condições de ensaio na medição. Para tal, foram realizados ensaios numa parede dupla em alvenaria de tijolo furado, com um ETICS como revestimento exterior, constituindo uma situação de reabilitação energética muito comum na realidade portuguesa. Foi seguido o método da *Hot Box*, descrito na EN 1934:1999, avaliando-se o fluxo de calor em 6 pontos de medição e 3 configurações de ensaio diferentes: (i) sem proteção da parede; (ii) com proteção da parede através de um elemento paralelo afastado 1.15 m; (iii) com proteção da parede através de um elemento paralelo afastado 0.05 m.

Os resultados mostram que há um grande impacto das condições de medição no valor do fluxo de calor, não só em termos absolutos, mas também em termos relativos. Verificou-se que a existência de um elemento de proteção da parede é fundamental para obter valores fiáveis, mas que a posição desse elemento tem um impacto considerável nos valores obtidos.

Palavras-chave: fluxo de calor, método da *Hot Box*, parede de alvenaria de tijolo

1 INTRODUÇÃO

Após várias décadas de exploração dos recursos naturais com poucas ou nenhumas preocupações ambientais, atualmente, as sociedades deparam-se com problemas graves relacionados com as alterações climáticas e com a ocorrência cada vez mais frequente de fenómenos atmosféricos extremos, com impactos significativos na saúde e bem-estar das populações. As Nações Unidas reafirmam a necessidade de adotar práticas sustentáveis ao nível da gestão dos recursos naturais, apoiando um crescimento regenerativo e inclusivo, sem o qual será impossível fazer face à emergência climática, à perda de biodiversidade e às desigualdades e assimetrias sociais (United Nations, 2015). Neste sentido, foram definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tendo maior impacto na indústria da construção o Objetivo 6 "Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos", o Objetivo 9 "Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação", o Objetivo 11 "Tornar as cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis" e o Objetivo 13 "Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos". Também Portugal definiu um conjunto de estratégias específicas para atingir a neutralidade carbónica até 2050, que estão descritas no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), com impacto significativo no setor da construção e dos edifícios (APA, 2019).

Para cumprir com os ODS, a indústria da construção, e em concreto o setor dos edifícios, tem vindo a adotar novos procedimentos e a implementar novas medidas, indo de encontro à regulamentação cada vez mais exigente neste domínio. Apesar disso, os edifícios em utilização ainda representam 30% do consumo final de energia a nível mundial e 26% das emissões globais relacionadas com a energia (8% são emissões diretas nos edifícios e 18% emissões indiretas devido à produção de eletricidade e de calor utilizados nos edifícios) (IEA, 2023).

As economias europeias estão a tornar cada vez mais exigentes os requisitos de desempenho energético dos edifícios novos e existentes, através de novas políticas e documentos normativos que promovem uma progressiva descarbonização dos edifícios. Realmente, a revisão de 2023 da Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) da União Europeia apoia o objetivo de alcançar a neutralidade climática no sector dos edifícios até 2050, exigindo emissões zero para todos os novos edifícios públicos a partir de 2026 e para todos os novos edifícios a partir de 2028, e reforçando as normas para os edifícios existentes ao longo do tempo (IEA, 2023).

Do ponto de vista construtivo, a avaliação do desempenho energético dos edifícios baseia-se sobretudo na resistência térmica dos elementos que constituem a sua envolvente. Este parâmetro pode ser medido em laboratório, normalmente através do método da *Hot Box*, descrito na EN 1934 (1999), ou *in situ*, utilizando o método do termofluxímetro, conforme o indicado na ISO 9869-1 (2014). Apesar dos procedimentos normalizados, é frequente encontrarem-se na literatura valores do fluxo de calor muito diversos em diferentes pontos da mesma parede de alvenaria.

Segundo Petre et al. (2021), os fatores que podem influenciar de forma significativa a medição da resistência térmica de elementos construtivos, que depende da temperatura superficial nas 2 superfícies do elemento construtivo e do fluxo de calor que se estabelece entre elas, são a radiação solar, o teor de humidade dos materiais que o constituem, a velocidade do ar na proximidade das superfícies, a diferença de temperatura entre as duas superfícies e a sua flutuação ao longo do tempo, a colocação aleatória dos termopares e dos termofluxímetros, a precisão do equipamento utilizado e a duração do ensaio.

Também o trabalho de Ficco et al. (2015) apontou para o impacto da temperatura e do teor de humidade dos materiais nos resultados da medição, sobretudo se forem muito porosos. Apesar de os autores terem referido que a forma e tamanho dos termofluxímetros utilizados não condicionarem de forma significativa os resultados, tal terá resultado de uma escolha cuidada da sua localização na superfície da parede. Por outro lado, verificam também que diferenças de temperatura entre superfícies inferiores a 10 ^{o}C ou fluxos de calor muito reduzidos (ou inversão nos fluxos de calor) conduzem a incertezas inaceitáveis. Resultados semelhantes foram obtidos por Gaspar et al. (2016), que também demonstraram que a precisão dos sensores de temperatura podem ter impacto nos valores obtidos.

Na avaliação do comportamento térmico de paredes, há estudos que apontam para a influência da velocidade do ar nas temperaturas superficiais e nos fluxos de calor medidos, sendo menor nas temperaturas superficiais do que nos fluxos de calor. Os resultados apontam variações de 1.3 ^{o}C para a temperatura superficial e de 97 W/m^2 para o fluxo de calor, quando a velocidade do ar varia entre 0 e 6 m/s (Wang et al., 2010).

A localização aleatória dos termopares ou dos termofluxímetros também pode conduzir a incertezas relevantes na medição da resistência térmica, sobretudo em paredes de alvenaria sem isolamento térmico (Meng et al., 2015). Nesse trabalho, foram encontrados erros máximos de 6% devido à localização dos termopares e de 26% devido à localização dos termofluxímetros, quando posicionados sobre juntas de argamassa ou outras pontes térmicas. Esta questão é também comprovada no trabalho de Blanca et al. (2020), que, através da termografia de infravermelhos, definiu um mapa 2D de valores de U de diferentes paredes de alvenaria de tijolo, que permitia visualizar diferenças de valores significativas nas zonas das juntas ou de pontes térmicas face à zona corrente.

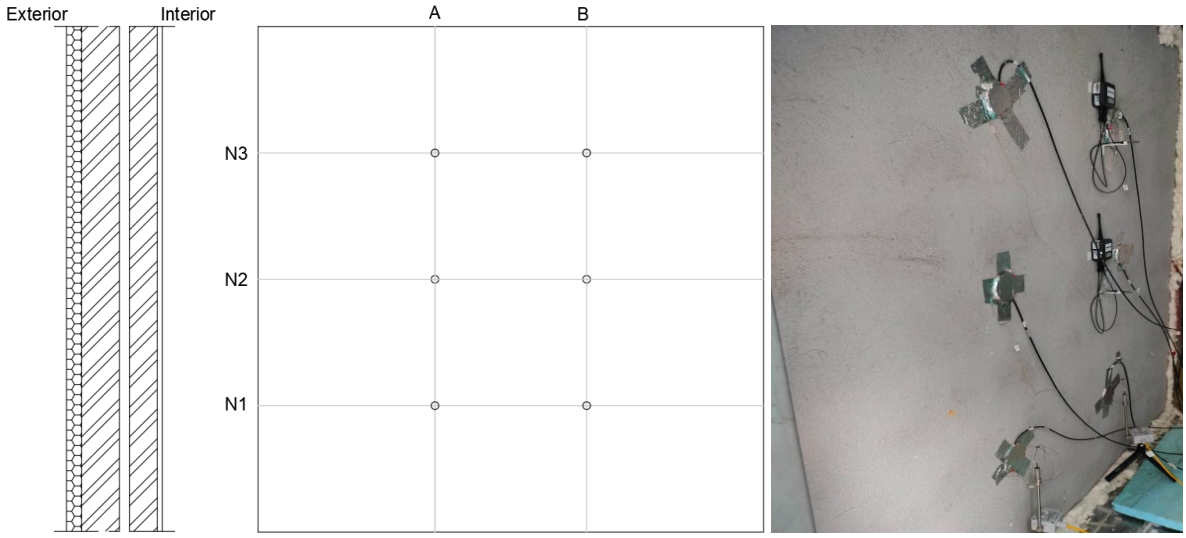
Tendo em conta os resultados obtidos por outros autores e considerando que, de acordo com os Censos de 2011, a construção em alvenaria de tijolo era utilizada em cerca de metade do parque edificado de Portugal (INE, 2014) e que não houve alterações significativas no processo construtivo da última década, torna-se necessário avaliar detalhadamente os procedimentos de ensaio para avaliar o comportamento térmico de paredes heterogéneas, para que se possa garantir a fiabilidade dos valores obtidos na medição do fluxo de calor. Assim, o presente trabalho pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento nesta área ao avaliar o impacto das condições de ensaio na medição, nomeadamente, a posição dos equipamentos e a velocidade do ar junto à superfície em estudo.

2 METODOLOGIA

Para avaliar o impacto das condições de ensaio na medição do fluxo de calor utilizou-se uma parede dupla em alvenaria de tijolo furado (1.90 x 1.90 m^2), com um ETICS como revestimento exterior, constituindo uma situação de reabilitação energética muito comum da realidade portuguesa. A parede é constituída, do interior para o exterior, por um reboco de base cimentícia com 2 cm de espessura, um pano de tijolo furado de 11 cm, um espaço de ar com 6 cm de espessura, um pano de tijolo furado de 15 cm e um sistema ETICS com 6 cm de EPS, correspondendo a uma resistência térmica teórica entre superfícies de 2.48 m^2.^{o}C/W (Quadro 1).

Relativamente ao procedimento de ensaio, foi seguido o método da Hot Box, descrito na EN 1934 (1999), com adaptações para acomodar as características da câmara climática disponível. Consideraram-se 6 pontos de medição, distribuídos em 3 cotas (Ni) e 2 alinhamentos (A/B). Na superfície interior foram fixados 6 termopares e 6 termofluxímetros e, na superfície exterior foram fixados 6 termopares. Os termopares são do tipo K, com uma gama de medição entre –270 e 1260°C

e uma precisão de ±2.2ºC ou ±0.75%. Os termofluxímetros têm uma gama de medição compreendida entre -2000 to +2000 W/m², com uma sensibilidade nominal de 60 x 10-6 V/(W/m^2). A Figura 1 mostra uma representação esquemática e uma imagem da instrumentação na parede.



(a) (b1) (b2)

Figura 1 – Configuração do ensaio: a) Corte transversal da parede;
b) Posição dos termopares (6 na superfície interior e 6 na superfície exterior) e
dos termofluxímetros (6 na superfície interior) – b1 – esquema; b2 –fotografia da superfície interior)

Quadro 1 – Características da parede

Material	**Espessura [cm]**	**Condutibilidade térmica*** **[W/(m.ºC)]**	**Resistência térmica*** **[(m².ºC)/W]**
EPS	6	0.037	-
Tijolo Furado 15	15	-	0.39
Ar	6	-	0.18
Tijolo Furado 11	11	-	0.27
Reboco base cimentícia	2	1.3	-

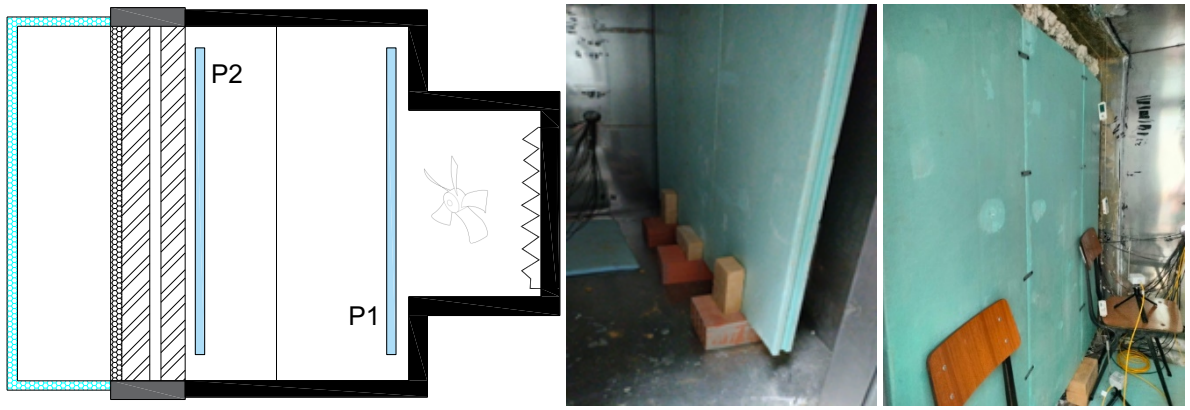
* Valores retirados do ITE50 (Matias e Dos Santos, 2006)

NOTA: A resistência térmica da camada de revestimento do ETICS foi desprezada

De acordo com a EN 1934 (1999), é necessária a presença de um elemento de proteção que funcione como uma camada difusora, limitando a velocidade do ar com direção perpendicular à superfície da parede. Para avaliar a importância e impacto deste elemento, foram efetuadas medições considerando 3 configurações de ensaio diferentes (Figura 2): (i) Configuração I – sem elemento de proteção da parede; (ii) Configuração II – com proteção da parede através de um elemento afastado 1.15 m (posição P1); e (iii) Configuração III – com proteção da parede através de um elemento afastado 0.05 m (posição P2). O elemento de proteção utilizado tem 1.60 x 1.60 m^2 e foi montado paralelo à superfície da parede em estudo.

No lado quente da parede, voltado para uma camara climática, a temperatura do ar manteve-se constante a cerca de 40 ºC (hot box). No lado frio, não foi possível condicionar a temperatura do ar, no entanto, foi limitada a sua variação através de uma caixa de material isolante acoplada à parede.

Como resultado desta variabilidade da temperatura do ar, para o cálculo da resistência térmica, seguiu-se o procedimento descrito na ISO 9869-1 (2014), que propõe que se assuma uma média móvel dos valores do fluxo de calor e das diferenças entre as temperaturas superficiais, para uma duração de ensaio não inferior a 72 horas.



(a) (b1) (b2)

Figura 2 – Configuração do ensaio: a) Representação esquemática; b) Posição do elemento de proteção – b1 – posição P1, com afastamento de 1.15 m da parede (configuração II); b2 – posição P2, com afastamento de 0.05 m da parede (configuração III)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 a 5 mostram os valores da temperatura superficial interior ao longo das 72 horas de ensaio nos 6 pontos de medição e para as 3 configurações definidas.

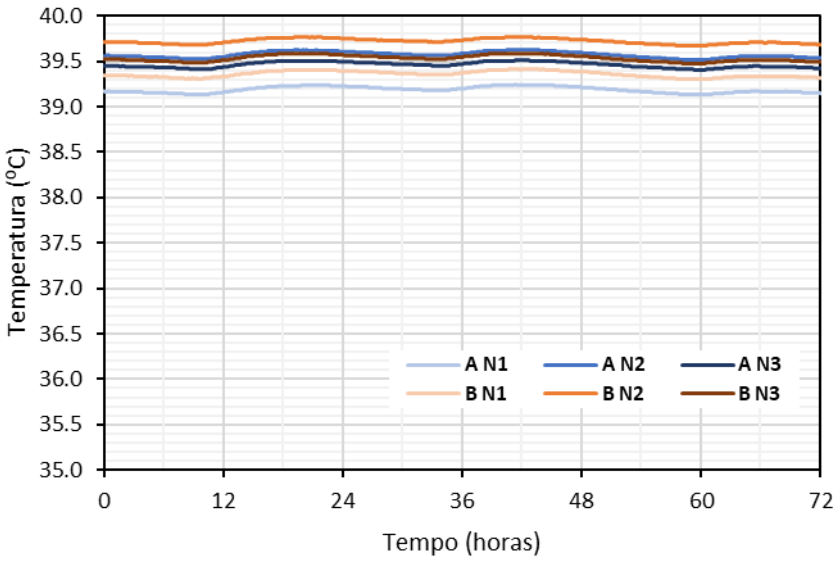


Figura 3 – Temperatura superficial interior nos 6 pontos de medição na Configuração I (sem elemento de proteção)

Os resultados mostram que a temperatura superficial nos 6 pontos medidos tem menor variabilidade na Configuração I (Figura 3), uma vez que o sistema de homogeneização do ar no interior da câmara climática não tem restrições ao seu funcionamento, sendo possível uma uniformização mais eficaz da temperatura. Por outro lado, também se verifica que as temperaturas mais baixas ocorrem na cota

mais baixa da parede e as mais altas na cota intermédia, o que deverá estar relacionado com a posição dos ventiladores da câmara climática (Figura 2a).

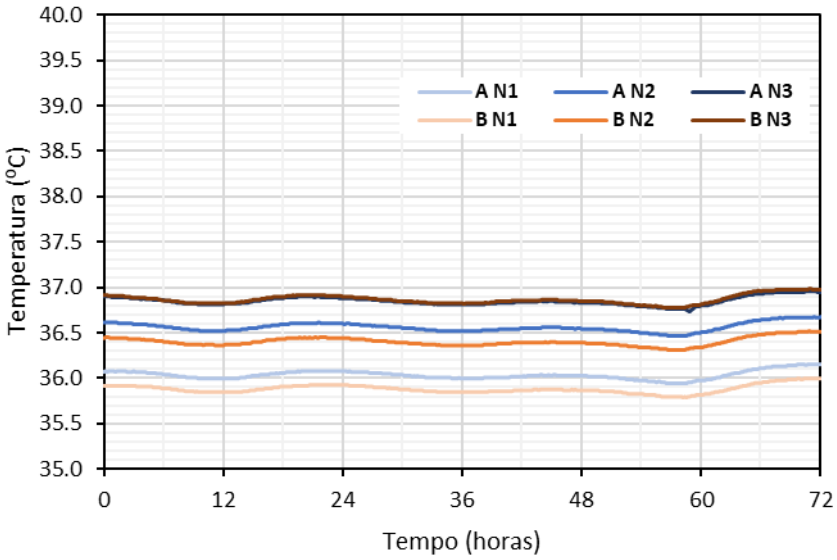


Figura 4 – Temperatura superficial interior nos 6 pontos de medição na Configuração II (elemento de proteção em P1)

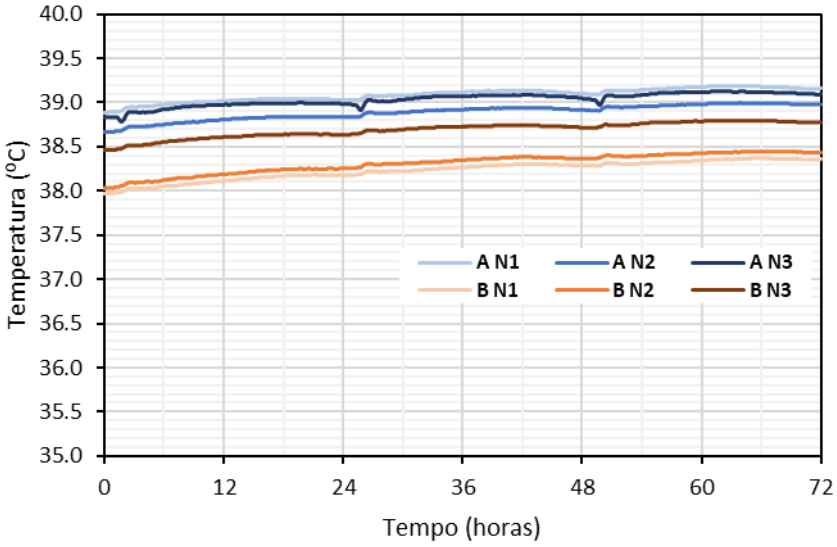


Figura 5 – Temperatura superficial interior nos 6 pontos de medição na Configuração III (elemento de proteção em P2)

Quando é utilizado o elemento de proteção da parede, verifica-se que as temperaturas superficiais baixam, face à Configuração I (sem proteção), sendo essa diminuição mais acentuada quando o elemento de proteção está na posição P1, mais afastado da parede (Configuração II). Realmente, quando se aproxima o elemento de proteção dos ventiladores, a uniformização da temperatura do ar no interior da câmara climática fica restringida, não sendo, por isso, atingido o *setpoint* de 40 ºC, condicionando as temperaturas superficiais. Contudo, uma vez que o fluxo de ar no interior da câmara climática é menor, é possível observar nesta configuração uma estratificação da temperatura

superficial correspondente ao efeito chaminé, isto é, temperaturas mais baixas na menor cota e mais altas na cota mais elevada (Figura 4).

Na Configuração III, correspondente à posição P2 da Figura 2a, não só não se observa qualquer padrão de estratificação das temperaturas em altura, como também não há qualquer correspondência entre os valores medidos nos alinhamentos A e B.

No que diz respeito aos fluxos de calor (Figura 6 à Figura 8), na Configuração I os maiores fluxos ocorrem no nível mais baixo (N1) para ambos os alinhamentos (A e B). Quanto às restantes posições, não é possível identificar qualquer padrão ou relação entre elas (Figura 6). Uma situação semelhante pode ser observada na Configuração III, embora com valores de fluxo consideravelmente mais baixos, exceto para a posição AN1, que mantém fluxos sempre acima de 11 W/m^2, o que pode estar relacionado com a posição da proteção, que condiciona a velocidade do ar naquela zona (Figura 8).

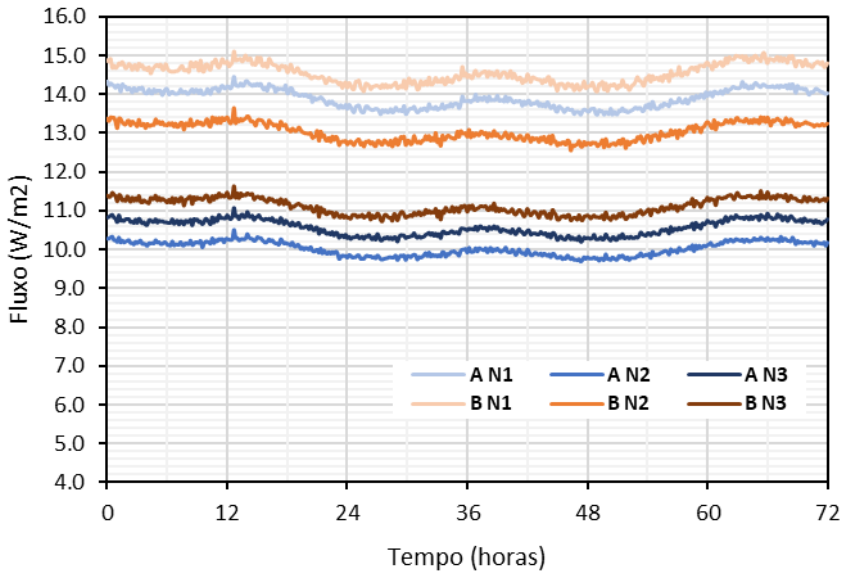


Figura 6 – Fluxo de calor nos 6 pontos de medição, sem elemento de proteção (Configuração I)

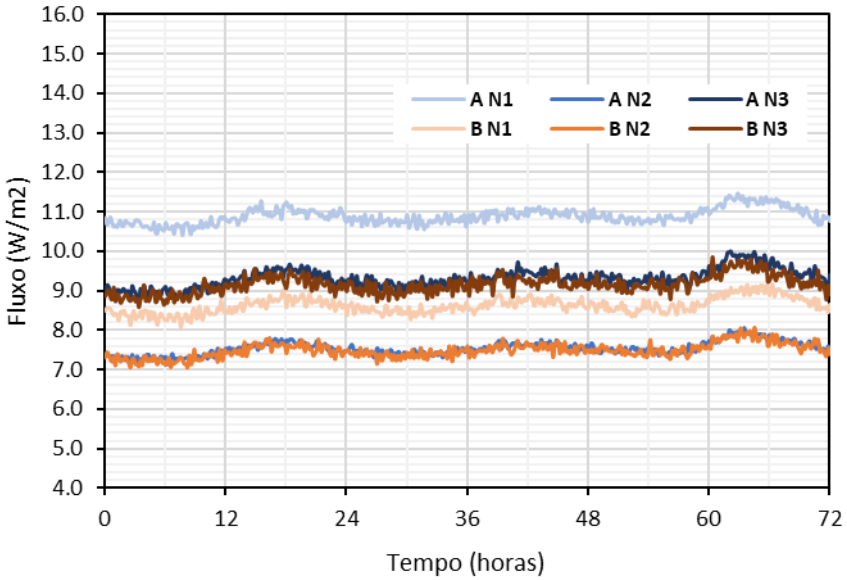


Figura 7 – Fluxo de calor nos 6 pontos de medição, elemento de proteção em P1 (Configuração II)

O efeito da proteção também é visível na Configuração II (Figura 7). No entanto, com o elemento de proteção na posição P1 existe uma correspondência entre os valores medidos nos alinhamentos A e B, exceto para a posição N1, o que poderá resultar de uma maior proteção da parede face ao sistema de uniformização do ar no interior da câmara climática, garantindo assim uma maior compatibilização dos valores medidos entre alinhamentos.

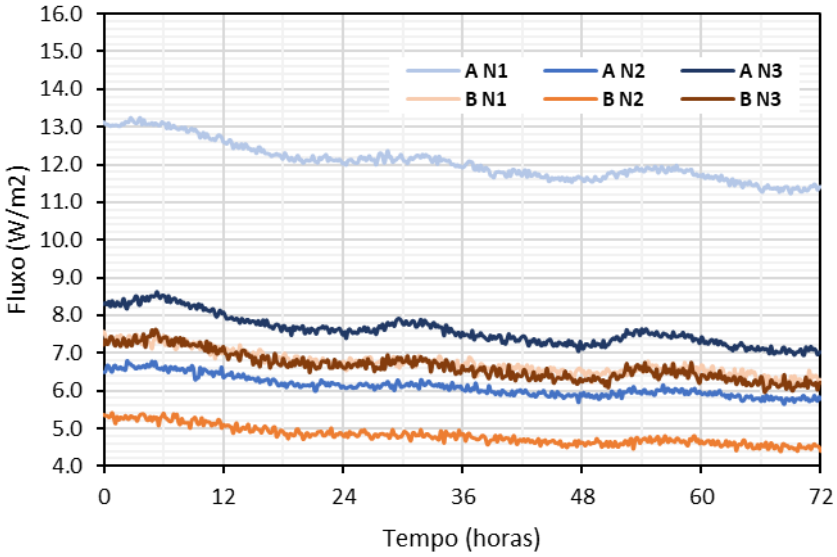
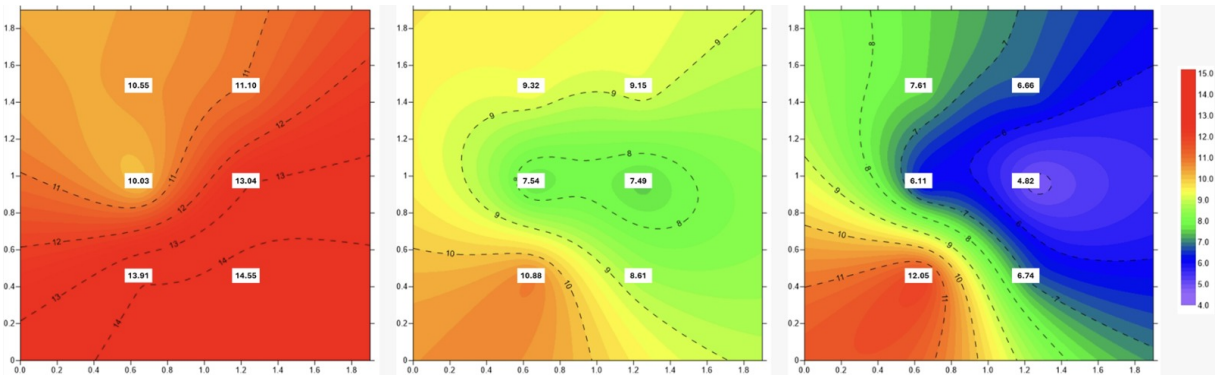


Figura 8 – Fluxo de calor nos 6 pontos de medição, elemento de proteção em P2 (Configuração III)

Na Figura 9 podem observar-se os mapas 2D dos fluxos de calor na parede para as 3 configurações estudadas. Observa-se efetivamente uma grande heterogeneidade nos valores medidos nos 6 pontos em qualquer uma das configurações, embora na Configuração II a variabilidade seja menor, o que vai de encontro à informação descrita na EN 1934 (1999), que refere que, para maiores velocidades no interior da câmara climática, a proteção poderá ser colocada a 4 cm da superfície da parede. Contudo, também se verifica que os menores fluxos ocorrem para a Configuração III, estando esses fluxos mais próximos do esperado para este tipo de parede e de diferenças de temperatura. Assim, para a câmara climática utilizada neste ensaio, a proteção P2 será a mais adequada, embora a questão da variabilidade tenha de ser acautelada.



(a) (b) (c)

Figura 9 – Mapa 2D dos fluxos de calor na parede: (a) sem elemento de proteção; (b) com elemento de proteção na posição P1; (c) com elemento de proteção na posição P2

4 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu avaliar o impacto das condições de ensaio na medição dos fluxos de calor em paredes de alvenaria heterogéneas. Verificou-se que a existência de um elemento de proteção da parede é fundamental para obter valores fiáveis, mas que a posição desse elemento tem um impacto considerável nos valores obtidos. Uma proteção mais próxima da parede reduz a heterogeneidade e permite maior coerência entre os valores medidos para as várias posições, no entanto, quando esse elemento está mais afastado, os valores aproximam-se do espectável. Importa referir que as características específicas da câmara climática onde se realizou o ensaio podem restringir uma generalização das conclusões obtidas.

REFERÊNCIAS

Agência Portuguesa do Ambiente – APA (2019). Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050). https://descarbonizar2050.apambiente.pt/ (acedido em maio 2024)

EN 1934 (1999) Thermal performance of buildings - Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter – Masonry, CEN, Brussels.

Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., Alfano, F.R.D.A., Dell'Isola, M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. Energy and Buildings, 104:108-121. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071

Gaspar, K., Casals, M., Gangolells, M. (2016). A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. Energy and Buildings,130:592-599. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072

Instituto nacional de Estatística – INE (2014). Censos 2011: Recenseamento geral da habitação. https://censos.ine.pt/ (acedido em maio 2024)

International Energy Agency – IEA (2023). Buildings. https://www.iea.org/topics/buildings (acedido em maio 2024)

ISO 9869-1 (2014). Building Elements—In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Part 1: Heat Flow Meter Method, ISO, Switzerland.

Matias, L., Dos Santos, C.P. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios (ITE 50). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

Meng, X., Yan, B., Gao, Y., Wang, J., Zhang, W., Long, E. (2015). Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method. Energy and Buildings, 86:754-765. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005

Petre, S.G., Isopescu, D.N., Pruteanu, M. (2021). Study on the Factors Affecting in Situ Measurement of the Thermal Resistance of Building Elements. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section, 67(4):87-94. https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0036

Tejedor, B., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Casals, M. (2020). Thermographic 2D U-value map for quantifying thermal bridges in building façades. Energy and Buildings, 224, 110176. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110176

Wang, F., Wang, D., Wang, X., Yao, J. (2010). A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ. Energy and Buildings, 42(10):1647-1653. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.007

United Nations (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. https://sdgs.un.org/2030agenda (acedido em maio 2024)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOPARTICULAS DE PRATA SOBRE A ADERÊNCIA DE FIBRAS DE SISAL COM A MATRIZ CIMENTÍCIA

Gilberto Alves da Silva Neto[a]; Cleidson Carneiro Guimarães[a]; Edrian Mania[b]; Hélio Mitoshi Kamida[c]
Paulo Roberto Lopes Lima[ad]

[a] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC), Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630, Salvador - BA, Brasil, gilberto.alves@ufba.br ; cleidsonguimaraes@gmail.com

[b] Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n – Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana – BA, Brasil, emania@uefs.br

[c] Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n – Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana – BA, Brasil, hmkamida@uefs.br

[d] Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n – Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana – BA, Brasil, prllima@uefs.br

Resumo

As fibras vegetais são em geral pouco resistentes à elevada alcalinidade das matrizes de cimento Portland e uma alta instabilidade dimensional na presença de umidade, sendo necessário aplicar tratamentos nas fibras. Sendo necessário aplicar tratamentos nas fibras e nas matrizes cimentícias. Ademais, tem-se a deterioração por agentes biológicos, como os fungos, que tendem a consumir a lignina das fibras, alterando sua microestrutura, e comprometendo seu desempenho mecânico. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da adição de nanopartículas de prata (AgNP) sobre a aderência fibra-matriz cimentícia, além de avaliar a influência desse tratamento nas propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais de sisal. Quanto aos parâmetros físicos, as fibras com AgNP apresentaram menor capacidade de absorção de água e, consequentemente, uma melhor estabilidade dimensional. As fibras tratadas com AgNP não apresentaram alteração significativa na resistência à tração em comparação com as fibras naturais, mas seu módulo de Young foi reduzido. Em relação à adesão fibra-matriz, observou-se que a tensão de adesão destas fibras após o tratamento com AgNP não apresentou modificação significativa comparadas as fibras naturais.

Palavras-chave: Fibra Vegetal de Sisal, Nanopartículas de Prata, Tratamento de Fibras Vegetais, Aderência fibra-matriz.

1 INTRODUÇÃO

Os produtos à base de cimento Portland são conhecidos por sua baixa resistência à tração e tenacidade, resultando em fissuras precoces sob flexão, cargas de impacto ou choque térmico, caso não haja um reforço dessas matrizes. Nas últimas décadas, houve um crescente interesse na utilização de várias fibras vegetais, abundantes em países tropicais e subtropicais, como reforço de compósitos cimentícios para a produção de materiais de construção econômicos (Wei e Meyer, 2015).

A principal limitação do uso de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios é a durabilidade, devido à sua microestrutura e propriedades. No ambiente alcalino da matriz cimentícia, ocorre a degradação das fibras vegetais por mineralização, onde produtos da hidratação, como a Portlandita, migram para as paredes celulares e lúmen das fibras, causando hidrólise alcalina parcial da celulose. Esse ataque alcalino reduz o grau de polimerização das cadeias macromoleculares, fragilizando o concreto pela decomposição química da lignina e hemicelulose (Laverde et al., 2022). A biodegradação dos biocompósitos com fibras vegetais é preocupante, especialmente em ambientes úmidos, durante armazenamento, fabricação ou uso, favorecendo a proliferação de fungos que degradam as fibras naturais (Crawford et al., 2017). Agentes biológicos como bactérias e fungos comprometem a durabilidade das fibras vegetais, provocando mudanças nas propriedades do material por modificação química, reduzindo a hemicelulose e lignina, e significativamente diminuindo a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras (Silva, 2010).

A decomposição dos componentes químicos das fibras vegetais ocorre por ação enzimática dos microrganismos. A taxa de biodeterioração das fibras é determinada pelo teor de lignina, que recobre os outros componentes da estrutura da fibra e é a camada mais resistente. A lignina só pode ser degradada por reações oxidativas catalisadas pela peroxidase, enzima produzida por alguns fungos (Khan e Ahring, 2019). A hemicelulose é mais facilmente degradada devido à sua natureza amorfa, que permite a entrada de umidade e consequentes hidrólises. Por fim, a celulose é degradada por enzimas chamadas celulases (hidrolases), completando a degradação da fibra (Methacanon *et al.*, 2010).

Neste contexto, as AgNPs surgem como uma nova técnica para impedir o crescimento de microrganismos em materiais de construção, em especial os que são excelentes substratos para o desenvolvimento de microrganismos, como os revestimentos (Ogar *et al.*, 2015). A atividade antibacteriana das AgNPs já é comprovada (Morales-Luckie *et al.*, 2016), além de apresentarem promissora atividade antifúngica contra espécies comuns de fungos internos, prevenindo o desenvolvimento de mofo em ambientes internos (Ogar *et al.*, 2015). Estudos com enfoque no tratamento de fibras celulósicas com AgNP costumam utilizar fibras de algodão para conferi-las atividade biocida (Jiang *et al.*, 2010; Pollini *et al.*, 2009). Com exceção o trabalho de Morales-Luckie *et al.* (2016), que tratou fibras de *Agave lechuguilla* e seda com AgNP para aplicações cirúrgicas em sutura. A presente pesquisa, contudo, inova ao estudar a interação fibra-matriz cimentícia, visando a aplicação futura de fibras vegetais tratadas com AgNP como reforço de compósitos cimentícios.

Diversos estudos propõem métodos variados de impregnação de AgNP em fibras e tecidos, especialmente em fibras de algodão, como irradiação ultravioleta (Pollini *et al.*, 2009), eletrodeposição (Jiang *et al.*, 2010) e redução das AgNPs diretamente na fibra (Morales-Luckie *et al.*, 2016). A presente pesquisa propõe um novo método termoquímico de impregnação das AgNP em fibras vegetais, combinando os benefícios da hornificação com a atividade biocida das AgNP. A hornificação visa combater a instabilidade volumétrica das fibras vegetais, uma das principais causas da perda de resistência dos compósitos cimentícios reforçados com esse material (Claramunt *et al.*, 2011).

O objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito do tratamento termoquímico com AgNP na interação fibra-matriz de cimento Portland, além da investigação do comportamento físico e mecânico dessas fibras após o tratamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Foram utilizadas nesta pesquisa fibras vegetais de sisal (*Agave sisalana*), extraída da folha da planta, e obtida em Valente, Bahia. Para o ensaio de arrancamento e verificação da interação fibra-matriz cimentícia, produziu-se uma argamassa autoadensável com os seguintes materiais: cimento Portland CP V – ARI (equivalente a ASTM Type III, e massa específica igual a 3,14 g/cm^3), cinza volante (massa específica igual a 2,15 g/cm^3), sílica ativa (massa específica igual a 2,32 g/cm^3), areia natural peneirada (massa específica igual a 2,61 g/cm^3, $d_{máx}$ = 1,2 mm e módulo de finura igual a 1,64), modificador de viscosidade – VMA (Rheomac UW 410), superplastificante (Plastflow 7550 BI - Viapol®), e água.

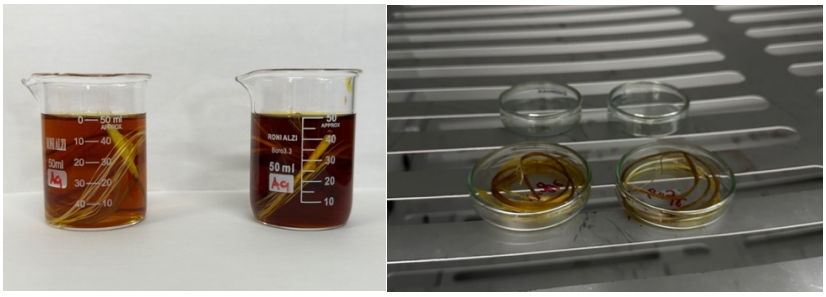
2.2 MÉTODOS

2.2.1 Produção das nanopartículas de prata

A rota de produção das AgNPs foi proposta por Sivaraman et al. (2009), que utiliza ácido tânico como agente redutor e estabilizador, e nitrato de prata como fonte de prata, tendo como produto final AgNP de forma rápida, simples e ecologicamente favorável, e em temperatura ambiente. Foram produzidas AgNP em três concentrações diferentes: 64, 100 e 150 ppm. As variações das concentrações foram obtidas por alterações nas massas de ácido tânico e nitrato de prata para a síntese de AgNP.

2.2.2 Tratamento das fibras vegetais

Inicialmente as fibras foram lavadas com água quente a uma temperatura de 60ºC, para retirada de impurezas provenientes do processo de extração. O tratamento termoquímico (Figura 1) das fibras consistiu em 6 ciclos de molhagem/secagem, sendo 3h de saturação em solução aquosa de AgNP nas 3 concentrações produzidas, em temperatura ambiente, e secagem em estufa por 21h a uma temperatura de 60ºC, totalizando 6 dias de tratamento.



(a) (b)

Figura 1 - Tratamento das fibras com AgNP (a) imersão em solução de AgNP e (b) secagem a 60ºC

2.2.3 Caracterização das fibras vegetais

O índice de cristalinidade (I_c) das fibras vegetais e a detecção da presença de AgNP nas amostras foram realizadas por meio do DRX (Bruker D2 Phaser, com tubo de alvo de cobre, comprimento de onda (λ)

de 0,154060 nm, corrente de 10 mA, tensão de 30 KV, e escala de varredura (2θ) de 5º a 60 º). O I_c, em porcentagem, foi determinado pelo método de Segal, por meio da equação 1:

$$I_c = 1 - \frac{I_1}{I_2} \quad (1)$$

Onde I_1 é a intensidade do mínimo de difração, relacionado a parte amorfa (18º < 2θ < 19º) e I_2 é a intensidade do máximo de difração, relacionado a parte cristalina (22º < 2θ < 23º).

Para mensurar a absorção de água das fibras, cortou-se aproximadamente 1g de cada fibra com 30 mm, seguida da secagem em estufa a 80ºC (24h). Após resfriamento e aferição da massa seca das fibras, elas foram imersas em água. No 8º dia de imersão as fibras foram secas superficialmente com papel absorvente, e pesadas. A absorção de água (A) foi calculada pela equação 2:

$$A\ (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

Sendo P_s a massa da fibra seca em estufa e P_u a massa dela úmida. Para o ensaio de variação dimensional, foram selecionadas 10 amostras de fibras vegetais naturais e tratadas, cada uma com uma fibra de 30 mm de comprimento. Essas foram secas em estufa a 80°C (24h), seguida da medição de seus diâmetros a 1 mm da extremidade da fibra com um microscópio binocular de câmera acoplada (Quimis Q7708S-4, com aumento de 40x), usando o software Motic Image Plus 2.0. Após saturação das amostras por 8 dias em água, novas medições foram realizadas.

Para verificar a resistência à tração direta das fibras antes e após os tratamentos, os diâmetros foram medidos em três pontos igualmente espaçados, utilizando o mesmo microscópio óptico utilizado no ensaio de variação dimensional e seguindo os procedimentos de Silva (2010). As fibras, com comprimento útil de 20 mm, foram fixadas em molduras de papel para melhor alinhamento na máquina universal estática servo-elétrica modelo Autograph AG-IC, da Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN e faixa de carga de 1 kN, a uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min, conforme a norma ASTM C 1557-08.

A aderência fibra-matriz foi avaliada por meio de ensaio de arrancamento. Foram cortados 10 cm de fibras vegetais e medidos seus diâmetros. As fibras foram transpassadas pelos furos centrais de suportes de acrílico com tubos de PVC de 2 cm de diâmetro e altura, fixadas na parte inferior com fita adesiva, e os moldes foram preenchidos com argamassa fluida. A matriz foi confeccionada com a proporção de 1:1:0,35 (ligante: areia: água), 0,1% de VMA e 1,4% de superplastificante. Entende-se por ligante a junção do cimento com 10% de sílica ativa e 40% de cinza volante, para reduzir a alcalinidade e aumentar a durabilidade das fibras na matriz.

Ao 7º dia de cura úmida, os corpos de prova foram ensaiados em texturômetro (TA XT PLUS Texture Analyzer, da Stable Micro Systems), com capacidade de carga de 50 N e taxa de deslocamento de 0,2 mm/s. A tensão adesional máxima foi calculada a partir da carga máxima de arrancamento da fibra.

$$\sigma_{ad} = \frac{P_{máx}}{2\pi r l} \quad (3)$$

Onde σ_{ad} é a tensão adesional, $P_{máx}$ é a carga máxima de arrancamento da fibra, r é o raio da fibra e l é o comprimento de fibra embebido na matriz cimentícia, que nesse caso é 20 mm.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos foram tratados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA) de fator único e pelo teste comparativo de médias de Tukey, com nível de significância (α) de 0,05, com auxílio do software Statistica®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS VEGETAIS

3.1.1 Difração de Raio-X

A Figura 2 apresenta os difratogramas das fibras de sisal natural e tratadas e a Tabela 1 apresenta os índices de cristalinidade calculados para essas fibras.

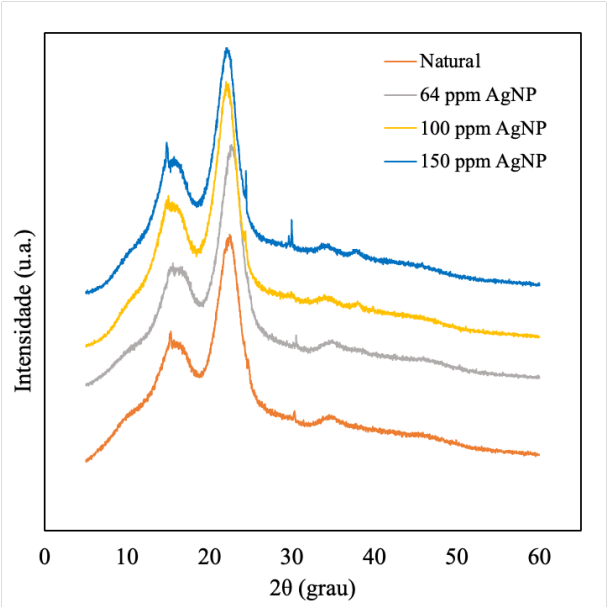


Figura 2 - Difratogramas das fibras vegetais de sisal

Tabela 1 - Índice de cristalinidade das fibras vegetais naturais e tratadas

Fibra	Tratamento			
	Natural	AgNP 64 ppm	AgNP 100 ppm	AgNP 150 ppm
Sisal (%)	58,74	63,60	62,78	61,38

Xu *et al.* (2006) que trataram fibras poliméricas de PLA com revestimento de AgNP por eletrodeposição encontraram picos no difratograma das fibras analisadas nos ângulos 2θ de 37º e 45º, que eles atribuíram aos cristais Ag, por corresponderem aos planos de difração do metal prata. Assim, os autores inferiram que correspondem as AgNP embutidas nas fibras de PLA. Conforme pode ser visto no difratograma apresentado na Figura 2, onde há a formação de discretos picos no ângulo 2θ de 37º e que se intensifica com o aumento da concentração de AgNP.

A Tabela 1 apresenta o índice de cristalinidade das fibras de sisal antes e após os tratamentos realizados. Observa-se, que após os tratamentos térmoquímico as fibras apresentaram um aumento desse parâmetro, variando seus índices de cristalinidade de 58,74% para 63,60%, com aumento máximo de 8,3%. O aumento do índice de cristalinidade está relacionado à cristalinidade da celulose e ao fortalecimento das pontes de hidrogênio proveniente do tratamento térmico com os ciclos de molhagem e secagem (Ferreira *et al.*, 2017). De acordo Gümüskaya *et al.* (2003), o grau de cristalinidade da celulose é um dos parâmetros mais importantes da estrutura cristalina, já que com o aumento da proporção de regiões cristalinas para amorfos, ocorre um aumento da rigidez das fibras de celulose e diminuição de sua flexibilidade.

3.1.2 Absorção de água

A partir dos resultados médios da capacidade de absorção de água das fibras vegetais estudadas, obteve-se uma absorção de água no valor de 153,1% para a fibra de sisal natural e 117,4% para a fibra de sisal tratada com nanopartículas de prata na concentração de 100 ppm. Ou seja, o tratamento com AgNP gerou uma redução de 23,3% na capacidade de absorção de água da fibra de sisal.

As fibras tratadas com AgNP no teor de 100 ppm mostraram uma menor absorção de água comparadas os naturais, possivelmente devido à hidrofobicidade conferida pelo recobrimento com as nanopartículas. Jiang *et al.* (2010) notaram hidrofobicidade em tecidos de poliéster tratados com AgNP por eletrodeposição, atribuindo ao preenchimento dos vazios entre os fios pelas nanopartículas, fenômeno que também pode ter ocorrido nas fibras vegetais tratadas com AgNP, nesta presente pesquisa. Além disso, tratamentos térmicos como a hornificação reduz o tamanho dos poros na parede da fibra, diminuindo, assim, a absorção de água (Ballesteros *et al.*, 2017).

3.1.3 Variação dimensional

A variação volumétrica é um importante parâmetro a ser analisado, uma vez instabilidades volumétricas acabam resultando em perdas parciais da aderência fibra-matriz (Ferreira *et al.*, 2017). A Figura 3 apresenta os valores médios das fibras de sisal naturais e tratadas, submetidas ao ensaio de variação dimensional.

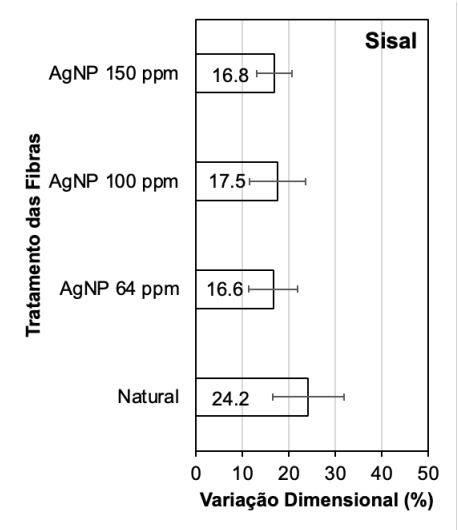


Figura 3 - Valores médios de variação dimensional das fibras de sisal naturas e tratadas

A análise de variância (ANOVA) da variação dimensional das fibras vegetais mostrou que os tratamentos resultaram em alterações estatisticamente significativas para as fibras de sisal ($F = 7,6959$ e $p = 0,0004$). O teste das médias de Tukey revelou que, para nas fibras de sisal, houve diferença significativa entre fibras naturais e tratadas com AgNP, com aumento da estabilidade dimensional. Entre as fibras de sisal tratadas com AgNP nos diferentes teores, não houve diferença significativa. O tratamento térmico com ciclos de molhagem e secagem, justificam esta redução da variação dimensional, como também foi constatado nas pesquisas de Ballesteros *et al.* (2017) e Ferreira *et al.* (2017), que os últimos autores atribuem a redução do tamanho dos lúmens das fibras, que diminui a absorção de água e a variação dimensional. Além disso, a maior estabilidade dimensional das fibras de sisal tratadas com AgNP se deve a menor capacidade de absorção de água, resultando em menos inchamento da fibra.

3.1.4 Tração direta

Os resultados obtidos a partir do ensaio de tração direta das fibras de sisal naturais e tratadas com AgNP são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo dos valores médios e desvio padrão das propriedades de tração das fibras ensaiadas

Tratamento		Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (%)	Área (mm²)
Natural		419 ± 138	14,9 ± 4,0	3,8 ± 0,5	0,039 ± 0,016
Tratada com AgNP (ppm)	64	386 ± 93	9,3 ± 2,2	5,0 ± 0,9	0,034 ± 0,011
	100	400 ± 82	10,5 ± 2,5	4,7 ± 0,6	0,036 ± 0,013
	150	399 ± 116	8,9 ± 2,8	5,9 ± 1,3	0,027 ± 0,010

A partir da análise estatística das variâncias (ANOVA), observou-se que não houve diferença estatisticamente significante ($\alpha = 0,05$) entre as resistências à tração das fibras nas condições: natural e tratadas com AgNP ($F = 1,4715$ e $p = 0,2217 > 0,05$).

No entanto, com relação ao módulo de elasticidade das fibras tratadas com AgNP, observou-se uma redução de 40% desse parâmetro ($F = 6,7752$ e $p = 0,002 < 0,05$), promovendo uma maior deformabilidade das fibras tratadas, expressa pela maior taxa de deformação dessas fibras. A análise das médias Tukey permitiu observar que o módulo de elasticidade das fibras de sisal tratadas com AgNP são iguais entre si e diferem da fibra de sisal natural. A redução desse parâmetro está relacionada ao aumento do índice de cristalinidade das fibras após os tratamentos, acompanhada do seu aumento de rigidez (Gümüskaya *et al.*, 2003). O aumento da cristalinidade da celulose, por sua vez, está relacionado ao fortalecimento das pontes de hidrogênio proveniente do tratamento térmico com os ciclos de molhagem e secagem (Ferreira *et al.*, 2017).

3.1.5 Aderência fibra-matriz

A Tabela 3, Figura 4 apresentam os resultados obtidos com o ensaio de arrancamento das fibras de sisal. A partir da análise estatística constatou-se as significâncias estatísticas para as fibras de sisal ($F = 0,2414$ e $p = 0,8665 > 0,05$).

Tabela 3 - Tensão adesional para ensaio de arrancamento das fibras de sisal natural e tratadas.

	Natural	AgNP 64 ppm	AgNP 100 ppm	AgNP 150 ppm
Tensão Adesional (MPa)	0,22 (0,05)	0,25 (0,04)	0,27 (0,04)	0,25 (0,11)

Os valores de tensão adesional para as fibras tratadas com AgNP foram estatisticamente iguais as suas respectivas fibras naturais. Este comportamento indica que tal tratamento não gerou alteração na adesão química e mecânica das fibras à matriz cimentícia. Tratamentos témicos como a hornificação permitem alcançar uma maior ligação fibra-matriz melhorando também o mecanismo de fricção, desde que o número de ciclos não gere danos à estrutura da fibra (Ferreira *et al.*, 2017). Embora o tratamento com AgNP tenha sido uma adaptação da hornificação, cujo fluido de imersão foi alterado de água para soluções aquosas de AgNP, as modificações geradas pelo pH ácido (entre 3,51 e 4,96) dessas soluções na cadeia de celulose (responsáveis pelo desempenho mecânico das fibras), podem

ter impedido que a estabilidade dimensional e alterações morfológicas superficiais nessas fibras, provenientes do tratamento, beneficiassem a interação fibra-matriz cimentícia, não havendo assim os mesmos incrementos na tensão adesional obtida nas fibras puramente hornificada.

Com relação ao comportamento típico da curva força-deslizamento, observou-se uma maior tendência das fibras de sisal ao escorregamento das fibras, havendo fricção da fibra ao longo da matriz cimentícia, num comportamento *softening*. Com exceção das fibras de sisal tratadas com AgNP na concentração de 100 ppm, nas quais há uma mudança de comportamento das curvas força-deslizamento, que passa a ter um comportamento *hardening*. De acordo com Castoldi *et al.* (2023), essa alteração pós-pico pode ser atribuída ao aumento da rugosidade superficial da fibra, promovendo uma adesão friccional mais eficaz da fibra na matriz.

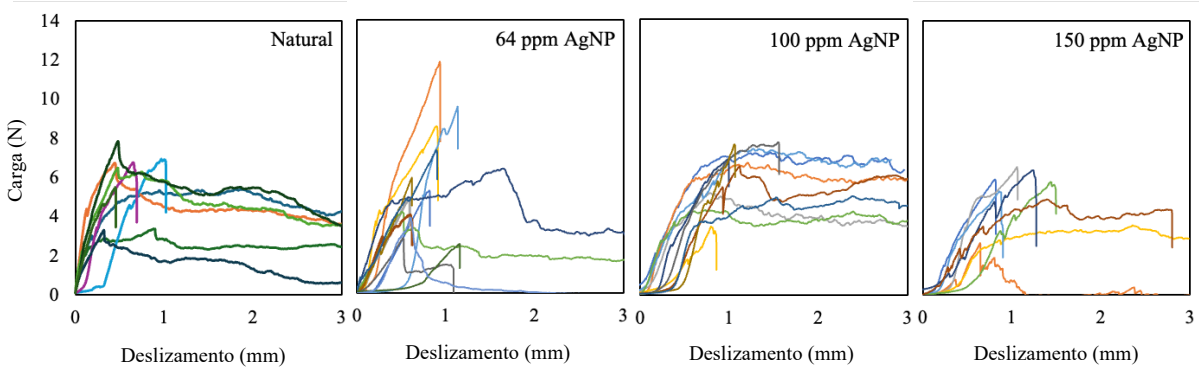


Figura 4 - Curvas do ensaio de arrancamento das fibras de sisal.

4 CONCLUSÕES

Após o tratamento termoquímico com AgNP e os ensaios de caracterização das fibras vegetais de sisal naturais e tratadas, conclui-se que:

- As fibras vegetais tratadas com AgNP apresentaram menor capacidade de absorção de água e consequentemente melhor estabilidade dimensional quando comparadas às fibras naturais.
- A resistência à tração das fibras com AgNP não variou significativamente em comparação com as fibras naturais. Porém, o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da cristalinidade.
- As fibras vegetais tratadas com AgNP não alteraram significativamente sua resistência ao arrancamento, como ocorreu nas fibras hornificadas que aumentaram a tensão adesional.
- Observou-se uma mudança de comportamento da curva força-deslizamento das fibras de sisal tratadas com 100 ppm de *softening* para *hardening,* podendo ser atribuída a alterações na morfologia superficial da fibra, favorecendo sua adesão friccional.

REFERÊNCIAS

Ballesteros, J.M. *et al.* (2017) Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. Celullose 24:2275–2286.

Castoldi, R.S. *et al.* (2023) Effect of surface modification of sisal fibers with polyphenols on the mechanical properties, interfacial adhesion and durability in cement-based matrices. Celullose 30:4315–4336.

Crawford, B. *et al.* (2017) Effect of fungal deterioration on physical and mechanical properties of hemp and flax natural fiber composites. Materials, 10:1252.

Ferreira, S. R. *et al.* (2017) Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. Const. and Build. Materials, 139:551–561.

Gümüskay, E. *et al.* (2003) The effects of various pulping conditions on crystalline structure of cellulose in cotton linters. Polymer Degradation and Stability 81(3):559-564.

Jiang, S. X. *et al.* (2010) Surface functionalization of nanostructured silver-coated polyester fabric by magnetron sputtering. Surface and Coatings Technology, 204:3662–3667.

Khan M., Ahring B. (2019) Lignin degradation under anaerobic digestion: influence of lignin modifications - a review, Biomass Bioenerg. 128:105325.

Laverde, V. *et al.* (2022) Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. Construction and Building Materials, 340:127729.

Methacanon P. *et al.* (2010) Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles, Carbohydr. Polym. 82:1090–1096.

Morales-Luckie, R. A. *et al.* (2016) Synthesis of silver nanoparticles using aqueous extracts of Heterotheca inuloides as reducing agent and natural fibers as templates: Agave lechuguilla and silk. Materials Science and Engineering C 69:429–436.

Ogar, A. *et al.* (2015) Antifungal properties of silver nanoparticles against indoor mould growth. Science of the Total Environment, 521–522: 305–314.

Pollini, M. *et al.* (2009) Characterization of antibacterial silver coated yarns. J Mater Sci: Mater Med 20:2361–2366.

Silva, A.G.C. (2010) Biodeterioração da fibra de sisal em compósitos à base de cimento. 128 f. Dissertação – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

Sivaraman, S. K. *et al.* (2009) A green protocol for room temperature synthesis of silver nanoparticles in seconds. Current Science, 97(7):1055-1059.

Xu, X. *et al.* (2006) Biodegradable electrospun poly(l-lactide) fibers containing antibacterial silver nanoparticles, European Polymer Journal, 42(9):2081-2087.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Desenvolvimento de argamassa de assentamento e revestimento com conchas de sururu descartadas do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba, Alagoas - Brasil

Renato Carvalho Menezes[a]; Sheyla Karolina Justino Marques[b]; Ronny Francisco Marques de Souza[c]

[a] IFAL - Instituto Federal de Alagoas, Rua Lourival Alfredo, Nº 176, Poeira, 57160-000, Marechal Deodoro - Alagoas, Brasil, renato.menezes@ifal.edu.br

[b] IFAL - Instituto Federal de Alagoas, Rua Lourival Alfredo, Nº 176, Poeira, 57160-000, Marechal Deodoro - Alagoas, Brasil, sheyla.marques@ifal.edu.br

[c] IFAL - Instituto Federal de Alagoas, Rua Lourival Alfredo, Nº 176, Poeira, 57160-000, Marechal Deodoro - Alagoas, Brasil, ronny.souza@ifal.edu.br

RESUMO

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba possui grande importância socioeconômica, pois em toda sua extensão há reprodução de peixes, crustáceos e moluscos, que garantem o sustento dos pescadores e marisqueiros da região. Entre os moluscos, o sururu (mytella falcata e mytella charruana) está entre os mais procurados devido seu valor na culinária alagoana. Após a pesca, suas conchas são depositadas em terrenos baldios, vias públicas e às margens das lagoas, gerando diversos impactos ambientais. Esta pesquisa avaliou a viabilidade técnica de produção de argamassa de assentamento e revestimento com a incorporação da concha de sururu em substituição parcial da areia. Foi observado que a incorporação de concha de sururu na argamassa, resultou na diminuição da resistência mecânica à compressão e no aumento da absorção de água. Os resultados indicaram que todas as argamassas produzidas apresentaram resistência mecânica à compressão acima da mínima prevista para este uso. Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, as argamassas com substituição de até 20%, apresentaram coeficientes de absorção de água semelhantes à argamassa convencional.

Palavras-chave: Moluscos; Subproduto; Complexo lagunar; Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

O estado de Alagoas possui entre suas riquezas naturais o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba – CELMM. O complexo é composto pelas lagoas Mundaú e Mangaba, rios Paraíba, Sumuaúma e Mundaú. Este complexo possui uma área total de aproximadamente 81 km² e banha as cidades de Maceió, Rio Largo, Satuba, Santa Luzia do Norte, Roteiro, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro e Pilar (DUARTE, 2010).

O CELMM é de grande importância econômica para a região, pois, em toda sua extensão há reprodução de peixes, crustáceos e moluscos, como sururu e maçunim. Fatores abióticos como a salinidade da água proporcionam um habitat adequado e regulam a quantidade e distribuição destes animais. A temperatura das águas, com média anual de 24°C, varia pouco ao longo do ano (SILVA *et al.*, 2007).

O sururu é um organismo vivo que pertence ao Reino *Animalia* e ao filo *Mollusca,* como o maçunim e a ostra por exemplo. O filo dos moluscos abrange 120 mil espécies e é composto por seis classes: *Gastropoda, Bivalvia, Cephalopoda, Scaphopoda, Polyplacophora* e *Aplacophora* (COUTINHO *et al*., 2014). O sururu possui um exoesqueleto e seu corpo vive dentro de uma concha formada por duas partes iguais, chamadas de valvas, que são unidas por um ligamento (FERREIRA; MAGALHÃES, 1995); por isso, classifica-se na classe *Bivalvia*, a qual possui cerca de 20 mil espécies.

A ordem a qual pertence o sururu é a *Mytiloida* e a família *Mytilidae*, que englobam os moluscos bivalves conhecidos como mexilhões. Os gêneros mais comuns encontrados são: *Mytilus*, *Perna* e *Mytella*. Quanto à espécie predominante no CELMM foram encontrados registros divergentes na literatura. Alguns adotam *Mytella charruana* (LIMA, 2015) e outros *Mytella falcatus* (COUTINHO *et al.*, 2014).

Um dos principais pratos da culinária alagoana, o sururu possui importância econômica, social e cultural. É uma importante fonte de proteína, de baixo custo, sendo um dos principais alimentos para pescadores e marisqueiros que vivem da pesca e extração do molusco. Entretanto, também é bastante comercializado em bares e restaurantes, e em 2014, foi aprovado por unanimidade pelo Conselho Estadual da Cultura como Patrimônio Imaterial de Alagoas.

As atividades de pesca, beneficiamento e comercialização do sururu são informais e de subsistência, pois são desenvolvidas por comunidades em vulnerabilidade social que encontram nestas tarefas a oportunidade de obter renda e de alimentar a família, em um ambiente com precariedade de saneamento, higiene e segurança.

A produção do sururu é exclusivamente através da pesca, não há registro do cultivo do molusco em Alagoas. Em 2011, o sururu representou 15% dos moluscos extraídos no Brasil, sendo a segunda espécie de molusco mais capturada (2.133,3 toneladas), atrás apenas do mexilhão (3.772,5 toneladas) (BRASIL, 2012). Em 2007, 21,5% da produção nacional adveio de Alagoas, demonstrando a importante participação da atividade no Brasil (COUTINHO *et al*., 2014).

De acordo com levantamento realizado por Coutinho *et al.* (2014), na região da lagoa Mundaú, são extraídas diariamente, em média, 20 toneladas de sururu, das quais apenas 2,5 toneladas são filé e 18,3 toneladas são resíduos, ou seja, as conchas, indicando um rendimento aproximado de 12% na relação entre a quantidade de sururu pescado e de filé. Com uma estimativa anual de pesca de aproximadamente 5 mil toneladas de sururu, tem-se cerca de 4.399 toneladas de conchas por ano (COUTINHO *et al*., 2014).

Após o processamento, os marisqueiros costumam descartar as conchas do sururu e do maçunim em locais inadequados como terrenos baldios, vias públicas e às margens das lagoas, gerando diversos impactos ambientais como: contaminação do lençol freático por causa do chorume, proliferação de vetores de doenças infecciosas como roedores, moscas e mosquitos, assoreamento das lagoas e dos rios, prejudicando a navegação, aterramento dos mangues, causando o afastando de animais típicos como caranguejo e aratu, além do aumento no volume de resíduos sólidos urbanos.

Pesquisas realizadas indicam que a concha dos moluscos é uma fonte valiosa de cálcio. Segundo Liao et al (2019) elas são constituídas basicamente de Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$), uma substância química utilizada em larga escala em diversos ramos para a produção de cal (virgem e hidratada), rações, adubos, espuma de polietileno, medicamentos, e construção civil. Diversos pesquisadores ao redor do mundo, tem estudado a viabilidade da utilização de conchas de moluscos na produção de concreto, argamassas, elementos pré-moldados, suplementação alimentar de animais e na produção de adubo orgânico.

Alguns grupos de pesquisa têm demonstrado a viabilidade técnica da incorporação de conchas de moluscos em argamassa e concreto. Olívia et al. (2015) utilizaram conchas de berbigão moídas como substituto parcial do cimento no concreto obtendo resultado de resistência à compressão satisfatório em amostra com percentual de 4% de substituição. Nguyen et al. (2017) estudaram o efeito da substituição do agregado natural por 60% de conchas processadas de crepidula e vieira no concreto permeável, encontrando resultados aceitáveis de resistência mecânica e durabilidade de congelamento/descongelamento para áreas de estacionamento de baixo tráfego. Lertwattanaruk et al. (2012) investigaram o efeito da substituição de até 20% do cimento por resíduos de amêijoas de pescoço curto, mexilhões verdes, ostras e berbigões no desenvolvimento de uma argamassa para alvenaria e reboco, obtendo resistência adequada e menor condutividade térmica em relação à argamassa convencional. Martínez-García et al. (2019) estudaram o efeito da substituição de areia por conchas dos mexilhões em diferentes substituições na argamassa, observando que as partículas formam vazios irregulares, alterando a distribuição dos poros e aumentando a demanda por água.

Até os dias atuais, poucas pesquisas sobre a incorporação da casca do sururu em materiais cimentícios foram desenvolvidas e publicadas, com isso, este estudo buscou testar e analisar o comportamento de uma argamassa de assentamento e revestimento com a incorporação de conchas de sururu para adequação da destinação final dos resíduos desta atividade.

Estima-se que a argamassa proposta neste trabalho poderá representar uma alternativa ao desequilíbrio ambiental gerado nas atividades de coleta e processamento dos moluscos no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba - CELMM, pois o produto desenvolvido abre um caminho para reutilização do principal resíduo gerado na sua cadeia produtiva. Além da contribuição ambiental, acredita-se que a pesquisa com a argamassa, apresenta importantes contribuições sociais e econômicas, visto que o desenvolvimento de novos ecomateriais inovam o setor produtivo e abrem o caminho para a realização de novos arranjos.

Nesse sentido, a fabricação da argamassa incorporada com a concha de sururu pode viabilizar parcerias com associações e/ou cooperativas de pescadores e marisqueiros locais, gerando emprego e renda. Esta produção está alinhada com atuais modelos de economia e gestão ambiental, as quais substituem um conceito de “fim de vida” de um produto da economia linear, onde os resíduos são descartados, por novos ciclos de economia circular, onde os resíduos recuperados, reutilizados ou reciclados tornam-se insumos de novos processos.

2 DADOS E MÉTODOS

A primeira etapa da pesquisa correspondeu à fase de caracterização das conchas de sururu. Esta etapa contemplou os processos de coleta, limpeza e trituração das conchas para submissão às análises laboratoriais de Termogravimetria, Difração de raios X, Fluorescência de raios X e análise granulométrica, a fim de conhecer suas composições físico-químicas.

Na segunda etapa foram realizados o planejamento, estudo do traço e execução dos processos de desenvolvimento da argamassa como: determinação das dosagens, relação água/cimento, granulometrias, percentuais de substituição da areia por conchas de sururu e preparação das argamassas e corpos de provas para realização dos ensaios laboratoriais.

Na terceira etapa foram realizados ensaios laboratoriais com as unidades amostrais para mensuração de propriedades físicas da argamassa como resistência mecânica à compressão, absorção de água por capilaridade e microscopia eletrônica de varredura.

As amostras de conchas de sururu foram coletadas às margens da via pública da orla lagunar, no bairro do Vergel do Lago em Maceió, Alagoas (Latitude: 9º 39’ 00” S; Longitude: 35º 45’ 18” W). Após a coleta, as amostras foram submetidas ao processo de limpeza e higienização com água e sabão neutro líquido para retirada da matéria orgânica residual do molusco. Posteriormente, as conchas foram expostas ao sol para secagem.

Para confecção dos corpos de prova de argamassa, foi realizada a trituração das conchas de sururu com o auxílio de um liquidificador adaptado com copo confeccionado em aço inox. O equipamento possui uma capacidade de aproximadamente 600 ml e o tempo de processamento para cada copo com concha de sururu foi de aproximadamente 20 segundos.

As conchas de sururu foram processadas de forma satisfatória, porém não apresentaram homogeneidade no tamanho dos seus grãos. Com isso, foi necessário realizar posteriormente o peneiramento das conchas de sururu para padronização da granulometria, onde a concha do sururu foi separada em grãos de tamanho médio (de 0,60 mm a 0,30 mm) com a finalidade de substituição parcial da areia média na confecção dos corpos de prova.

Para esta pesquisa, foi definido que a concha de sururu triturada substituiria parcialmente a areia média com percentuais de substituição entre 0% (testemunha) e 50%, com isso, foram confeccionadas 6 formulações (tratamentos) diferentes conforme relacionados na tabela 1:

Tabela 1 – Percentuais de substituição nas diversos formulações

FORMULAÇÕES	PERCENTUAL DE AREIA	PERCENTUAL DE CONCHA DE SURURU
T1	100%	0%
T2	90%	10%
T3	80%	20%
T4	70%	30%
T5	60%	40%
T6	50%	50%

O traço adotado para esta pesquisa foi de 1:3, ou seja, para cada parte de cimento foram adicionadas 3 partes de areia, conforme recomenda a ABCP no manual de revestimentos de argamassa (2002). A NBR 7215 (ABNT, 1996), Cimento Portland - determinação de resistência à compressão, também recomenda o traço de 1:3 para argamassas e estabelece a relação água / cimento numa proporção de 0,48, ou seja, o volume de água corresponderá a 48% do volume de cimento contido na amostra confeccionada. A proporção utilizada na composição do agregado miúdo foi 25% de areia fina e 75% de areia média.

O tipo de cimento escolhido foi o cimento Portland CPII-32-Z, pois é destinado à produção de argamassas de assentamentos e revestimentos, estruturas em concreto armado, concreto massa e concreto para pavimentos, além de ser facilmente encontrado no mercado da construção civil.

A figura 1 apresenta o fluxograma de processos realizados durante a pré-produção (ciclo 1), desde a coleta das amostras até a homogeneização do pó de concha de sururu em granulometria média; e, dos processos de produção (ciclo 2) da argamassa, desde a mistura até a moldagem dos corpos de prova.

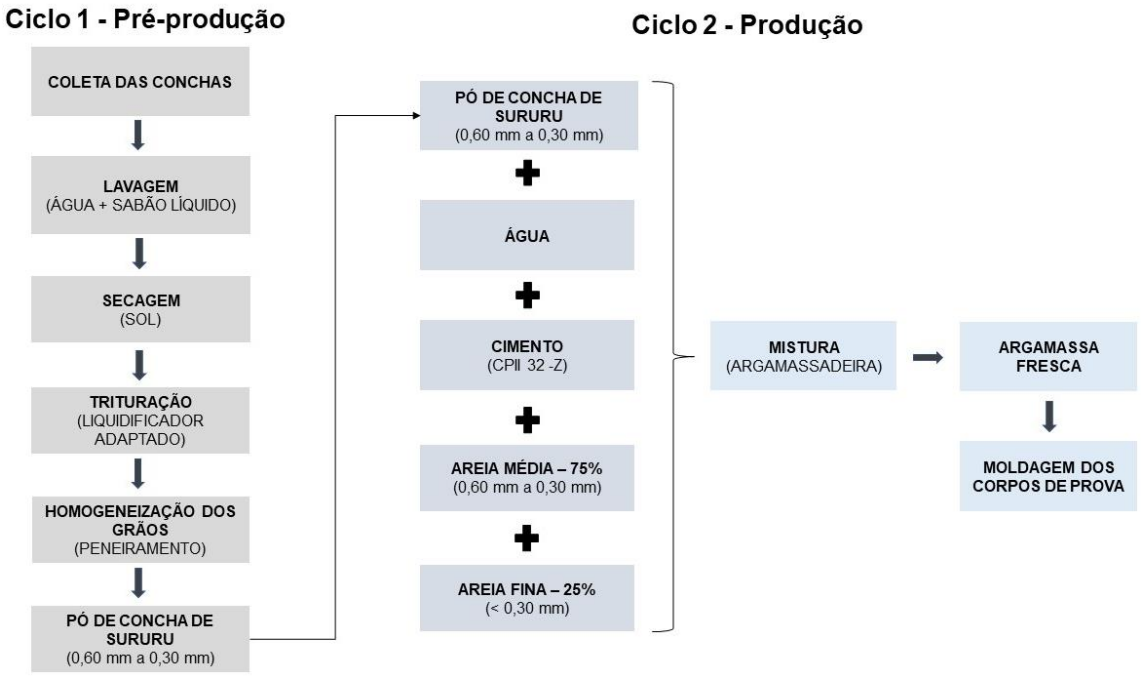


Figura 1 – Fluxogramas de processos de pré-produção (ciclo 1) e de produção (ciclo 2) da argamassa

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios realizados no desenvolvimento da argamassa de assentamento e revestimento com conchas de sururu.

3.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Analisando a figura 2 observa-se que ocorreu uma perda de massa do material em 4,231%, quando a amostra foi submetida a uma faixa de temperatura de 200 a 600°C. Esse comportamento foi atribuído por Rodriguez Álvaro (2014) à desidratação dos compostos orgânicos voláteis da amostra.

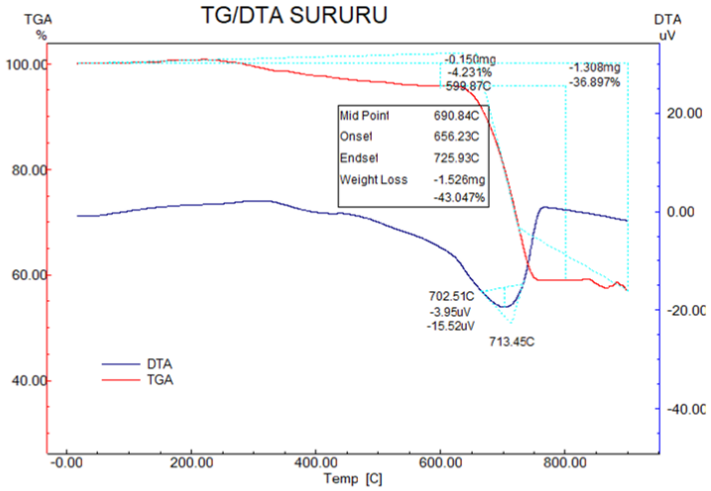


Figura 2 – Análise Termogravimétrica da amostra da concha de sururu triturada

Com a elevação da temperatura o material apresentou uma redução de 36,89% do total da sua massa, quando a temperatura variou entre 600ºC e 700ºC, indicando que esta é a faixa de temperatura de decomposição térmica. Segundo Rodriguez Álvaro (2014), a uma temperatura entre 670ºC e 800ºC, ocorre o processamento principal da reação térmica, a descarbonatação de carbonato de cálcio, com perdas de massa na ordem de 40%.

Rocha et al. (2004) e Lertwattanaruk et al (2012), em estudo com conchas de moluscos, também afirmaram que essa perda de massa pode ser atribuída à decomposição do carbonato de cálcio com formação de óxido de cálcio e liberação do dióxido de carbono. Portanto, os dados apresentados no gráfico 1, demonstram resultados de análise térmica semelhantes aos de pesquisas realizadas com conchas de outros moluscos bivalves.

3.2 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X – FRX

Observa-se na tabela 2 que o Cálcio (Ca) é o elemento majoritário, apresentando uma concentração de aproximadamente 91,39% dos minerais contidos na amostra e é encontrado principalmente na forma de carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

Tabela 2 – Análise de Fluorescência de Raios X dos minerais da amostra da concha de sururu triturada.

ELEM. QUÍMICOS	Ca	Na	Sr	Fe	S	Si	Al	Sc	Cr
%	91.391	3.752	3.727	0.361	0.294	0.254	0.122	0.064	0.036

Percebe-se ainda na tabela 2 que a concha de sururu possui outros elementos em sua composição, como o Sódio (Na), Estrôncio (Sr), Ferro (Fe), Enxofre (S), Silício (Si), Alumínio (Al), Escândio (Sc) e Crômio (Cr), que podem estar incorporados à estrutura da concha ou serem provenientes de material aderido à sua superfície (SILVA *et al.*, 2010).

Para Rocha *et al.* (2004), através da análise química, verifica-se que a concha de sururu apresenta uma baixíssima atividade pozolânica, devido aos baixos teores de sílica encontrados na amostra, não podendo neste caso substituir o cimento e sua utilização em materiais cimentícios fica limitado ao uso como agregado. Para Liao (2019), o pó de concha de ostra é um elemento inerte que em nenhum caso poderá exercer a função do cimento em materiais compósitos.

3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X – DRX

O figura 3 exibe os picos correspondentes a diferentes compostos químicos encontrados na amostra. Foram identificadas fases de carbonato de cálcio, óxido ferroso, óxido de alumínio, silicato de cálcio e sulfato de sódio. Este ensaio corroborou com o ensaio de FRX, comprovando o alto teor de carbonato de cálcio na amostra.

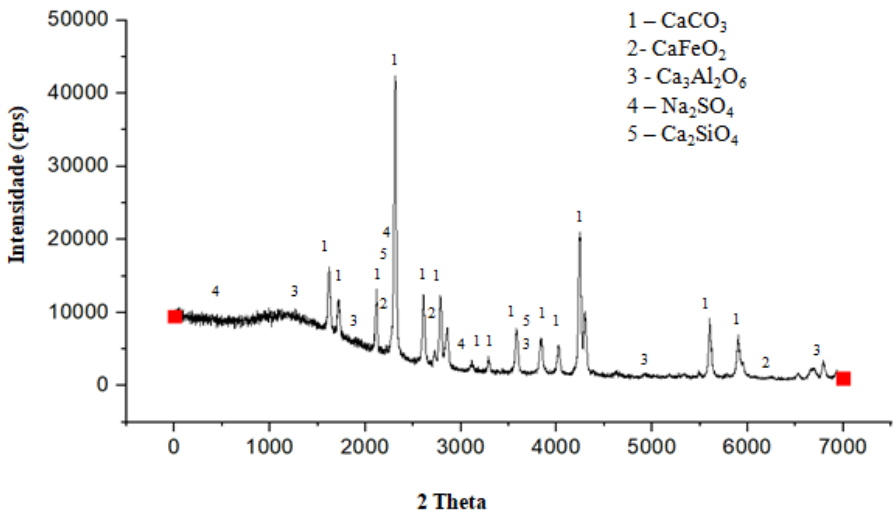


Figura 3 – Análise de DRX da amostra da concha de sururu triturada

Lertwattanaruk et al (2012) realizaram análises DRX em conchas de mexilhões e observaram picos que evidenciam a presença de variedades polimórficas de carbonato de cálcio, principalmente na forma de calcita e aragonita.

Silva *et al,* (2010) afirma que a porcentagem de aragonita / calcita na microestrutura e orientação cristalina das conchas de moluscos pode variar dependendo do molusco e da região onde se desenvolve.

3.4 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Observa-se na figura 4, que o material possui distribuição granulométrica com diâmetro das partículas variando entre 0,15mm e 4,80mm, sendo 29,22% retidas na faixa de classificação de areia grossa, 62,54% na faixa de areia média e 8,33% na classificação de areia fina.

Como o intuito da pesquisa é substituir parcialmente a areia média por concha de sururu, verificou-se que a forma de trituração aplicada obteve resultado satisfatório para confecção da argamassa.

Conforme demonstrado pela tabela 3, observou-se que a casca de sururu triturada apresentou maiores percentuais de grãos nas classificações granulométricas grossa e média e menor percentual na granulometria fina em comparação aos grãos da areia. Cabe ressaltar, que pó das conchas de sururu foi obtido através de um processo de trituração, que pode ser ajustado para a obtenção de grãos mais finos.

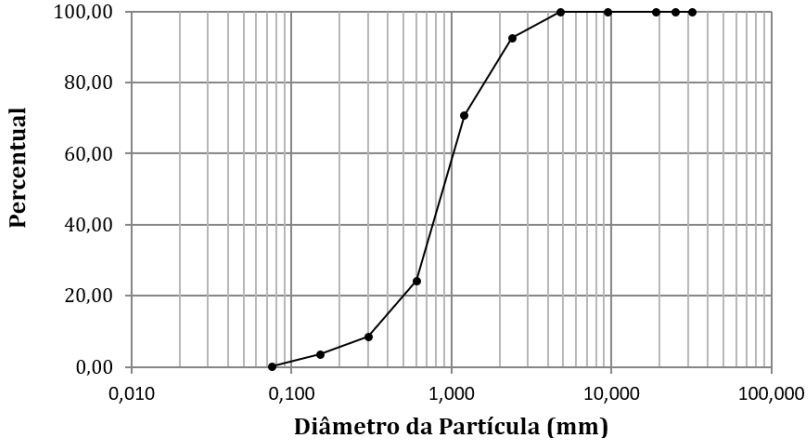


Figura 4 – Curva granulométrica da concha de sururu triturada.

Tabela 3 – Comparativo entre os percentuais de granulometria da areia e da concha de sururu triturada.

GRANULOMETRIA	CONCHA DE SURURU TRITURADA (%)	AREIA (%)
Grossa	29,22	15,37
Média	62,54	57,61
Fina	8,33	27,32

3.5 ENSAIOS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 4 estão apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão de 4 corpos de prova, para cada formulação, após 14 e 28 dias de cura.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

FORMULAÇÃO	RESISTÊNCIA 14 DIAS (MPa)	VARIAÇÃO (%)	RESISTÊNCIA 28 DIAS (MPa)	VARIAÇÃO (%)
T1 - 0%	22,21	-	28,15	-
T2 - 10%	15,98	- 28,05	18,82	- 33,14
T3 - 20%	9,64	- 56,59	11,28	- 59,92
T4 - 30%	8,36	- 62,35	10,46	- 62,84
T5- 40%	7,55	- 66,00	9,71	- 65,50
T6- 50%	7,28	- 67,22	8,36	- 70,30

Os resultados dispostos na tabela 4 demonstram que a substituição da areia pelas conchas de sururu trituradas, resultou na diminuição da resistência à compressão das argamassas. Comparando-se as formulações contendo concha de sururu triturada com a argamassa de referência T1 (0%), observou-se que após 28 dias de cura, a resistência a compressão decaiu 33,14% na formulação com teor de 10% de concha de sururu (T2) e 70,30% na formulação com teor de 50% de concha de sururu (T6).

Os resultados de decaimento da resistência à compressão coincidem com os estudos de Yoon (2003), Yoon (2004), Rocha *et al.* (2004) e Lertwarttanaruk *et al*. (2012). Para Rocha *et al.* (2004) os resultados mostraram uma relação diretamente proporcional e um comportamento praticamente linear, onde quanto maior o teor de concha de sururu, menor foi a resistência à compressão alcançada. O autor aborda que a forma lamelar da concha de sururu triturada, ou seja, a pequena espessura em relação à outras dimensões, prejudica a formação da microestrutura dos materiais cimentícios, podendo acumular água ou grande quantidade de vazios, tornando-a cada vez mais porosa e diminuindo assim a sua resistência à compressão.

Para argamassas com a finalidade de assentamento e revestimento, Recena (2012) afirma que a resistência à compressão deverá estar situada entre 2 MPa e 3 MPa, sendo este valor uma referência efetiva, que estabelece um padrão de comparação na dosagem da argamassa ou no controle de sua produção. A norma NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos (ABNT, 2005), admite que as argamassas devem ter resistências à compressão mínimas de

2MPa. Desta forma, todas as formulações testadas obtiveram os valores acima dos mínimos recomendados pela literatura e normas técnicas quanto ao uso para assentamento e revestimento.

3.6 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de determinação da absorção por capilaridade foi realizado conforme parâmetros determinados pela norma NBR 9779 (ABNT, 2012). Na tabela 5 estão dispostos os coeficientes de absorção de água por capilaridade (valores médios) encontrados para as diferentes formulações, nos períodos de 03, 06, 24, 42 e 72 horas.

Tabela 5 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade (g/cm²) e altura média (cm).

FORMULAÇÃO	TEMPO (HORAS)					ALTURA MÉDIA (CM)
	3h	6h	24h	42h	72h	
T1 - 0%	0,189	0,253	0,401	0,498	0,555	2,8
T2 - 10%	0,190	0,251	0,391	0,486	0,547	2,78
T3 - 20%	0,192	0,258	0,402	0,501	0,562	2,88
T4 - 30%	0,214	0,290	0,455	0,574	0,644	3,28
T5 - 40%	0,348	0,460	0,706	0,849	0,890	4,78
T6 - 50%	0,489	0,599	0,825	0,955	1,029	4,88

Analisando a tabela 5 observa-se que a absorção de água por capilaridade foi maior nos corpos de prova com maiores percentuais de substituição de areia por concha de sururu (T5 e T6). Nota-se que o tratamento T4 apresentou resultados de absorção de água levemente superiores às formulações T1, T2 e T3, que não apresentaram diferenças significativas nos resultados entre eles.

Rocha *et al.* (2004) também obtiveram resultados com maior absorção de água à medida que a porcentagem de substituição de casca de sururu aumentava. Este comportamento foi atribuído a forma lamelar dos grãos da concha do sururu, e conforme discutido no ensaio de resistência à compressão, a predominância dos poros facilita a ascensão da água por capilaridade.

Martinez (2016) afirma também que a casca do mexilhão possui uma alta absorção de água, podendo absorver até 186% mais umidade que a areia natural e que a relação de água / cimento da mistura necessita de correção à medida em que se aumenta o teor de casca de mexilhões, adicionando água extra, para compensar a capacidade de absorção dos agregados de mexilhão. Desta forma, conclui-se que o aumento da absorção de água nas argamassas com conchas de moluscos está relacionado a dois fatores: O formato dos grãos que propicia a formação de vazios na microestrutura da argamassa e à capacidade de absorção de água das conchas utilizadas como agregado miúdo.

Através deste ensaio foi possível observar e concluir que a substituição de areia por concha de sururu, em percentuais de até 20%, não altera o comportamento da argamassa na absorção de água por capilaridade e, portanto, argamassas com percentuais de substituição abaixo de 20% podem ser indicadas e aplicadas em áreas úmidas, molhadas ou externas sem prejuízos. Já as argamassas com teores de substituição acima de 20%, poderão ser utilizadas restritamente em ambientes internos sem presença de umidade.

3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

A figura 5 representa imagens produzidas pelo MEV com ampliação de 100 vezes, onde "a" corresponde à amostra do corpo de prova da formulação T1 (0%), "b" corresponde à formulação T4 (30%).

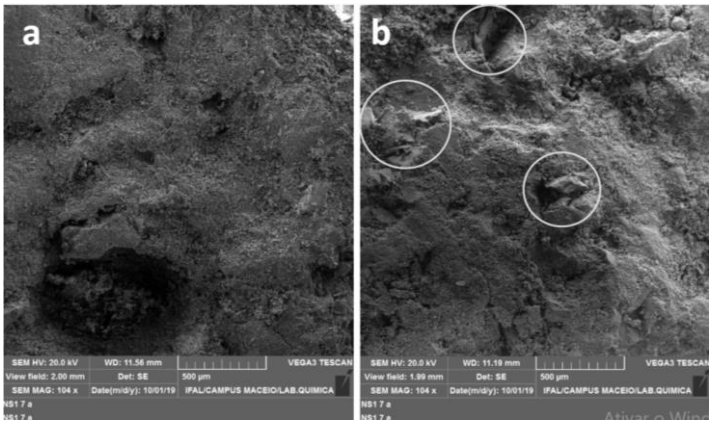


Figura 5 – Micrografias eletrônicas de varredura (100x) dos tratamentos T1 (a) e T4 (b).

A esta aproximação foi possível observar na figura 5 (a), uma superfície homogênea, e com boa distribuição entre os grãos médios e finos da areia, entretanto nota-se uma grande cavidade no inferior da imagem, o qual deve ter sido resultante de desprendimento da amostra durante o processo de corte. Já na figura 5 (b), foi possível notar uma superfície menos homogênea, com a presença de partículas maiores, pontiagudas e com forma lamelar (identificadas na imagem através dos círculos), o que podem representar as partículas de concha de sururu triturada. Nota-se também que no entorno das partículas de concha de sururu há presença de espaços vazios, indicando que o formato e a granulometria das conchas utilizadas podem dificultar o adensamento e preenchimento dos espaços durante a formação microestrutural.

A figura 6 representa imagens produzidas no MEV com aproximação de 500 vezes, onde "a" corresponde à amostra do corpo de prova da formulação T1 (0%), "b" corresponde à formulação T4 (30%).

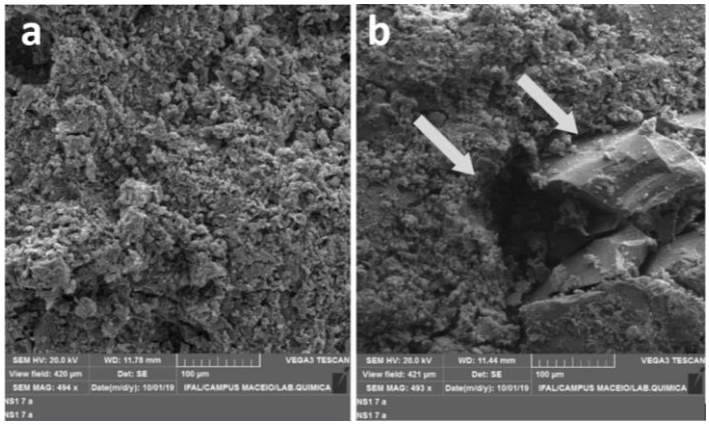


Figura 6: Micrografias eletrônicas de varredura (500x) dos tratamentos T1 (a) e T4 (b).

A esta aproximação é possível observar na figura 6 (a), o agrupamento e distribuição do cimento, dos grãos médios e dos grãos finos da areia, o que resultou em uma superfície homogênea e com poucos espaços vazios em sua microestrutura. Na figura 6 (b), é possível identificar de forma mais

nítida, partículas de concha de sururu e observar a profundidade dos espaços vazios criados ao redor das partículas.

4 CONCLUSÕES

A equalização das esferas social, econômica e ambiental na atividade de extração do sururu em Alagoas é um desafio. Entretanto, a utilização das conchas de sururu moídas como substituição de parte da areia em argamassas para a construção civil pode se configurar como uma alternativa para resolução do desequilíbrio na cadeia produtiva dos moluscos no complexo lagunar Mundaú/Manguaba.

As análises da composição química da concha do sururu demonstraram que, assim como outros moluscos, o Cálcio (Ca) é o mineral majoritário, e que o baixo teor de sílica indica baixa atividade pozolânica, restringindo a sua utilização apenas como agregado em argamassas e concretos.

Quanto à resistência à compressão, todas as formulações testadas atendem ao valor mínimo de resistência à compressão normatizada, para utilização como argamassa de assentamento e revestimento. Em relação à absorção de água, concluiu-se que as formulações acima de 20% de concha de sururu são contraindicadas para uso em ambientes externos ou com a presença de umidade.

Acredita-se que estes comportamentos observados nos ensaios estejam atribuídos à forma lamelar dos grãos da concha do sururu, isto é, espessura pequena em relação as outras dimensões, o que pode ser prejudicial na formação da microestrutura dos materiais cimentícios, podendo acumular água ou formar grande quantidade de vazios; e, por esse motivo, acredita-se que a predominância dos poros reduza a resistência à compressão e aumente a absorção da água por capilaridade.

Este estudo demonstrou a viabilidade da incorporação das conchas de sururu descartadas no complexo lagunar Mundaú-Manguaba no desenvolvimento de uma argamassa de assentamento e revestimento, em formulações com percentuais de até 20% sem restrições, pois atendeu aos parâmetros normativos de resistência a compressão e absorção de água por capilaridade.

É importante destacar também que, sendo a argamassa uma base de preparação do concreto, temos outras possibilidades de uso a serem exploradas com a utilização de conchas de sururu para fabricação de placas cimentícias, placas de revestimento decorativo em 3D, peças pré-moldadas, mobiliário urbano, móveis em concreto para habitação de interesse social, entre outros.

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de revestimentos de argamassa**. 2002. Disponível em: <http://www.comunidadedaconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281. **Argamassa Para assentamento e revestimento de paredes e tetos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

BRASIL. Ministério da Pesca e Aquicultura – MPA. **Boletim estatístico da Pesca e Aquicultura – Brasil 2011** – Versão Preliminar. Brasília, Ministério da Pesca e Aquicultura, 2012.

COUTINHO, Mauro Knupferet al. **A Cada Lata**: A Extração do Sururu na Lagoa Mundaú – Alagoas. Cooperação Brasil-Espanha para o desenvolvimento de Alagoas. Brasília: Iabs, 2014.

DUARTE, Rubens de Oliveira. **Orla lagunar de Maceió**: apropriação e paisagem (1960-2009). Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado). Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2010.

FERREIRA, J. F. MAGALHÃES, A. R. M. **Cultivo de Mexilhões**. Florianópolis: Laboratório de Cultivo de Moluscos Marinhos (CCA)/Universidade Federal de Santa Catarina(UFSC), 1995.

LERTWATTANARUK, Pusit; MAKUL, Natt; SIRIPATTARAPRAVAT, Chalothorn. Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. **Journal of Environmental Management.** v. 111. Thailândia: 2012.

LIAO, Yingdi; CHEN, Da; ZHANG, Pengcheng; PAN, Tao; ZHAO, Hui. Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production.** v. 237. China: 2019.

LIMA, Magliones Carneiro de. **A importância sócio-econômica, cultural e ambiental do sururu (*Mytella charruana*) na terra de Alagoas**: como se valorar esse recurso à luz de princípios da economia ecológica? Revista Incelências. v.4. n.1. Centro Universitário de Maceió: Maceió, 2015.

MARTÍNEZ, Carolina Garcia. **Estudo do comportamento da concha de mexilhões como agregado para fabricação de massas de concreto**. Trabajo fin de grado. Proyecto Biovalvo. Universidade da Coruña. La Corunã, 2016.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C., Gonzalez-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Carro-López, D. **Design and properties of cement coating with mussel shell fine aggregate**. Construction and Building Materials. 215, 494-507. Spain, 2019.

NGUYEN, D.H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Baraud, F., Leleyter, L. **Durability of pervious concrete using crushed seashells**. Construction and Building Materials. 135, 137–150. France, 2017.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo argamassa**. 2 ed. EDIPUCRS. Porto Alegre/RS, 2012.

ROCHA, Sérgio R. A. G. da; GOMES, Paulo César Correia; BARBOZA, Aline da Silva Ramos; LIMA, Flávio Barboza de; BARROS, Alexandre Rodrigues de. **Estudo da viabilidade de utilização de conchas de sururu em materiais à base de cimento Portland.** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis, 2004.

RODRIGUEZ ÁLVARO, Roberto. **Morteros para revestimento com árido procedente de concha de mejilón**. Trabajo fin de grado. Proyecto Biovalvo. Universidade de Coruña, 2014.

SILVA, Denyo; DEBACHER, Nito Angelo; CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de; ROHERS, Fabio. **Caracterização físico-química e microestrutural de conchas de moluscos bivalves provenientes de cultivos da região litorânea da ilha de Santa Catarina**. Química Nova, v. 33, n.5, 2010.

SILVA, Djane Fonseca da; SOUSA, Francisco de Assis Salviano de; KAYANO, Mary Toshie. Avaliação dos impactos da poluição nos recursos hídricos da bacia do rio Mundaú (AL e PE). **Revista de Geografia**. v. 24, n.3. Recife: 2007.

OLIVIA, M., Mifshella A.A., Darmayanti, L. **Mechanical properties of seashell concrete**, Procedia Eng. 125, 760-764. Indonésia, 2015.

YOON, Gil-Lim; KIM, Byung-Tak; KIM, Baeck-Oon; HAN, Sang-Hun. Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell. **Waste Management**. v.23. Coréia do Sul, 2003.

YOON, Hyunsuk; PARK, S.; LEE, K.; PARK, J.. Oyster shell as substitute for aggregate in mortar. **Waste Management & Research**. Seoul, Kore, 2004.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO DE NOVAS MISTURAS HIDROFÓBICAS PARA A PROTECÇÃO DE PEDRAS NATURAIS

Julia Barra[a]; Madalena Rucha[b]; Ana Paula Ferreira Pinto[c]; Bruno Sena da Fonseca[d]

[a] UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro, Juiz de Fora - MG, 36036-900, Brasil, julia.barra@engenharia.ufjf.br

[b]CERIS, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal; Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, madalena.rucha@estbarreiro.ips.pt

[c]CERIS, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, anapinto@civil.ist.utl.pt

[d]Centro de Química Estrutural-CQE, Institute of Molecular Sciences, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal, bruno.fonseca@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A pedra é um material com elevada durabilidade e amplamente utilizado no património construído, no entanto encontra-se sujeito a diversos fenómenos de degradação, muitos deles associados à presença de água. O seu tratamento recorrendo a produtos hidrofóbicos constitui-se como uma possível alternativa para reduzir o impacto desses fenómenos de degradação. Estudos com o objetivo de avaliar as potenciais consequências da aplicação de produtos hidrofóbicos são fundamentais para garantir um desempenho global positivo, evitando danos, imediatos ou futuros, ao material tratado. Este artigo procede à caracterização preliminar de diversas misturas com potenciais propriedades hidrofóbicas desenvolvidas em laboratório com o objetivo de avaliar a sua viabilidade e potencial de aplicação. Foram estudadas misturas com dois tipos de "alcoxisilanos hidrofóbicos" em diferentes concentrações. A sua caracterização revelou que os tempos de solidificação (gel) e os resíduos secos obtidos são adequados à tipologia de ação pretendida, proteção contra penetração de água. A aplicação das misturas estudadas em cinco pedras diferentes permitiu verificar que a maioria das reações químicas e a evaporação dos compostos voláteis presentes, essencialmente água, ocorreram num espaço de tempo inferior a um mês, uma vez que foi o período necessário para a estabilização da massa dos provetes tratados. As misturas estudadas demonstraram não só potencial eficácia em cinco tipos de pedras diferentes, ao evitarem o espalhamento e penetração de gotas de água, como também reduzida tendência para causar alterações significativas de cor na maioria das pedras utilizadas. O estudo permitiu, assim, concluir que as novas misturas revelaram potencial para o seu futuro desenvolvimento como produtos hidrofóbicos para o tratamento de património em pedra.

Palavras-chave: Património construído, pedras naturais, proteção, água, produtos hidrofóbicos.

1. INTRODUÇÃO

A pedra tem uma presença significativa no património construído, sendo a preservação e conservação deste património de extrema relevância para a história e memória de um país. Intervenções que visem a proteção do património são importantes para prevenir ou mitigar o efeito de fenómenos de degradação que conduzem à perda de valor. Invariavelmente, as pedras sofrem diversos fenómenos de degradação, mais ou menos graves, mas frequentemente associados à presença de água nos seus poros e na superfície. Por exemplo, os ciclos de molhagem e secagem em pedras com minerais argilosos ou a cristalização de sais no interior dos poros pode originar a perda gradual do material pétreo que compõe o objeto.

Neste contexto, tratamentos recorrendo a produtos hidrofóbicos podem contribuir para a redução da penetração da água, protegendo a pedra deste importante agente de degradação, a água. A redução da energia superficial na superfície das pedras e nas paredes dos poros é conseguida com recurso a "moléculas hidrofóbicas" que possuem grupos químicos específicos. Contudo, esta ação hidrofóbica necessita de ser garantida sem que outras características do material tratado sejam significativamente alteradas, como por exemplo, sem que ocorram alterações relevantes da cor das superfícies tratadas. Deste modo, o estudo da potencial viabilidade da aplicação destes produtos necessita de considerar não só as vantagens dos tratamentos resultantes, como também as potenciais desvantagens.

Nesse sentido, Costa e Delgado (2008), a partir da análise da ação de diversos tratamentos de proteção aplicados em vários tipos de pedras, verificaram que um deles promoveu alterações significativas da cor e da permeabilidade ao vapor de água quando aplicado em arenitos, mármores e calcários.

Noutro trabalho, Barbutti e Ribeiro (2018) estudaram a aplicação de três produtos comerciais com propriedades hidrofóbicas, duas resinas de poliéster e um alcoxisilano com grupos CH_3, em pedras graníticas, e concluíram que o produto alcoxisilano revelava maior potencial eficácia na função hidrofóbica comparativamente aos restantes quando aplicados nesta litologia.

O presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização preliminar de diversas misturas à base de alcoxisilanos, desenvolvidas em laboratório, com potenciais propriedades hidrofóbicas, com o objetivo de avaliar a sua viabilidade e potencial de aplicação. Duas moléculas com potencial para conferir propriedades hidrofóbicas foram testadas em diferentes concentrações e diversos parâmetros indicativos da sua potencial viabilidade para aplicação em materiais pétreos avaliados (e.g. tempo de solidificação, tempo de secagem, alteração de cor em superfícies de pedra, etc.).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

Para o presente estudo foram desenvolvidas, e estudadas em laboratório, dois tipos de misturas (T% e F%) com diferentes percentagens (%) de alcoxisilanos ("T" e "F") com potencial hidrofóbico, Quadro 1. Os grupos com potencial hidrofóbico nos alcoxisilano "T" e "F" são o "-CH_3" e o "-CF_3", respetivamente. Estes alcoxisilanos foram adicionados a uma formulação à base de água, cujo desenvolvimento e estudo se encontra descrito em Sena da Fonseca *et al.* 2024.

Quadro 1 – Referências das misturas estudadas. Cada referência inclui a percentagem de alcoxisilano com potencial para conferir propriedades hidrofóbicas ("T" ou "F") adicionada à formulação base.

Alcoxisilano "T"	Alcoxisilano "F"
T0,05	F0,05
T0,11	F0,11
T0,25	F0,25

As misturas desenvolvidas foram aplicadas em provetes (3x3x2cm) de 5 variedades de pedras naturais provenientes do centro e sul de Portugal: Rosal (Rosal), Grés de Silves (Grés), Pedra de Ançã (Ançã), Mármore de Trigaches (Trigaches) e Mármore de Estremoz (Estremoz), Figura 1.

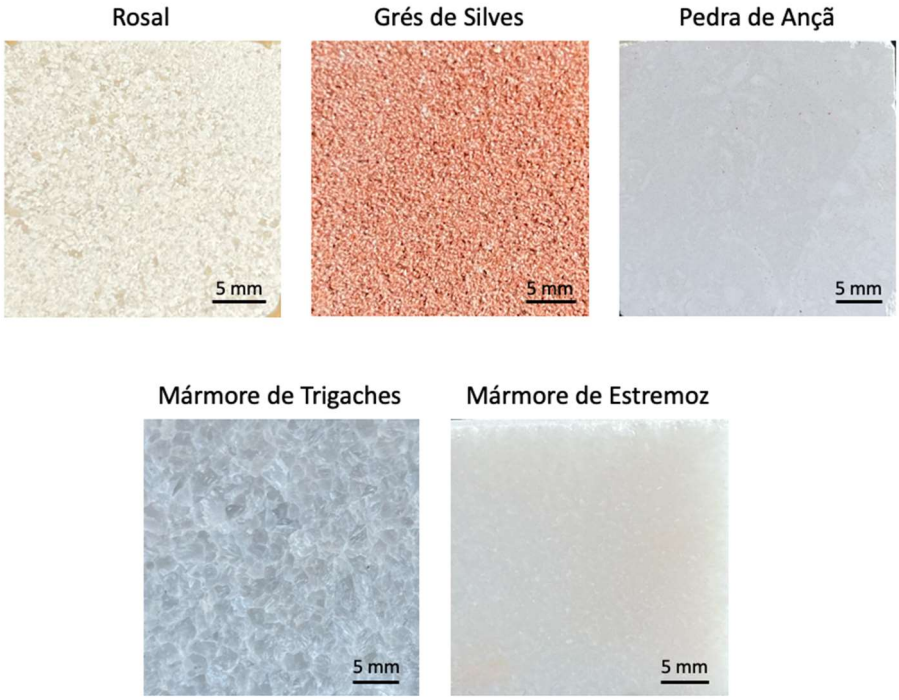


Figura 1 – Variedades pétreas utilizadas no presente estudo.

2.2. MÉTODOS DE ESTUDO

As diversas misturas foram analisadas isoladamente antes de serem aplicadas nas pedras. Após formulação, 10 ml de cada mistura foi colocada num recipiente sob condições que permitissem a evaporação dos seus componentes voláteis a uma taxa reduzida, Figura 2 (Sena da Fonseca *et al.*, 2020), com o objetivo de procurar simular, tanto quanto o possível, as condições quando aplicadas nas pedras. A monitorização da evolução da massa foi efetuada até ser atingida a sua estabilização. Em simultâneo, procedeu-se à monitorização do número de dias que as misturas demoraram a passar ao estado sólido (gel) e à caracterização do aspeto visual após estabilização da sua massa.

Figura 2 – Recipiente utilizado para simular a evaporação dos componentes voláteis das misturas formuladas quando aplicadas em pedra.

Todas as misturas desenvolvidas foram aplicadas por pincelagem em provetes das 5 variedades de pedras naturais e a quantidade aplicada determinada com base na variação de massa registada nos provetes antes e após tratamento. Procedeu-se também à monitorização da evolução da massa dos provetes tratados até à sua estabilização, com o objetivo de determinar resíduo de sólido que permaneceu nos provetes.

Após estabilização da massa dos provetes, procedeu-se à avaliação qualitativa da capacidade de uma seleção de misturas para conferirem propriedades hidrofóbicas às superfícies tratadas. Para tal, colocou-se uma gota de 10 µl de água nas superfícies de cada um dos provetes, com uma pipeta, e procedeu-se de imediato ao seu registo fotográfico.

A avaliação de alterações de cor desencadeadas pela aplicação das misturas foi efetuada recorrendo à quantificação da cor dos provetes antes e após tratamento, assim como ao seu registo fotográfico. A quantificação da cor foi realizada recorrendo ao sistema de coordenadas CIELAB, determinando-se as coordenadas colorimétricas L*, a* e b*. Com as coordenadas colorimétricas das amostras tratadas e não tratadas quantificou-se as diferenças total de cor (ΔE^*) (Equação 1) promovidas pela aplicação das misturas nas 5 pedras selecionadas para o estudo.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE DAS MISTURAS

O estudo da evolução da massa das misturas no interior dos recipientes permitiu verificar que o ritmo de variação de massa reduziu significativamente ao fim 40 dias após a sua formulação, e que a sua estabilização ocorreu ao final de 115 dias, Figura 3. O valor de resíduo sólido final não foi particularmente sensível ao tipo de alcoxisilano substituído nas misturas estudadas ou à sua concentração, uma vez que, após estabilização, a massa final da generalidade das misturas correspondeu a um valor da ordem de 15% da sua massa inicial, Figura 3. Esta redução de massa está associada ao facto destas misturas apresentarem uma elevada quantidade de água que evapora ao longo do tempo.

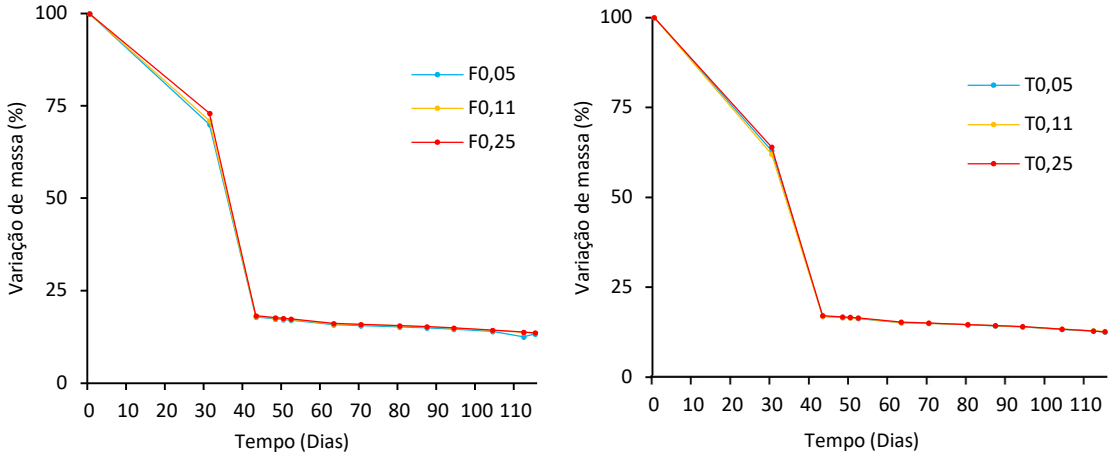


Figura 3 – Evolução da massa das misturas no interior dos recipientes: T (direita) e F (esquerda).

A monitorização do aspeto visual das misturas, para determinar o tempo que demoravam a passar de líquido para gel, permitiu verificar que as misturas T0,05, T0,11, e todas as misturas F, demoraram entre 6 a 7 dias para que ocorresse a mudança de fase, enquanto que a mistura T0,25 não registou esta transição e apresentou um aspeto não-vítreo, distinto das restantes, Figura 4 a).

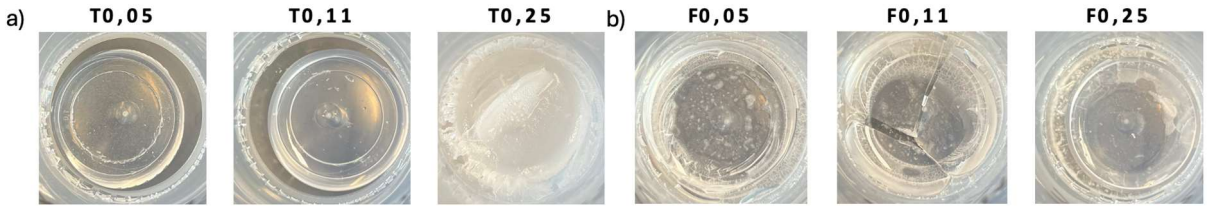


Figura 4 – Aspeto visual das misturas (115 dias): T (a) e F (b).

A Figura 4 permite observar que o resíduo sólido das misturas T0,05 e T0,11 permaneceu homogéneo e transparente, enquanto a mistura com concentração mais elevada, T0,25 apresenta aspeto heterogéneo e branco. Relativamente às misturas F, não foram observadas diferenças significativas do seu aspeto visual para as três concentrações estudadas, formando sólidos transparentes de aparência vítrea.

Também foi possível verificar que todas as mistura estudadas manifestaram retração, sendo que as misturas T 0,05 e T 0,11 foram as que revelaram uma retração mais significativa, Figura 4.

Muito embora a análise da evolução das misturas no interior dos recipientes não reproduza o seu real comportamento quando aplicadas é um indicador do seu potencial comportamento no interior das pedras, cuja avaliação é complexa. A análise efetuada permitiu concluir que todas as misturas manifestaram um comportamento similar no que se refere ao seu tempo de solidificação, evolução da massa e aspeto visual, com exceção da T0,25.

3.2. ANÁLISE DA APLICAÇÃO DAS MISTURAS NAS PEDRAS

A monitorização dos provetes após tratamento permitiu verificar que a estabilização da sua massa ocorreu, para todas as situações estudadas (pedra-mistura), 21 dias após o tratamento, assim como a

ocorrência de uma rápida redução de massa nas duas primeiras semanas. A Figura 5 apresenta, a título de exemplo, a evolução da variação de massa dos provetes de Rosal tratados com as misturas T e F, em relação à sua massa inicial.

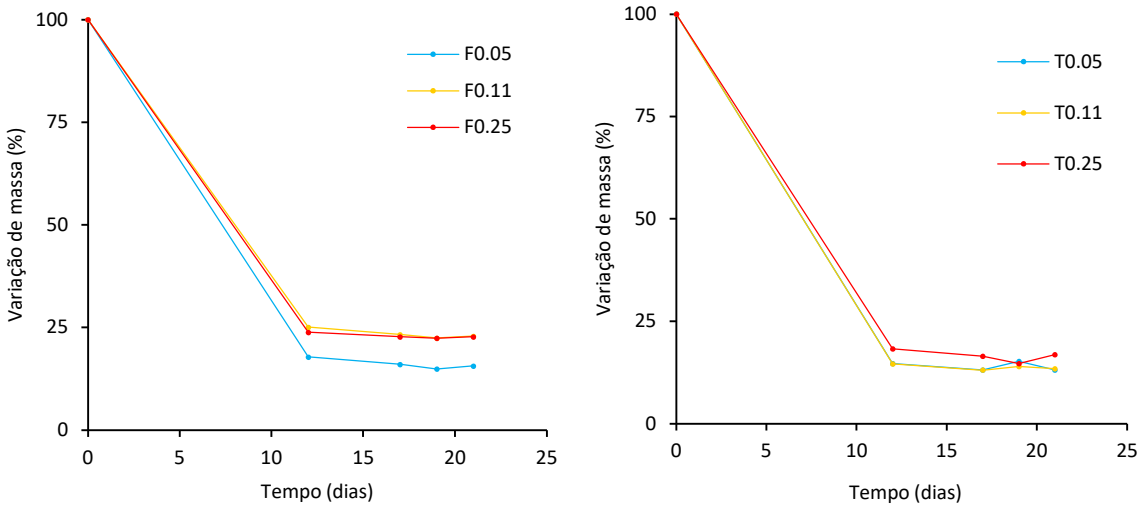


Figura 5 – Evolução da massa das misturas quando aplicadas no Rosal: F (esquerda) e T (direita).

Constatou-se que, as pedras tratadas com todas misturas T, independente da concentração em causa, manifestaram uma evolução de massa similar e aproximadamente 12% de resíduo sólido. Já nas pedras tratadas com as misturas F, registou-se uma ligeira redução do resíduo sólido com o aumento da concentração. Apesar da estabilização da massa das misturas tenha ocorrido mais rapidamente quando aplicadas nas pedras do que nos recipientes, os valores de resíduo sólido obtidos em ambas as situações são da mesma ordem de grandeza.

A Figura 6 apresenta o registo fotográfico das gotas de 10 µl depositadas na superfície das pedras antes e após o seu tratamento com as misturas T0,11 e F0,11, que são as formulações com a concentração intermédia de cada tipo de mistura, permite constatar que a aplicação destas misturas nas diferentes variedades pétreas contribuiu para reduzir a molhabilidade das superfícies e evidenciar o seu potencial para conferir característica hidrofóbicas às pedras estudadas. A mistura F0,11 destaca-se pelo facto de ter promovido a formação de gotas tendencialmente mais esféricas do que as restantes, evidenciando assim ter conferido em todas as pedras uma ação hidrofóbica mais significativa.

Uma vez que as alterações de cor desencadeadas por um produto dependem das características dos suportes onde são aplicados, procedeu-se à análise do eventual impacto visual resultante da aplicação das misturas nas várias pedras e à caracterização colorimétrica das alterações registadas. A Figura 7 apresenta o valor da diferença total de cor desencadeada pelos tratamentos. De um modo geral, a aplicação de todas as misturas deu origem a valores da variação total de cor da ordem de 2 ($\Delta E^*=2$), ou seja, muito dificilmente perceptíveis a olho nú (Sasse, 2001), com a exceção das variações registadas quando aplicadas no Grés de Silves, Figura 7 . No Grés de Silves, registaram-se valores de ΔE^* superiores a 5 para todos as situações estudadas (pedra-mistura), ou seja, as alterações de cor são perceptíveis a olho nú, evidenciando que estas misturas revelam alguns riscos quando aplicados nesta pedra.

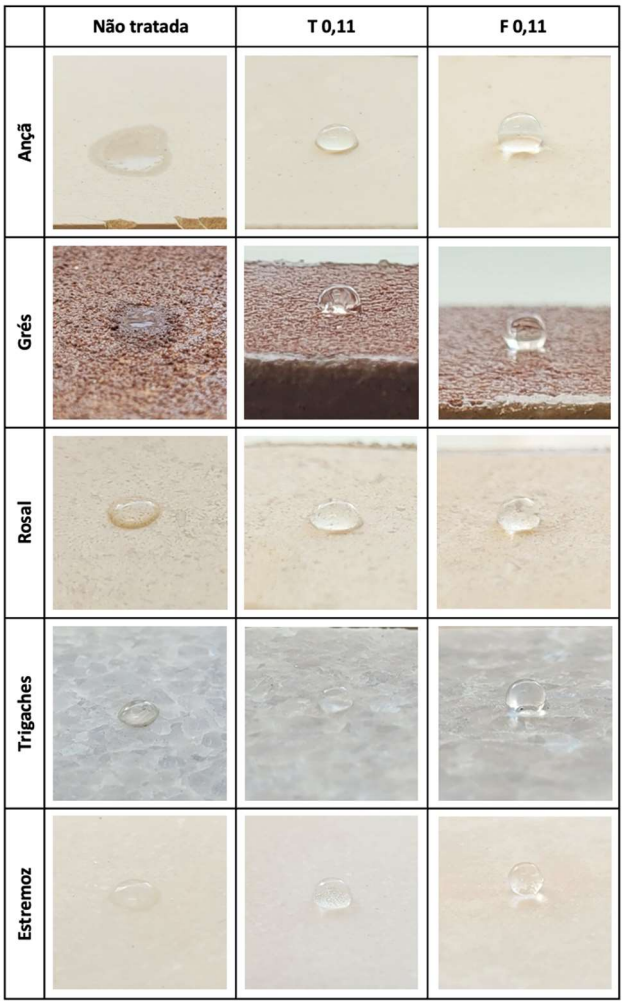


Figura 6 – Aspeto visual das gotas (10µl) depositadas sobre as superfícies das pedras antes e após o seu tratamento com as misturas: T0,11 e F0,11.

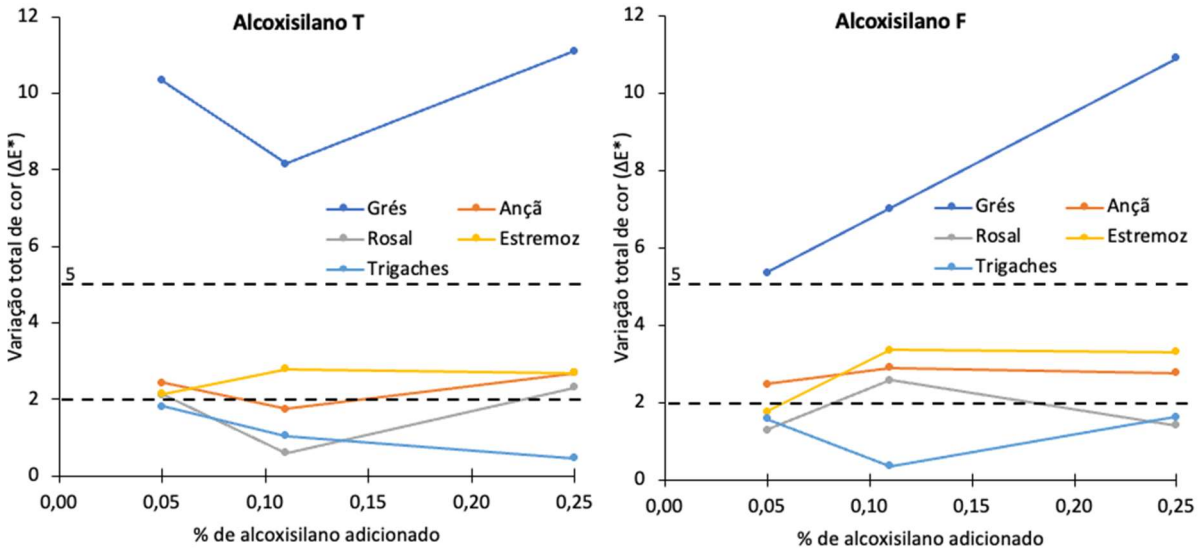


Figura 7 – Evolução da variação total de cor (ΔE*) com o aumento da concentração (Linhas tracejadas a ΔE*=2 e ΔE*=5 correspondem aos limites entre as variações dificilmente perceptiveis e perceptiveis ao olho humano, respectivamente Sasse, 2001).

Uma vez que os tratamentos no Grés revelaram alterações de cor facilmente perceptíveis (ΔE*>5), a Figura 8 apresenta a comparação dos valores das diferentes coordenadas da cor (L*, a* e b*) para as superficies não tratadas (NT – cinzento) e para as superfícies tratadas com as várias misturas. Globalmente verifica-se que os tratamentos produzem uma redução da coordenada L* e muito ligeiro aumento das coordenadas a* e b*. Assim, as variações totais de cor perceptíveis, obtidas no Grés (ΔE*>5), devem-se principalmente ao escurecimento (redução da coordenada L*) das superfícies, e a um ligeiro aumento das componentes vermelha e amarela (aumento das coordenadas a* e b*, respectivamente).

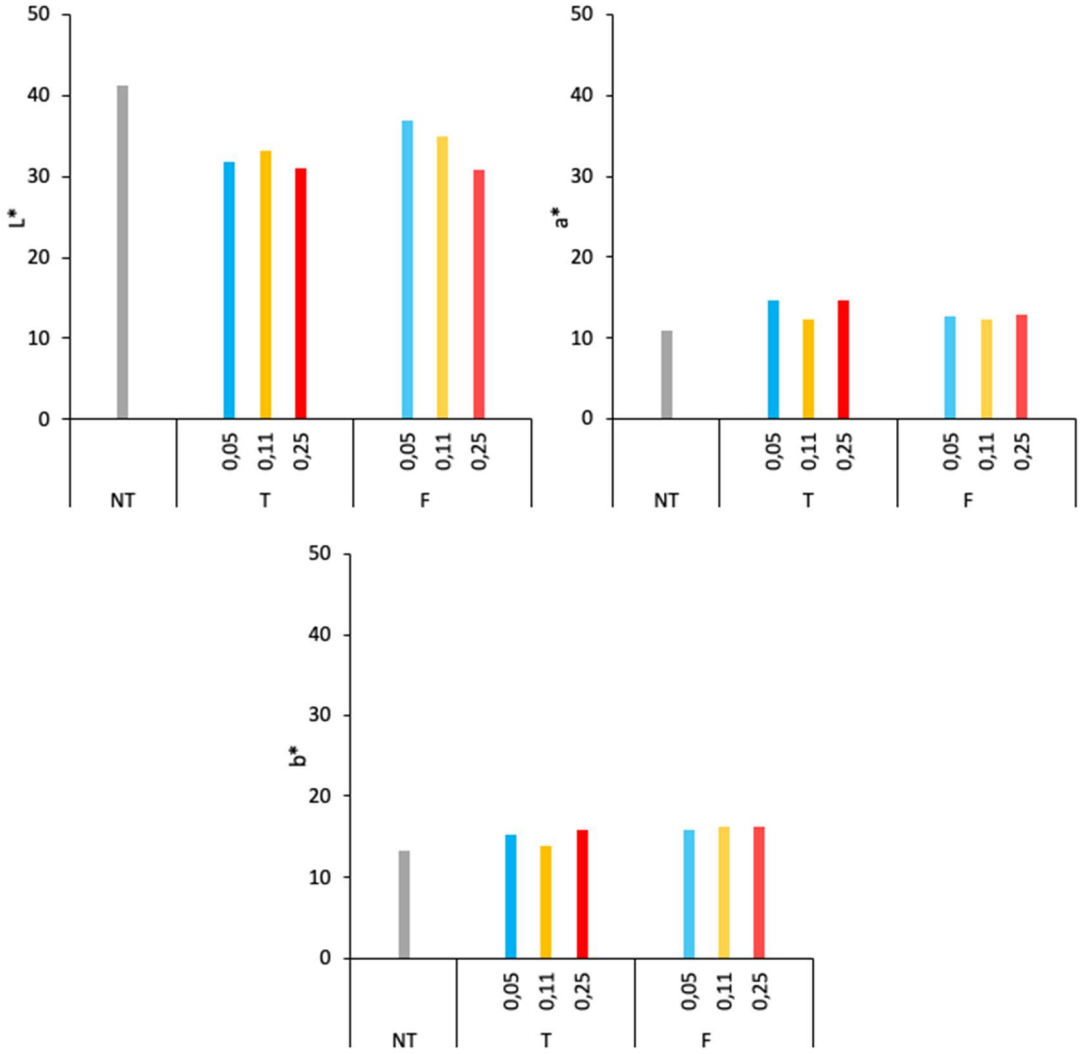


Figura 8 – Coordenadas L*, a* e b* obtidas para as superfícies de Grés não tratado (NT) e para as superfícies de Grés tratadas com as várias concentrações das misturas T e F.

4. CONCLUSÕES

A análise das misturas desenvolvidas permitiu verificar que todas deram origem a valores de resíduo sólido (da ordem de 15%) ao fim de um intervalo de tempo (40 dias) em linha com o expectável para este tipo de produtos (Sena da Fonseca *et al.* 2024). A análise visual das misturas após estabilização da sua massa no interior dos recipientes permitiu concluir que o aumento da concentração das misturas

T origina a formação de um resíduo com características diferentes dos restantes, enquanto o aumento da concentração das misturas F não influenciou a sua morfologia ou aspeto final.

As misturas T e F quando aplicadas nas pedras por pincelagem deram origem a um valor médio de resíduo sólido da ordem de 15% e 20%, respetivamente, e para concentrações intermédias (0,11) reduziram significativamente a molhabilidade das superfícies de todas as variedades pétreas estudadas, especialmente das superfícies tratadas com o alcoxisilano do tipo F. As misturas não desencadearam alterações significativas no aspeto visual e cor das pedras, com exceção do grés, no qual se registaram alterações de cor mais significativas e tendencialmente percetíveis visualmente.

O estudo realizado das diversas misturas à base de alcoxisilano, desenvolvidas em laboratório, permitiu proceder à sua caracterização preliminar tendo em vista a avaliação do seu potencial para conferir propriedades hidrofóbicas a cinco variedades pétreas, e evidenciou o interesse em aprofundamento o seu estudo, nomeadamente da sua potencial eficácia, face à função hidrofóbica e desvantagens/riscos que podem advir da sua aplicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento do Projeto GreenMAP: Produtos multi-ação verdes para a conservação sustentável de pedras porosas de construção histórica (PTDC/ECI-EGC/2519/2020; https://doi.org/10.54499/PTDC/ECI-EGC/2519/2020); CQE (UIDB/00100/2020 e UIDP/00100/2020; https://doi.org/10.54499/UIDP/00100/2020 e https://doi.org/10.54499/UIDB/00100/2020); IMS (LA/P/0056/2020; https://doi.org/10.54499/LA/P/0056/2020) e CERIS (UIDB/04625/2020; https://doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020). O autor B. Sena da Fonseca agradece o apoio individual à FCT (2020.04185.CEECIND/CP1587/CT0004; https://doi.org/10.54499/2020.04185.CEECIND/CP1587/CT0004). A autora M. Rucha agradece o apoio à FCT (PRT.BD.15445.2022).

REFERÊNCIAS

Barbutti, D.S., Ribeiro, R.C.C. (2016). Estudo da química de superfície para seleção de protetivos hidrorrepelentes e suporte tecnológico para conservação e restauro de bens pétreos, Geonomos - vol. 24, n. 2.

Costa, D.; Delgado Rodrigues, J.. (2008). Evaluation of consolidation treatments applied to granitic materials. Experience and critical overview of laboratory testing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM STONE CONSOLIDATION IN CULTURAL HERITAGE - RESEARCH AND PRACTICE, Lisbon. Proceedings... Lisbon: LNEC, 2008. p. 389-398.

Sasse, H. (2001). "Baudenkmalpflege aus der Sicht des Ingenieurs / Engineering Aspects of Monument Preservation" Restoration of Buildings and Monuments, vol. 7, no. 2, pp. 197-216.

Sena da Fonseca, B., Ferreira Pinto, A. P., Piçarra, S., & Montemor, M. F. (2020). Alkoxysilane-based sols for consolidation of carbonate stones: Proposal of methodology to support the design and

development of new consolidants. Journal of Cultural Heritage, 43, 51–63. https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.003.

Sena da Fonseca B.; Ferreira Pinto A.P.; Piçarra S.; Rucha M.; Montemor M.F. (2024) Sonocatalysis: Eco-design strategy for developing novel inorganic sonogels for the conservation of stone heritage. Journal of Cultural Heritage. Vol. 67. pp. 214-225. DOI: https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.03.007.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE BLOCOS CERÂMICOS EXTRUDADOS, PRENSADOS E QUEIMADOS PRODUZIDOS COM ARGILA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)

BRUNO SANCHES DA SILVA[1]; NIANDER AGUIAR CERQUEIRA[2]; JONATHAN DE ANDRADE PAULA MADALENA[2]; ELIAS SOCRATES NASCIMENTO DA CRUZ JUNIOR[2]; RAFAEL PICANÇO DE OLIVEIRA[3]; JONAS ALEXANDRE[2]

[1]Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes – RJ, 28013-602, bruno-sanches.silva@iff.edu.br

[2]Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes – RJ, 28013-602, niander@uenf.br

[3]Instituto Federal Fluminense (IFF), Av. João Jazbick, S/n, Aeroporto, Santo Antônio de Pádua – RJ, 28470-000

RESUMO

A construção civil é constantemente impulsionada pela inovação de materiais e sistemas construtivos, visando melhores propriedades tecnológicas, redução de custos e menor impacto ambiental. Este estudo analisou os Blocos Cerâmicos de Encaixe Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ), fabricados com argila do polo cerâmico industrial de Campos dos Goytacazes, conforme a norma brasileira ABNT NBR 15270-1 2023, abrangendo geometria, absorção de água e resistência à compressão. A argila foi processada por extrusão (WD36) e prensagem (Eco Máquinas 7000), seguida por secagem e queima em forno do tipo Abóbada. Os resultados mostraram conformidade geométrica com as tolerâncias da norma, atendendo aos requisitos normativos. A absorção média de água foi 18,46% (± 0,33), dentro dos padrões para a classe VED40 de blocos de vedação (8% ≤ AA ≤ 25%) e para a classe estrutural EST40 (8% ≤ AA ≤ 21%). A resistência média à compressão alcançou 12,73 MPa (± 1,77), superando o mínimo de 4,00 MPa para blocos VED40 e EST40. Conclui-se que os BCEPQ de argila de Campos dos Goytacazes superaram os requisitos normativos em análise dimensional, absorção de água e resistência à compressão, tanto para blocos de vedação quanto estruturais.

Palavras-chave: Blocos cerâmicos, Bloco extrudado, Bloco prensado, Alvenaria, Cerâmica vermelha

1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência na construção civil impulsiona a inovação de materiais e sistemas construtivos, visando a durabilidade, redução de custos e impacto ambiental. Este estudo investigou os Blocos Cerâmicos de Encaixe Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) produzidos com argila de alta plasticidade do polo industrial de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes.

A cerâmica vermelha compreende todos os produtos elaborados com matéria prima argilosa, que após a queima apresentam coloração avermelhada. É um material natural que pode ser identificado por sua textura terrosa, granulometria fina e passível de adquirir plasticidade quando misturado com água. Este tipo de solo argiloso constitui jazidas de grande porte e baixo custo em diversas regiões do Brasil (Alexandre 2000).

A cerâmica vermelha é uma parte fundamental da construção civil, fornecendo uma variedade de materiais essenciais, como telhas, tijolos e blocos cerâmicos, que são amplamente utilizados em estruturas de alvenaria (Vieira 2016; Monteiro 2008). O perfil da produção de cerâmica vermelha é praticamente o mesmo em todo o país, com grande potencial produtivo, mas geralmente de baixo teor técnico e baixa capacidade de investimento (Rizzatti *et al*. 2011).

No município de Campos dos Goytacazes, o rico depósito de argila impulsionou o crescimento de um polo industrial, com dezenas de indústrias produzindo uma grande quantidade de peças mensalmente (Xavier et al. 2019). Nesse cenário, o estudo dos BCEPQ torna-se essencial, não apenas para entender o desempenho desses materiais, mas também para garantir a qualidade e a segurança das estruturas que estão sendo construídas por eles.

Apesar da ampla utilização dos blocos cerâmicos na construção civil, a falta de controle de qualidade, os custos elevados e a ausência de códigos de projeto específicos têm sido fonte de preocupação, contribuindo para patologias e acidentes em obras (Oliveira et al. 2018). Assim, a presente pesquisa visa preencher essa lacuna ao caracterizar os materiais empregados na produção dos BCEPQ e avaliar suas características dimensionais e desempenho físico e mecânico.

É fundamental compreender os materiais empregados na fabricação dos blocos cerâmicos e analisar seus resultados de desempenho por meio de ensaios normalizados, a fim de alinhar o desempenho desses materiais com seus custos energéticos e financeiros. Além disso, uma análise abrangente da literatura existente não só permite um melhor mapeamento do conhecimento já consolidado, mas também nos abre caminho para novas investigações e descobertas (Silva 2022; Cerqueira, *et al*. 2020; Cerqueira, *et al*. 2023; Azevedo *et al*. 2019).

Os blocos cerâmicos são amplamente utilizados na construção civil devido à sua durabilidade, resistência e facilidade de montagem. No entanto, é essencial garantir que esses blocos atendam aos requisitos normativos e apresentem propriedades adequadas para seu uso em diferentes aplicações estruturais e de vedação. Como as estruturas de alvenaria são primariamente comprimidas, as propriedades compressivas da alvenaria são críticas para fins de projeto e avaliações de segurança (ABNT NBR 15270-1 2023; Cerqueira *et al*. 2022; Mohamad *et al*. 2012; Barbosa *et al*. 2010).

O índice de absorção de água, que é uma medida indireta da porosidade aberta da peça, é uma propriedade física também muito importante de ser analisada. Nesse contexto, a norma brasileira (ABNT NBR 15270-1 2023) estabelece os critérios e parâmetros de desempenho para blocos cerâmicos, incluindo requisitos geométricos, absorção de água por imersão e resistência à compressão. Portanto, é fundamental realizar ensaios e análises para verificar se os blocos

produzidos atendem a esses requisitos normativos, garantindo assim a qualidade e segurança das estruturas construídas.

Nesse contexto, o estudo baseia-se em normas brasileiras que estabelecem critérios para geometria, absorção de água e resistência à compressão de blocos cerâmicos. Embora haja semelhanças com normas internacionais, como a ASTM C67-9 2018, (Marvila *et al*. 2019) é fundamental compreender as especificidades das normas brasileiras para garantir a adequação dos materiais aos padrões locais e regionais.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 DADOS

Neste estudo, a argila proveniente do município de Campos dos Goytacazes foi selecionada como matéria-prima para a produção dos Blocos Cerâmicos de Encaixe Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) na indústria Arte Cerâmica Sardinha, localizada no polo de cerâmica vermelha da região.

A argila utilizada para a fabricação dos BCEPQ foi extraída de uma jazida na localidade de São Sebastião, distrito do município de Campos dos Goytacazes, no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Reconhecida pela sua elevada plasticidade, essa argila é comumente denominada localmente como argila plástica.

2.2 MÉTODOS

Os BCEPQ foram submetidos à avaliação de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 15270-1 (2023), que abrange aspectos relacionados à geometria, absorção de água e resistência à compressão. A argila, caracterizada por sua alta plasticidade e teor de umidade entre 20% e 25%, passou por um processo de fabricação que envolveu etapas de extrusão (utilizando o equipamento WD36) e prensagem (com a máquina Eco Máquinas 7000), seguidas de secagem e queima em forno do tipo Abóbada. A Figura 1 ilustra as diferentes etapas desse processo produtivo dos BCEPQ.

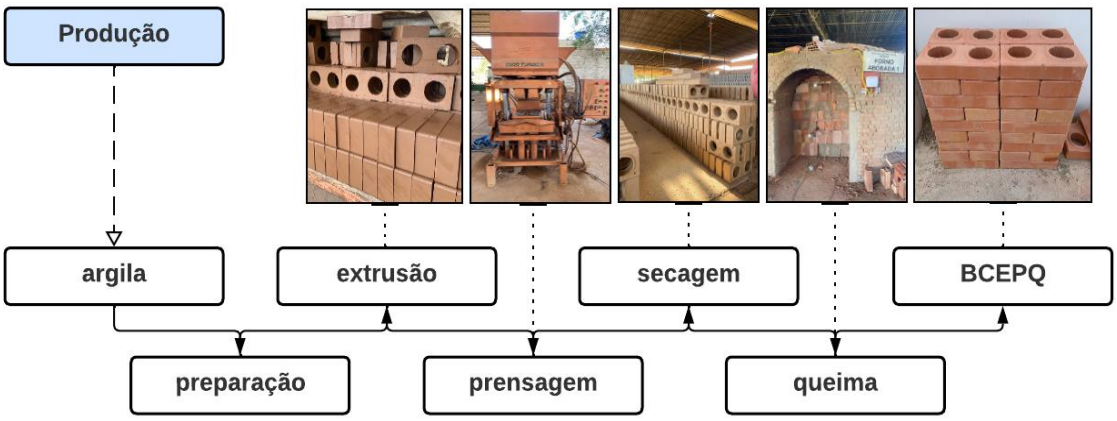


Figura 1 - Processo produtivo do BCEPQ

Além disso, o solo utilizado para compor a massa cerâmica foi submetido a análises granulométricas, determinação dos limites de consistência, ensaio Proctor Normal e análise química. A Figura 2 apresenta os ensaios tecnológicos realizados nos blocos cerâmicos para avaliar suas propriedades físicas e mecânicas.

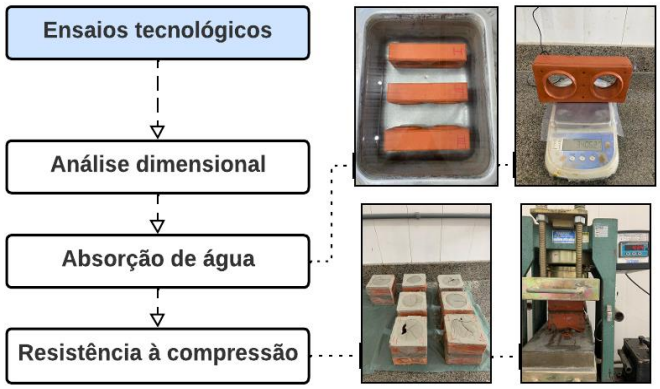


Figura 2 - Ensaios tecnológicos realizados no BCEPQ

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise granulométrica do solo revelou que este é composto por 46% de argila, 23% de silte e 31% de areia, conforme ilustrado na Figura 1. Os limites de consistência do solo, com um Limite de Liquidez (LL) de 47,9%, Limite de Plasticidade (LP) de 28,7% e Índice de Plasticidade (IP) de 19,2%, indicam uma alta plasticidade, influenciada pela presença significativa de argila.

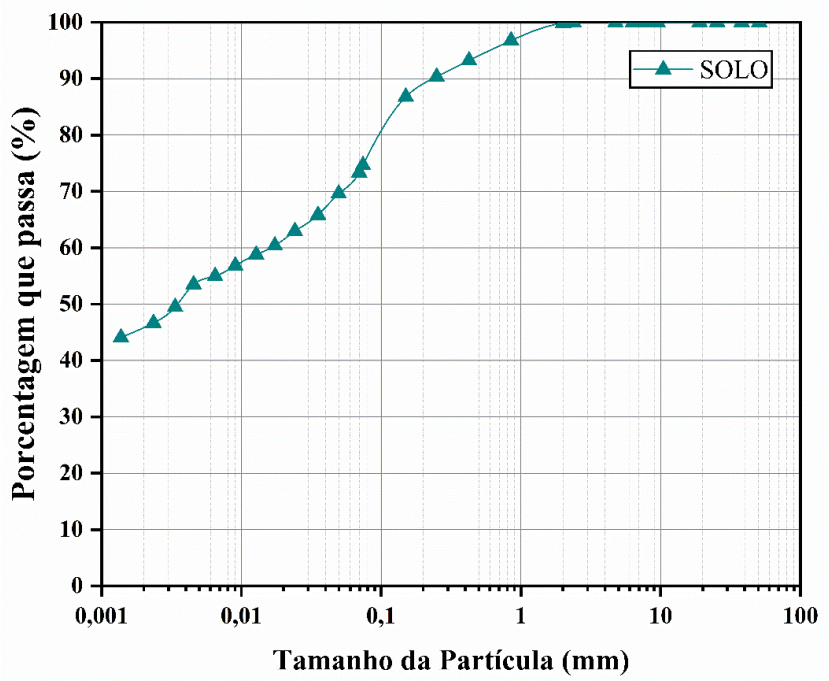


Figura 3 - Curva granulométrica da matéria prima

A densidade aparente seca do solo, conforme determinada pelo gráfico de Proctor Normal, revelou uma umidade ótima de 23,41%. A elevada capacidade de retenção de água da argila, devido à sua

estrutura em camadas e às cargas elétricas nas partículas, influenciou esse resultado, como observado em estudos anteriores (Silva 2022).

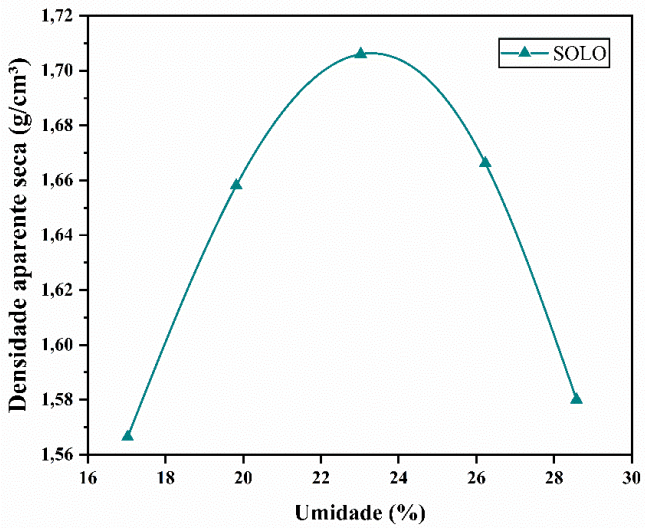


Figura 4 - Compactação de Proctor normal na matéria-prima

A composição química do solo (Tabela 1) demonstrou uma predominância de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), indicando a possível presença de argilominerais como caulinita e ilita, além do mineral quartzo. A presença de ferro (Fe_2O_3) e titânio (TiO_2) confere a coloração marrom ao solo, enquanto a presença de potássio (K_2O) sugere a existência de feldspatos potássicos na amostra, conforme apontado por estudos anteriores (Azevedo *et al*. 2019; Silva 2022; Cerqueira 2017; Vieira *et al*. 2016).

Tabela 1 - Composição química do solo utilizado na pesquisa

Material	Solo (%)
SiO_2	46,36
Al_2O_3	37,83
Fe_2O_3	10,63
K_2O	2,09
TiO_2	1,66
SO_3	0,77
CaO	0,41
MnO	0,09
Outros	0,16

Os resultados da análise dimensional dos blocos demonstraram conformidade geométrica com as tolerâncias estabelecidas pela norma brasileira (ABNT NBR 15270-1 2023), conforme apresentado na Tabela 2. As dimensões, incluindo faces, septos e planicidade, atenderam integralmente às especificações, o que evidencia a precisão do processo de fabricação.

Tabela 2 - Características geométricas do BCEPQ (L – largura; H – altura; C – comprimento; S1 – septo 1; S2 – septo 2; D – desvio em relação ao esquadro; F – planeza das faces; Ø – diâmetro interno; Ab – área bruta; Alíq – área líquida)

BCEPQ	Medidas das faces (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)	D (mm)	F (mm)	Ø (mm)	Ab (mm²)	Alíq (mm²)

	L	H	C							
B1	140,93	62,71	282,15	27,46	27,35	0,10	0,03	83,55	39763,40	34280,85
B2	139,82	62,14	282,54	28,12	27,91	0,11	0,05	83,62	39504,74	34013,00
B3	141,09	63,07	284,09	28,25	28,14	0,11	0,05	84,47	40082,26	34478,30
B4	140,42	62,63	281,62	27,62	27,36	0,10	0,04	84,09	39545,08	33991,43
B5	140,65	62,59	281,57	27,77	27,81	0,10	0,05	84,31	39602,82	34020,07
B6	139,61	62,12	281,73	27,31	27,68	0,10	0,05	84,12	39332,33	33774,71
B7	139,72	61,96	281,94	27,59	27,51	0,10	0,04	83,61	39392,66	33902,23
B8	140,17	61,85	283,31	28,37	28,25	0,10	0,05	84,45	39711,56	34110,26
B9	140,94	62,35	283,65	28,06	27,70	0,09	0,04	84,31	39977,63	34394,88
B10	139,72	62,21	283,02	27,82	27,83	0,10	0,05	84,53	39543,55	33931,63
B11	140,52	62,39	281,76	27,43	27,26	0,11	0,05	84,39	39592,92	33999,57
B12	140,46	62,48	284,24	28,09	27,87	0,11	0,04	84,44	39924,35	34324,37
B13	140,98	63,34	282,41	28,21	28,13	0,11	0,04	83,78	39814,16	34301,38
Média	140,39	62,45	282,62	27,85	27,75	0,10	0,04	84,13	39675,96	34117,13
Desv. Pad.	0,53	0,43	0,95	0,35	0,32	0,01	0,01	0,36	227,37	215,84
CV (%)	0,38	0,68	0,34	1,26	1,15	6,12	14,80	0,43	0,57	0,63

Na Tabela 3, são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água por imersão. A média de absorção de água foi de 18,46% (± 0,33), alinhando-se com os padrões estabelecidos para a classe VED40 de blocos de vedação (8% ≤ AA ≤ 25%) e para a classe estrutural EST40 (8% ≤ AA ≤ 21%).

Tabela 3 - Absorção de água do BCEPQ

Bloco	m1 (g)	m2 (g)	AA (%)
B1	2659,90	3136,3	17,91
B2	2561,90	3044,9	18,85
B3	2619,70	3105,2	18,53
B4	2664,40	3159,2	18,57
B5	2490,10	2954	18,63
B6	2652,50	3137,4	18,28
		Média	18,46
		Desvio Padrão	0,33

Os resultados do ensaio de resistência à compressão, expostos na Tabela 4, indicam uma resistência média à compressão líquida de 12,70 MPa (± 1,34). Essa característica excede consideravelmente o limite mínimo de 4,00 MPa estabelecido para blocos VED40 e EST40.

Tabela 4 - Resistência à compressão do BCEPQ

Bloco	Força de ruptura (N)	Área Líquida (mm²)	RC (MPa)
B1	214568,71	16907,37	12,69
B2	224865,66	17120,92	13,13
B3	270074,15	17261,78	15,65
B4	179166,84	16836,50	10,64
B5	206429,22	16997,30	12,14

B6	183579,81	17018,75	10,79
B7	239967,84	17084,79	14,05
B8	224865,66	17713,22	12,69
B9	214074,15	16813,94	12,73
B10	229166,84	17285,13	13,26
B11	206429,22	17127,44	12,05
B12	201579,81	17231,65	11,70
B13	229967,84	16923,86	13,59
		Média (fbm)	12,70
		Desvio Padrão	1,34

A Figura 5 ilustra graficamente os resultados da absorção de água e da resistência à compressão dos blocos.

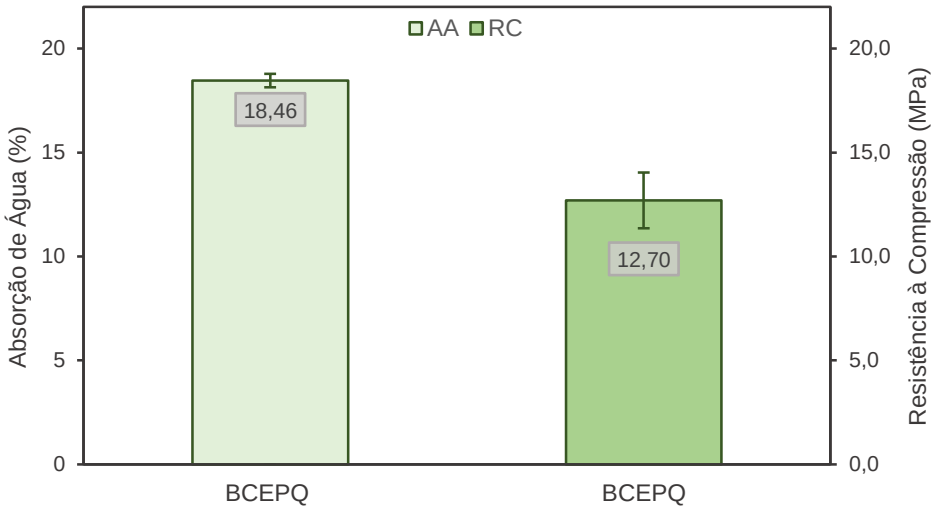


Figura 5 - Resultado da absorção de água e resistência à compressão do BCEPQ

Verifica-se que as características geométricas dos blocos atendem plenamente aos requisitos normativos. A absorção média de água e a resistência à compressão estão em conformidade com os padrões estabelecidos para blocos de vedação e estruturais. Esses resultados demonstram a qualidade dos blocos cerâmicos produzidos, destacando sua adequação para diversas aplicações na construção civil.

Comparados a outros tipos de blocos descritos na literatura, como os blocos de solo-cimento, que variam de 2,0 MPa a 3,5 MPa após 28 dias de cura, dependendo do tipo de solo e proporção de estabilizante, e os blocos cerâmicos que geralmente apresentam resistência entre 6,58 MPa e 11,89 MPa, os Blocos Cerâmicos de Encaixe Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) investigados neste estudo demonstraram uma robusta resistência média à compressão de 12,70 MPa (± 1,34) (Azevedo *et al*., 2019; Silva *et al*., 2021; Marvila *et al*., 2019). Estes resultados sublinham o potencial de pesquisa dos BCEPQ em blocos cerâmicos para a construção civil.

4 CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa evidenciam que os Blocos Cerâmicos de Encaixe Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ) fabricados com argila de alta plasticidade proveniente de Campos dos

Goytacazes superam os requisitos normativos estabelecidos em relação à análise dimensional, absorção de água e resistência à compressão, tanto para blocos de vedação quanto para aplicações estruturais. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica e a qualidade desses blocos cerâmicos como componentes essenciais na construção civil.

Além de atender aos padrões normativos, os BCEPQ apresentaram uma resistência à compressão média de 12,70 MPa (± 1,34), destacando-se em comparação com outros tipos de blocos cerâmicos estudados na literatura. Este desempenho ressalta o potencial de pesquisa dos BCEPQ para aplicação na construção civil.

Considerando os avanços obtidos nesta pesquisa, sugere-se que futuros estudos explorem aspectos relacionados à otimização dos processos de produção dos BCEPQ, bem como a investigação de novos materiais e técnicas que possam contribuir para o aprimoramento das propriedades dos blocos cerâmicos. Além disso, investigações sobre o desempenho dos BCEPQ em condições ambientais adversas e em situações de carga mais severas podem oferecer informações valiosas para sua aplicação em diferentes contextos construtivos.

REFERÊNCIAS

Alexandre, J. Análise de Matéria-Prima e Composições de Massa Utilizada em Cerâmicas Vermelhas. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2000, 174p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro (2023).

ASTM C67-9, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, American Standard Test Method, Philadelphia, 2018

Azevedo, A., Marvila, M., Júnior Fernandes, W., Alexandre, J., Xavier, G., Zanelato, E., Cerqueira, N., Pedroti, L., Mendes, B. (2019). Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. Journal of Building Engineering, 23: 334-340. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.012

Barbosa, C., Lourenço, P., Hanai, J. (2010). On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms. Materials and Structures. 43(3): 331-344. https://doi.org/10.1617/s11527-009-9492-0

Bellingieri, J. (2005). As origens da indústria cerâmica em São Paulo. Cerâmica Industrial. 10(3): 19-23.

Alexandre, J. Análise de Matéria-Prima e Composições de Massa Utilizada em Cerâmicas Vermelhas. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2000, 174p.

Cerqueira N. Parâmetros físicos e mecânicos de blocos prensados e queimados de cerâmica vermelha para uso como alvenaria estrutural. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2017, 185p.

Cerqueira, N., Marvila, M., Azevedo, A., Alexandre, J., Xavier, G., Souza, V. (2020). Analysis of deformability modulus by linear and nonlinear elastic methods in ceramic structural masonry and mortars. Cerâmica, 66: 229-235. https://doi.org/10.1590/0366-69132020663792845

Cerqueira, N., Souza, V., Alexandre, J., Xavier G., Fediuk, R., Monteiro S. (2022). Mechanical Feasibility Study of Pressed and Burned Red Ceramic Blocks as Structural and Sealing Masonry. Materials, 15(14): 5004. https://doi.org/10.3390/ma15145004

Cerqueira, N., Alexandre, J., Xavier, G., Souza, V., Azevedo, A. (2017). Comportamento Físico e Mecânico de Blocos Prensados e Queimados de Cerâmica Vermelha. Cerâmica Industrial, 22(5-6): 41-49. http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2017.029

Cerqueira, N., Silva, B., Alexandre, J., Azevedo, A. (2023). Estudo de parâmetros macroestruturais de blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados de cerâmica vermelha, 76(76): 1265-1278. In: 76º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo. http://dx.doi.org/10.5151/2594-5327-40124

Marvila, T., Azevedo, A., Alexandre, J., Zanelato, E. Azeredo, N., Simonassi, N., Monteiro, S. (2019) Correlation between the properties of structural clay blocks obtained by destructive tests and Ultrasonic Pulse Tests. Journal of Building Engineering, 26:100869. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100869

Mohamad, G., Lourenço, P., Roman, H., Barbosa, C., Rizzatti, E. (2012) Stress-strain behavior of concrete block masonry prisms under compression. In: 15th International Brick and Block Masonry Conference.

Monteiro, S., Alexandre, J., Margem, J., Sánchez, R. (2008) Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. Construction and Building Materials, 22(6): 1281-1287. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013

Oliveira, R., Silva, F., Sobrinho, C., Azevedo, A., Delgado, J., Guimarães, A. (2018) Structural performance of unreinforced masonry elements made with concrete and horizontally perforated ceramic blocks–Laboratory tests. Construction and Building Materials, 182: 20-34. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.092

Rizzatti, E; Roman, H., Mohamad, G., Nakanishi, E. (2011) Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. Revista Matéria (Rio de Janeiro), 16(2): 730-746. https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000200008

Silva, B. Análise de resistência à compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento substituídos parcialmente por cal. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2022, 123p.

Silva, T., Cecchin, D., Azevedo, A., Valadão, I., Alexandre, J., Silva, F., Marvila, M. Gunasekaran, M., Garcia Filho, F., Monteiro, S. (2021) Technological characterization of PET - polyethylene terephthalate -added soil-cement bricks. Materials, 14(17): 5035.

Vieira, C., Andrade, P., Maciel, G., Vernilli Jr, F., Monteiro, S. (2006) Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. Materials science and engineering, 427(1-2): 142-147. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.040

Vieira, C., Morais, A., Monteiro, S., Delaqua, G. (2016) Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. Cerâmica, 62: 376-385. https://doi.org/10.1590/0366-69132016623642035

Xavier, G., Azevedo, A., Alexandre, J., Monteiro, S., Pedroti, L. (2019) Determination of useful life of red ceramic parts incorporated with ornamental stone waste. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(2): 04018381. lume 31, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002590

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REMOÇÃO DE GRAFFITIS EM PEDRAS POROSAS

R. Machado[1a], A. P. Ferreira Pinto[1b], S. Mègre Pires[2c], B. Sena da Fonseca[2d]

[1] CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

[2] Centro de Química Estrutural-CQE, Institute of Molecular Sciences, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

[a] raul.l.machado@tecnico.ulisboa.pt, [b] anapinto@civil.ist.utl.pt, [c] sofia.megre@tecnico.ulisboa.pt, [d]bruno.fonseca@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O aumento da presença de graffitis em monumentos, a redução de valor cultural inerente à sua presença e os riscos de insucesso na sua remoção e de dano nas superfícies, justificam a necessidade de estudar produtos capazes de proteger e facilitar a sua remoção. No entanto, o desempenho de um tratamento de proteção depende de múltiplos fatores, nomeadamente, das propriedades do substrato a proteger, das características do tratamento, do tipo de tinta utilizado no graffiti, etc. Assim, a utilização de um tratamento de proteção anti-graffiti num monumento e em determinado substrato deve ser precedida de um estudo prévio que permita identificar os benefícios e riscos da sua aplicação e determinar qual o papel que poderá desempenhar na preservação do património. Este trabalho teve como objetivo o estudo da eficácia anti-graffiti de um produto hidrofóbico e oleofóbico, aplicado em duas pedras porosas utilizadas no património português, nomeadamente, um calcário e um arenito. Os resultados obtidos exclusivamente através de métodos de limpeza ligeiros permitiram concluir que o produto estudado é uma potencial solução de proteção de pedras contra alguns tipos de graffitis, facilitando significativamente a sua remoção em ambas as variedades pétreas. No entanto, a sua ação de proteção demonstrou ser mais eficaz no calcário, tendo inclusivamente possibilitado a remoção completa de um graffiti de tinta à base de água. Verificou-se ainda que, para alguns tipos de graffitis (spray à base de solvente), os métodos de limpeza ligeiros (pano de algodão seco e com solução de fosfato de sódio 5%) apresentam reduzida eficácia mesmo em superfícies protegidas, sendo neste caso necessário recorrer a métodos de limpeza mais fortes.

Palavras-chave:

Pedras porosas; conservação; graffitis; produtos de protecção; limpeza

1 INTRODUÇÃO

O património construído de todo o mundo é um testemunho dos valores culturais, históricos e artísticos de diversas sociedades e culturas. A preservação deste património e dos seus materiais é um desafio complexo, especialmente quando integram variedades pétreas porosas, que são particularmente vulneráveis à degradação. A significativa incidência de graffitis em monumentos (Garcia *et al.*, 2006) tem complicado ainda mais esses esforços e constitui uma ameaça para a conservação do património construído, uma vez que para a sua remoção pode ser necessário empregar métodos de limpeza agressivos (Dionísio e Ribeiro, 2013). Portanto, devido à potencial redução do valor histórico, artístico e arquitetónico das superfícies em que são executados e à dificuldade e riscos associados à sua remoção, justifica-se a necessidade de estudar produtos capazes de proteger e facilitar a remoção de graffitis de materiais usualmente utilizados em património.

Os métodos de remoção de graffiti mais eficazes são muitas vezes inadequados e excessivamente agressivos para os substratos mais vulneráveis, como pedras porosas e/ou brandas, causando inadvertidamente danos nas suas superfícies e perdas de material (Carvalhão e Dionísio, 2014). Assim, tem-se verificado um aumento da aplicação de tratamentos anti-graffiti, com o objetivo de dificultar a adesão e penetração das tintas na superfície das pedras (García e Malaga, 2011). No entanto, já que o bom desempenho de um tratamento depende de múltiplos fatores, nomeadamente, das propriedades do substrato a ser protegido, das características do produto a aplicar, do tipo de tinta do graffiti utilizado, etc., é crucial que a aplicação de qualquer tratamento só seja efetuada após um estudo prévio das suas ações, de modo a conhecer os potenciais benefícios e riscos da sua aplicação e determinar qual o papel que poderá desempenhar na preservação do património.

O presente artigo avalia o potencial de um produto comercial com características hidrofóbicas e oleofóbicas (MasterProtect H 305) para exercer uma ação anti-graffiti em duas variedades pétreas utilizadas em património, um calcário (Pedra de Ançã) e um arenito (Grés de Silves). Ambas têm elevada porosidade, mas composições mineralógicas distintas. Adicionalmente, e com o objetivo de compreender como as tintas afetam a eficácia da limpeza dos substratos, o estudo incluiu a aplicação de dois sprays com bases diferentes, um à base de água e outro à base de solvente.

O estudo da eficácia da remoção dos graffitis adaptou parcialmente o procedimento definido na norma ASTM D6578. A avaliação do potencial benefício da aplicação do produto comercial MasterProtect H305 nas duas variedades pétreas em estudo recorreu à monitorização da variação da aparência das superfícies das amostras por registo com câmara fotográfica e com recurso a lupa binocular antes e após a limpeza com dois agentes de limpeza ligeiros. Os resultados obtidos em amostras tratadas foram confrontados com os resultados obtidos em amostras não tratadas.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS ESCOLHIDOS

2.1 VARIEDADES PÉTREAS

A análise da potencial eficácia do tratamento estudado foi realizada com recurso a amostras de Pedra de Ançã e Grés de Silves (30x30x20 mm), uma vez que são duas variedades pétreas usualmente utilizadas no património construído de Portugal e que apresentam características que promovem a fixação dos graffitis e dificultam a sua remoção.

A Pedra de Ançã é um calcário claro, muito homogéneo e amplamente utilizado em arquitetura e escultura desde o século XIV, encontrando-se presente em variados monumentos portugueses de elevado valor cultural, como são exemplo o Palácio Nacional de Queluz, a Sé Velha de Coimbra e a Porta Férrea da Universidade de Coimbra (Trindade *et al.*, 1998). O Grés de Silves, um arenito com forte presença no património construído da zona sul de Portugal, encontra-se presente em necrópoles, menires pré-históricos e em diversas construções importantes como são o caso da Sé, Castelo e Ponte de Silves (Sena da Fonseca *et al.*, 2022).

Ambas as variedades apresentam elevada porosidade (~20%), que potencia uma elevada capacidade de absorção de água, levando assim a um maior risco e vulnerabilidade à ação de graffitis (Sena da Fonseca *et al.*, 2022). A elevada porosidade das duas variedades pétreas em estudo torna a remoção do graffiti mais complexa devido à presença de poros onde a tinta pode facilmente penetrar (Whitford, 1990), tornando assim a aplicação de tratamentos anti-graffiti uma possível solução de proteção destas superfícies.

2.2 TRATAMENTO ESTUDADO

O produto comercial denominado por MasterProtect H305 (Master Builders Solutions) é um tratamento de nova geração, sem solvente, baseado numa emulsão aquosa com uma base de organo-siloxanos e que, segundo a sua ficha técnica, apresenta propriedades hidrofóbicas e oleofóbicas. De acordo com a informação técnica do produto, este é indicado para o tratamento de pedras e outros materiais e apresenta as seguintes características: redução da molhabilidade das superfícies tratadas; reduzido impacto na aparência cromática das superfícies; permeável ao vapor de água.

O produto foi aplicado nas superfícies de ambas as variedades pétreas por pincelagem e o procedimento de aplicação estabelecido teve como objetivo obter um tratamento superficial e minimizar as variações na quantidade de produto aplicado em cada amostra. O produto total absorvido nas amostras de Pedra de Ançã foi de 0,4±0,1 kg/m^2 e o produto total absorvido nas amostras de Grés de Silves foi de 0,5±0,1 kg/m^2.

O estudo relativo ao efeito destes tratamentos (Mègre Pires et al., 2024) demonstrou a sua capacidade para tornar as superfícies de ambas as variedades pétreas hidrofóbicas e oleofóbicas, assim como para reduzir drasticamente a capacidade natural destas pedras para absorver água.

2.3 APLICAÇÃO DE GRAFFITI

Com o objetivo de entender como diferentes composições químicas de tintas afetam a eficácia da proteção anti-graffiti, e assim abranger uma gama mais ampla de opções usualmente utilizadas na realização de graffiti, duas tintas comercializadas pela Montana® foram selecionadas com a cor azul, seguindo a recomendação da norma ASTM D7089-06, que faz referência ao azul como uma das cores mais difíceis de remover. As tintas escolhidas para o estudo foram: MTN Water Based 300 (base de água), com acabamento mate, uma tinta solúvel em água com ligante de poliuretano modificado e baixo teor de solventes e MTN Hardcore (base de solvente), uma tinta sintética com acabamento brilhante, formulada com resinas alquídicas modificadas que proporciona uma secagem rápida, bom endurecimento e durabilidade.

Ambas as tintas foram aplicadas com as amostras numa posição vertical, com o intuito de replicar uma parede, e as latas de tinta posicionadas perpendicularmente às superfícies das pedras (Figura 1 (a)). Com o objetivo de aplicar quantidades de tinta semelhantes em todas as amostras, tanto a distância entre o bocal dos sprays e a superfície das pedras (± 20 cm) como o tempo de aplicação foram mantidas

constantes. Após a aplicação do graffiti, as amostras foram deixadas a secar durante 5 dias, em condições laboratoriais (Figura 1 (b)).

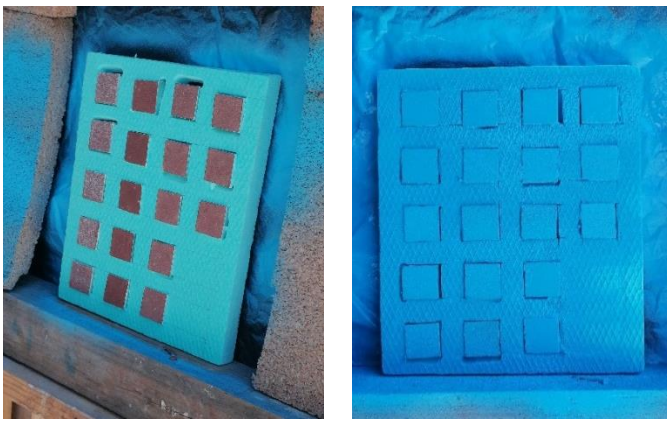


Figura 1 - Amostras de Grés de Silves antes do graffiti (esquerda), e depois do graffiti (direita).

2.4 LIMPEZA DE GRAFFITI

O processo de remoção do graffiti foi parcialmente executado de acordo com as recomendações estabelecidas na norma ASTM D6578-13, sendo utilizados no âmbito deste estudo os dois agentes de limpeza mais ligeiros, nomeadamente, i) pano de algodão seco; ii) detergente, nomeadamente uma solução de fosfato de sódio a 5%.

Este procedimento teve início com uma tentativa de remover o graffiti usando somente um pano de algodão seco. De seguida, e caso o pano de algodão seco não obtivesse sucesso na remoção total do graffiti, foi usado um pano de algodão bem saturado com a solução de fosfato de sódio a 5%. As superfícies foram esfregadas vigorosamente até que a tinta fosse completamente removida ou quando fosse visualmente patente que não era possível remover mais tinta.

No decorrer do procedimento experimental, foram realizados registos fotográficos com o objetivo de monitorizar a evolução da aplicação do graffiti e o subsequente procedimento de remoção, obtendo assim valiosas informações sobre a potencial eficácia do tratamento em estudo bem como as diferenças observadas entre variedades pétreas e tintas aplicadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 LIMPEZA DE GRAFFITI À BASE DE ÁGUA

Na Figura 2 é apresentado um resumo do aspeto visual das superfícies de Pedra de Ançã e do Grés de Silves pintadas com a tinta à base de água antes e depois de proceder à limpeza das superfícies com os dois agentes de limpeza.

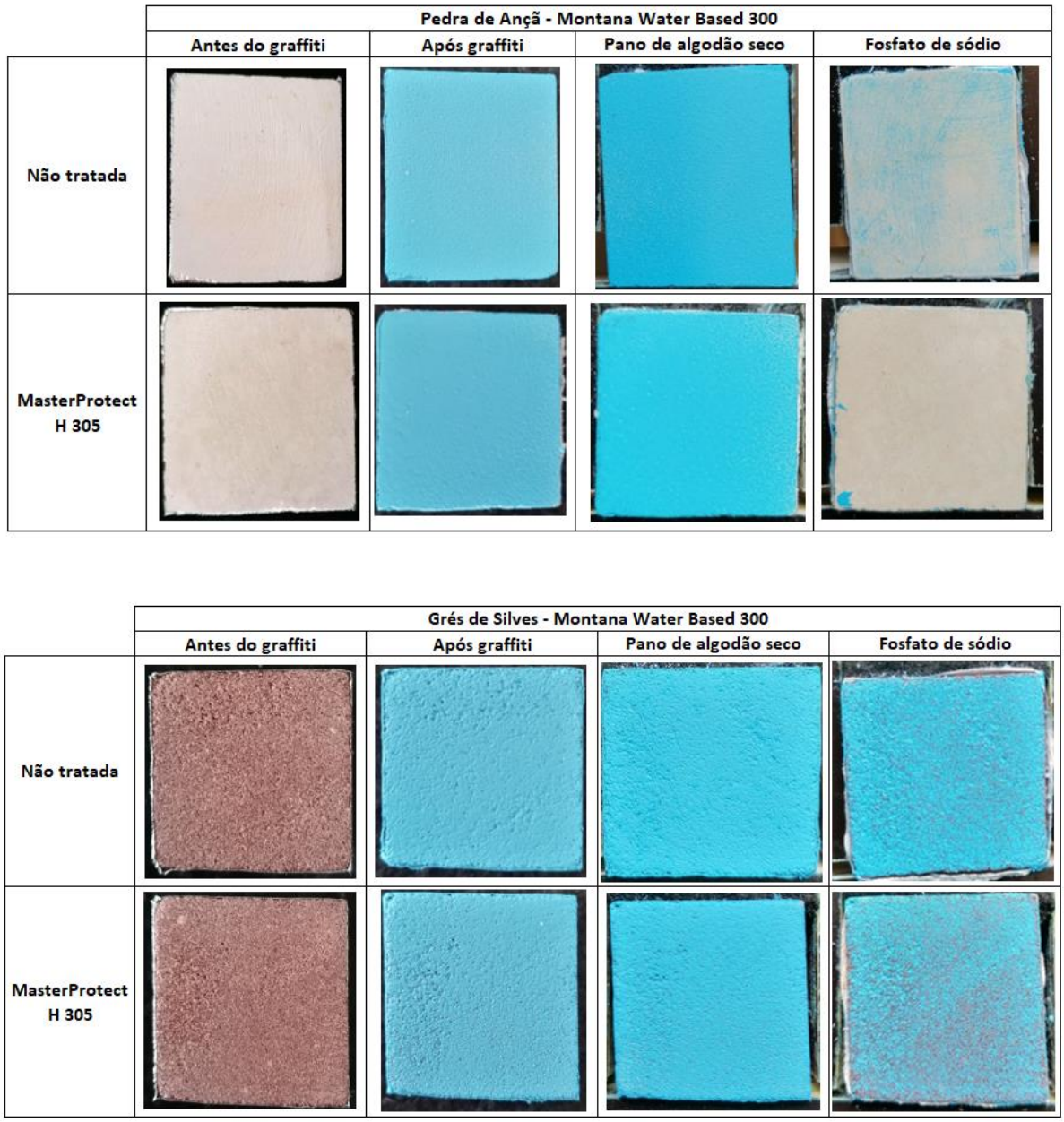


Figura 2 - Registo fotográfico das superfícies das amostras antes e após aplicação de graffiti à base de água, e após o processo de remoção com dois agentes de limpeza.

A aplicação da tinta à base de água originou a total cobertura das superfícies de todas as amostras de ambas as variedades pétreas, tornando-as totalmente azuis e sem áreas visualmente não revestidas. A utilização do pano de algodão seco para a sua remoção não foi eficaz em nenhuma das situações em estudo, nem nas amostras não tratadas, nem nas amostras tratadas com MasterProtect H305 de ambas as variedades pétreas. A aparência das amostras submetidas a este agente de limpeza manteve-se igual ou muito semelhante à aparência das amostras após a aplicação do graffiti.

O agente de limpeza seguinte, o pano saturado com uma solução de fosfato de sódio a 5%, mostrou-se mais eficaz. No caso da Pedra de Ançã não tratada, foi possível remover uma boa parte da tinta das superfícies das amostras, no entanto, a sua aparência permaneceu muito diferente da original, apresentando-se manchada e com uma tonalidade geral azulada. Em contrapartida, nas amostras de Pedra de Ançã tratadas com MasterProtect H305, a generalidade da tinta foi removida, permanecendo apenas manchas muito pequenas nas arestas das amostras. A tinta destacou-se da superfície em peliculas no decurso da limpeza com este agente, evidenciando a capacidade do produto para conferir propriedades hidrofóbicas à superfície, que não permitiram a penetração ou adesão da tinta à base de água à superfície da Pedra de Ançã.

A visão ampliada das superfícies de Pedra de Ançã, Figura 3, permite compreender melhor os resultados obtidos, com as amostras não tratadas a apresentaram uma forte tonalidade azul, enquanto as amostras tratadas com MasterProtect H 305 evidenciam que foi possível atingir, praticamente, a total remoção da tinta à base de água. As diferenças obtidas têm como justificação mais provável a maior facilidade de penetração da tinta nos poros das superfícies não tratadas.

No caso do Grés de Silves foi possível verificar que a solução de fosfato de sódio apenas promoveu uma remoção de tinta muito modesta no caso da pedra não tratada, uma vez que a superfície manteve um tom azul, quase na sua totalidade. Por sua vez, os resultados obtidos apontam para que o MasterProtect H305 tenha promovido o aumento da eficácia da remoção com a solução de fosfato de sódio, no entanto, a superfície das amostras tratadas manteve uma aparência completamente diferente da original, restando muita tinta por remover, Figura 3.

Figura 3 - Visão ampliada das superfícies das pedras antes e após limpeza da tinta à base de água.

Verifica-se assim que, a limpeza do Grés de Silves se revelou mais complexa devido às suas características intrínsecas. Ao contrário da Pedra de Ançã, que é uma pedra essencialmente constituída por um único mineral (calcite) e de dimensões muito pequenas, o que permite obter superfícies com reduzida rugosidade após o corte, o Grés de Silves é mais heterógeno uma vez que é constituído por minerais de várias durezas o que, em conjunto com outros fatores, origina superfícies com elevada rugosidade a uma escala micrométrica. Grande percentagem da tinta não removida durante o

processo de remoção permaneceu alojada nas zonas de "vale" desta rugosidade. Ainda que estas zonas se encontrem hidrofóbicas e não permitam a penetração da tinta para o interior dos poros, o processo de limpeza nestas zonas torna-se pouco eficaz.

Em todo o caso, e mesmo sem ser possível atingir uma remoção completa do graffiti, a aplicação do tratamento permitiu um incremento da facilidade de remoção de graffitis à base de água, resultando numa maior quantidade de tinta removida em comparação com as amostras não tratadas.

3.2 LIMPEZA GRAFFITI À BASE DE SOLVENTE

Na Figura 4 é apresentado um resumo da evolução visual das superfícies de Pedra de Ançã e Grés de Silves pintadas com a tinta à base de solvente.

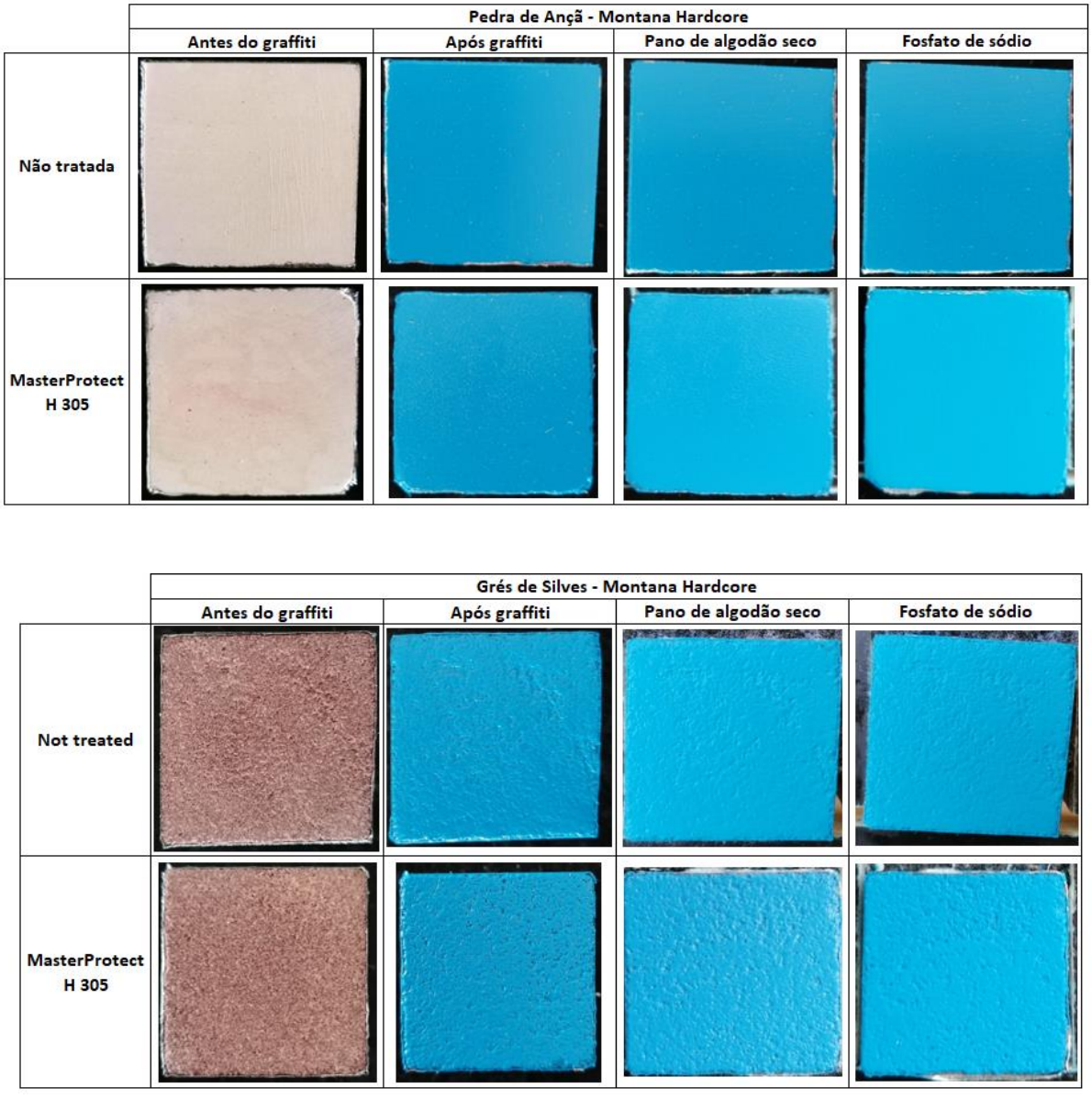


Figura 4 - Registo fotográfico das superfícies das amostras antes e após aplicação de graffiti à base de solvente, e após o processo de remoção com dois agentes de limpeza.

À semelhança da tinta à base de água, a aplicação da tinta à base de solvente promoveu a total cobertura da superfície. Relativamente ao procedimento de limpeza, ao contrário dos resultados obtidos nas amostras pintadas com a tinta à base de água, nenhum dos procedimentos de remoção causou uma limpeza evidente nas amostras não tratadas de ambas as variedades pétreas. Nas amostras tratadas com MasterProtect H305, e também em contraste com aquelas aplicadas com tinta à base de água, a solução de fosfato de sódio também não apresentou qualquer capacidade de limpeza tanto na Pedra de Ançã como no Grés de Silves, uma vez que macroscopicamente não foi possível detetar qualquer evolução no decurso do procedimento da limpeza.

A visão ampliada das superfícies de Pedra de Ançã e Grés de Silves, Figura 6, confirmam as conclusões referidas anteriormente, uma vez que é perceptivel que não existiu qualquer alteração nas superficies não tratadas e tratadas, antes e após a limpeza.

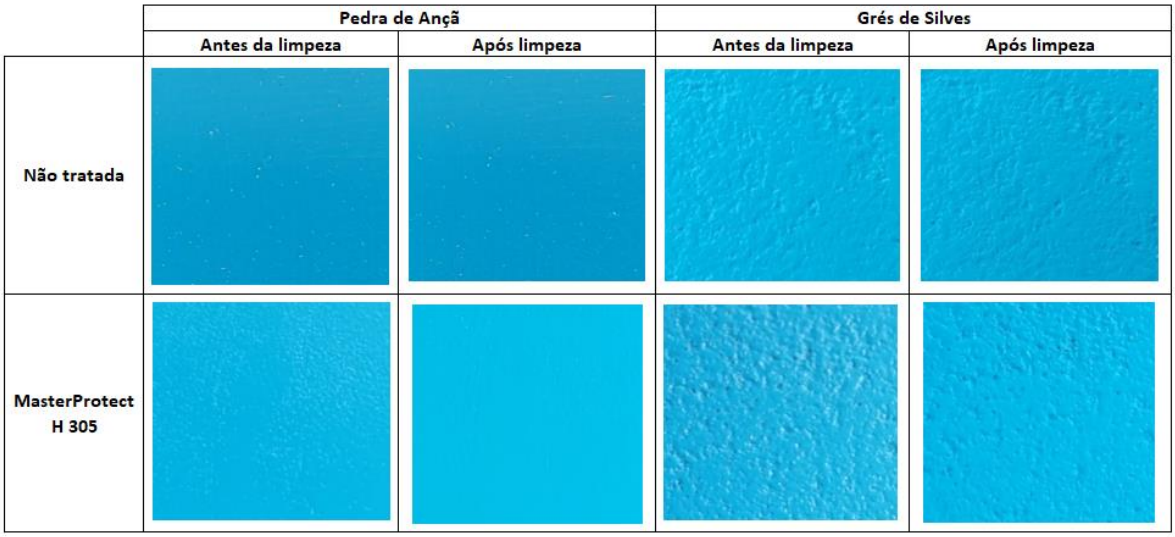


Figura 5 - Visão ampliada das superfícies das pedras antes e após limpeza da tinta à base de solvente.

Apesar do produto MasterProtect H305 ser capaz de conferir propriedades hidrofóbicas e oleofóbicas às superfícies tratadas, os resultados obtidos indiciam que a sua componente oleofóbica terá menor eficácia uma vez que não se revelou determinante para a limpeza de graffitis à base de solvente com agentes de limpeza ligeiros. A componente adesiva constituinte da tinta à base de solvente também pode contribuir para que a sua remoção tenha sido menos eficaz face ao registado com a tinta à base de água.

Os resultados obtidos permitiram concluir que graffitis executados com a tinta à base de solvente constituem um maior desafio para a sua remoção, uma vez que deram origem a uma limpeza insuficiente nas amostras não tratadas e à eventual necessidade de métodos de limpeza mais fortes do que os que foram estudados no presente artigo.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu reunir um conjunto de informação fundamental para analisar o potencial anti-graffiti do tratamento aplicado, que recorreu a um produto com acção simultaneamente hidrofóbica e oleofóbica, bem como compreender as diferenças na eficácia de limpeza entre amostras tratadas e não tratadas, nas variedades pétreas estudadas e nos tipos de tinta aplicados. A Tabela 1

apresenta um resumo da eficácia de remoção obtida com a utilização da solução de fosfato de sódio a 5% como agente de limpeza de graffitis, uma vez que a limpeza com pano seco não se mostrou eficaz em nenhuma das situações.

Quadro 1 - Resumo da eficácia do processo de remoção de graffitis com agentes de limpeza ligeiros (solução de fosfato de sódio a 5%).

Variedade Pétrea	Não tratada		MasterProtect H305	
	Tinta base água	Tinta base solvente	Tinta base água	Tinta base solvente
Pedra de Ançã	Elevada	Nenhuma	Muito elevada	Nenhuma
Grés de Silves	Muito reduzida	Nenhuma	Reduzida	Nenhuma

Genericamente, em pedras não tratadas, os resultados obtidos evidenciaram a maior dificuldade de remoção de graffitis no Grés de Silves face ao registado na Pedra de Ançã. Este contraste entre variedades pétreas é provavelmente explicado pela textura mais rugosa do Grés de Silves, que potencia a existência de cavidades e fissuras onde a tinta pode mais facilmente penetrar e assim dificultar a sua remoção.

Relativamente às diferenças registadas nos graffitis aplicados com as duas tintas estudadas, o estudo evidenciou uma maior facilidade de remoção quando o graffiti resultou da aplicação da tinta com base de água. Como é percetível no resumo do Quadro 1, as amostras de Pedra de Ançã e Grés de Silves com graffitis à base de água, independentemente do tratamento, foram mais facilmente limpas. Este resultado é provavelmente atribuído à pior adesão desta tinta a ambas as superfícies e à elevada hidrofobicidade conferida pelo tratamento.

De forma geral, a aplicação do produto comercial MasterProtect H305 permitiu incrementar a eficácia da remoção dos graffitis com recurso a agentes de limpeza ligeiros, originando melhores resultados face aos obtidos nas amostras não tratadas. Algo particularmente benéfico em casos em que os graffitis se baseiam em tintas à base de água.

O tratamento MasterProtect H305 apresenta-se como uma potencial solução para a proteção de pedras porosas contra graffiti à base de água. Para graffitis à base de solventes, justifica-se o estudo da sua contribuição na eficácia de agentes de limpeza mais fortes, como estabelecido na norma ASTM D7089-06.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento do Projeto GreenMAP: Produtos multi-ação verdes para a conservação sustentável de pedras porosas de construção histórica (PTDC/ECI-EGC/2519/2020; https://doi.org/10.54499/PTDC/ECI-EGC/2519/2020); CQE (UIDB/00100/2020 e UIDP/00100/2020; https://doi.org/10.54499/UIDP/00100/2020 e https://doi.org/10.54499/UIDB/00100/2020); IMS (LA/P/0056/2020; https://doi.org/10.54499/LA/P/0056/2020) e CERIS (UIDB/04625/2020). O autor B. Sena da Fonseca agradece o apoio individual à FCT (2020.04185.CEECIND/CP1587/CT0004; https://doi.org/10.54499/2020.04185.CEECIND/CP1587/CT0004).

REFERÊNCIAS

ASTM Standard D6578/D6578M-13, 2018, "Standard Practice for Determination of Graffiti Resistance"

ASTM Standard D7089 – 06, 2014, "Standard Practice for Determination of the Effectiveness of Anti-Graffiti Coating for Use on Concrete, Masonry and Natural Stone Surfaces by Pressure Washing"

Carvalhão, M., Dionísio, A. (2014). Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcareous stones. Journal of Cultural Heritage, 16(4):579-590. https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.10.004

Dionísio, A. & Ribeiro, T. (2013). When graffiti is not art: the damage of alkyd sprays on calcareous stones employed in cultural heritage. In P. Frediani, M. Frediani, & L. Rosi (Eds.), Cultural Heritage: protection, developments, and international perspectives (Focus on Civilizations and Cultures), 11:279-291. http://hdl.handle.net/11328/4285

Ferreira Pinto, A. P, Delgado Rodrigues, J., (2003) – Hidrofugação da pedra. Recomendações para a optimização da relação eficácia/custo. Actas do 3º ENCORE sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, editadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 475-482.

Ficha técnica do produto MasterProtect H305 (versão 13.4.2021). Disponível em: https://assets.construction-chemicals.mbcc-group.com/pt-pt/masterprotect-h-305.pdf

García, O., Malaga, K. (2012). Definition of the procedure to determine the suitability and durability of an anti-graffiti product for application on cultural heritage porous materials. Journal of Cultural Heritage, 13(1):77-82. https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.004

García, O., Rodriguez-Maribona, I., Laschewsky, A., Dworak, A. (2007). Development of a new antigraffiti system, based on traditional concepts, preventing damage of architectural heritage materials. Proceedings of the 7th European Conference SAUVEUR Safeguarded Cultural Heritage. Understanding & Viability for the Enlarged Europe, 111-115. https://cordis.europa.eu/project/id/513718

Mègre Pires, S.; Ferreira Pinto, A.P.; Machado, R.; Sena da Fonseca, B. (2024) Estudo do efeito de um produto hidro e oleofóbico em pedras porosas presentes no património construído. Livro de artigos 5º CLBMCS/Construção 2024

Sena da Fonseca, B., Ferreira Pinto, A.P., Piçarra, S., Montemor, M.F. (2022). Propriedades e degradação de pedras muito porosas com expressão no património português. Construção 2022, Volume II, Capítulo 7.

Trindade M., Quinta-Ferreira, M. e Oliveira, R. (1998). Contribution to the study of Ançã limestone. Eighth International Congress International Association for Engineering, Geology and the Environment, Proceedings. 2945–2952.

Whitford, M. (1990). Getting Rid of Graffiti: A practical guide to graffiti removal and anti-graffiti protection, 82-121

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PARA IMPRESSÃO 3D COM PERLITA EXPANDIDA

Marcella Barbosa[a]; Marcos Anjos[ab]; José Vinícius Maia[b]; Aires Camões[c]; Paulo J. S. Cruz[d]

[a]Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, marcella.barbosa.700@ufrn.edu.br

[b]Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil

[c]CTAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

[d]Laboratório de Paisagens, Património e Território (Lab2PT), Escola de Arquitetura, Arte e Design, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO

A necessidade em aprimorar os processos construtivos de modo a introduzir conceitos de produtividade e sustentabilidade vem recebendo bastante atenção nos últimos anos. Nesse sentido, a impressão 3D de concreto (3DCP) se destaca por possibilitar uma construção automatizada, livre de fôrmas e com menor tempo de produção. Em termos de sustentabilidade, além da redução na geração de resíduos que esta tecnologia oferece, também é possível melhorar a eficiência energética das estruturas impressas ao incorporar agregados leves na dosagem dos compósitos 3DCP. Sabendo que a utilização de novos materiais e métodos construtivos inovadores são vistos como um desafio para o setor, torna-se imprescindível a realização de pesquisas científicas que englobem essas questões. Sendo assim, o objetivo do presente estudo consiste em avaliar o uso de diferentes teores de perlita expandida como substituição ao agregado natural nas propriedades do estado fresco de compósitos 3DCP. Tomando partido de uma mistura de referência na proporção de 1:2:0,36 (cimento:areia:água, em massa), utilizando aditivo superplastificante e modificador de viscosidade, foram testados 4 percentuais de substituição da areia pelo agregado leve mencionado: 25%, 50%, 75% e 100%. Análises de espalhamento na mesa de consistência, densidade de massa, viscosidade (usando um viscosímetro), retenção de água e capacidade de construção foram realizadas. Os resultados mostram que, de modo geral, a geometria dos agregados e a forma que se encontram empacotados na mistura exercem grande influência nas propriedades do estado fresco. Finalmente, considerando tanto o sistema de impressão utilizado como também a essencialidade em atender critérios específicos desta nova técnica construtiva, foi possível encontrar dosagens otimizadas que possibilitam o uso da perlita expandida nos compósitos 3DCP.

Palavras-chave: Impressão 3D, Estado fresco, Perlita expandida, Capacidade de construção

1 INTRODUÇÃO

Aspectos associados ao uso de tecnologias obsoletas, baixa velocidade de construção, alto consumo energético e crescente escassez de trabalhadores qualificados têm sido apontados como questões preocupantes frente ao avanço da construção civil (Pessoa *et al.*, 2021). De modo a resolver tais problemas, é fundamental que o setor incentive a implementação de tecnologias mais eficazes, inovadoras e sustentáveis (Motalebi; Khondoker; Kabir, 2024).

Nesse contexto, a manufatura aditiva de materiais cimentícios, também conhecida como impressão 3D de concreto (3DCP), vem recebendo bastante atenção tanto da indústria quanto da comunidade acadêmica por possibilitar práticas de construção mais rápidas e precisas (Tabassum e Ahmad Mir, 2023), com redução significativa na geração de resíduos, custos com mão-de-obra, tempo de execução e acidentes de trabalho, além de proporcionar maiores índices de produtividade e liberdade geométrica na formulação de peças complexas (Khan; Koç; Al-Ghamdi, 2021). Em termos de sustentabilidade, levando em conta a diminuição nos desperdícios da construção que o 3DCP oferece, também é possível melhorar a eficiência energética das estruturas impressas ao incorporar agregados leves na dosagem desses compósitos (Bedarf *et al.*, 2023).

Somado a isso, o emprego desse tipo de agregado tende a reduzir o peso próprio imposto aos filamentos empilhados, diminuindo a probabilidade de deformação com o avanço da impressão. Melhoria de isolamento termo-acústico e maior resistência ao fogo também vão caracterizar os elementos extrudados. Ainda é possível mencionar uma maior economia de custos no transporte de peças pré-fabricadas devido à sua menor densidade. Embora essa diminuição possa levar a um desempenho mecânico inferior, já é possível a dosagem de compósitos leves sem o comprometimento de suas características intrínsecas e com valores de resistências consideráveis (Wolfs; Bos; Salet, 2018).

No entanto, uma grande dificuldade enfrentada por esta tecnologia está relacionada ao fornecimento de misturas que atendam aos critérios do sistema de impressão (como, por exemplo, bombeabilidade, capacidade de extrusão e de construção). Ou seja, é necessário otimizar as propriedades reológicas de modo a proporcionar fluidez adequada ao processo de extrusão e, após a deposição das camadas sobrepostas, estas devem se apresentar com estabilidade e viscosidade suficientes à manutenção de forma da peça impressa (Chen *et al.*, 2020). Normalmente, composições dosadas para aplicação no 3DCP apresentam grandes quantidades de cimento, frações finas e aditivos especiais, resultando em custos e pegada de carbono mais elevados (Flatt e Wangler, 2022). Tendo isso em vista, diversas estratégias têm sido analisadas para minimizar os teores de cimento e areia natural destes compósitos.

Alguns estudos já têm tratado acerca do desenvolvimento de misturas cimentícias contendo agregados de baixa densidade para impresão 3D, tais como borracha granulada (Sambucci *et al.*, 2020; Volpe *et al.*, 2021b; Sambucci e Valente, 2021; Zou *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023) e resíduos de vidro (Cuevas *et al.*, 2021; Volpe *et al.*, 2021a; Cuevas *et al.*, 2023), porém poucos avaliaram o efeito da perlita expandida (PE) nesse tipo de composição (Pasupathy; Ramakrishnan; Sanjayan, 2022; Tay; Tan; Wong, 2023). Sabendo que a utilização de novos materiais e métodos construtivos inovadores são vistos como um desafio para o setor, torna-se imprescindível a realização de pesquisas científicas que englobem essas questões. Sendo assim, o presente artigo busca avaliar o uso de diferentes teores de perlita expandida como substituição ao agregado natural nas propriedades do estado fresco de compósitos 3DCP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

A dosagem dos compósitos 3DCP considerou o emprego de cimento Portland CP V ARI (equivalente ao CEM I – EN 197-1), areia de rio, perlita expandida (PE), aditivo superplastificante à base de policarboxilatos (SP), aditivo modificador de viscosidade à base de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e água. A análise granulométrica dos agregados (Figura 1) e demais ensaios de caracterização dos materiais (Quadro 1) foram realizados.

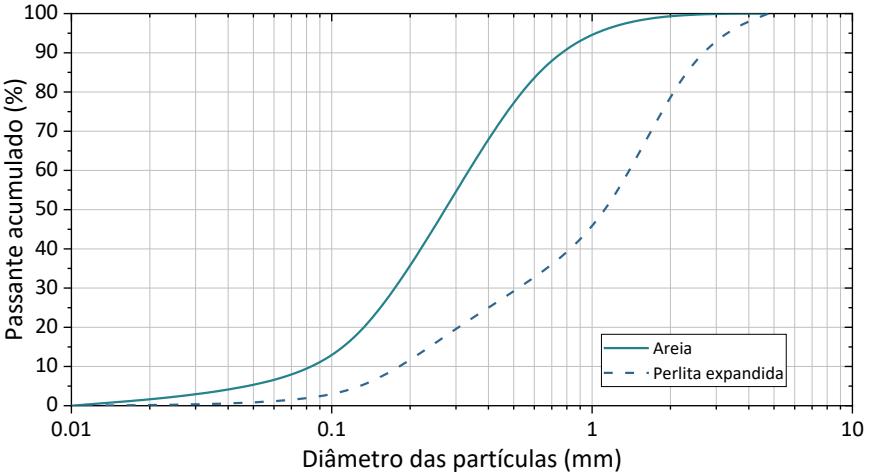


Figura 1 – Granulometria da areia e da perlita expandida

Quadro 1 – Caracterização dos materiais

Propriedade	Material	Método	Valor
Massa específica (g/cm^3)	Cimento	ABNT NBR NM 23:2000	3,04
	Areia	ABNT NBR NM 52:2009	2,61
Massa unitária solta (g/cm^3)	Areia	ABNT NBR NM 45:2006	1,58
	Perlita expandida	ABNT NBR NM 45:2006	0,072
Diâmetro máximo característico (mm)	Areia	ABNT NBR NM 248:2003	1,18
	Perlita expandida	ABNT NBR NM 248:2003	2,36
Módulo de finura	Areia	ABNT NBR NM 248:2003	1,42
	Perlita expandida	ABNT NBR NM 248:2003	2,77
Teor de material pulverulento (%)	Areia	ABNT NBR NM 46:2003	4,15

2.2 MÉTODOS

Tendo como base estudos prévios conduzidos pelo grupo de pesquisa (Barbosa *et al.*, 2022; Nunes *et al.*, 2023), a mistura 1:2,0:0,36 (cimento:areia:água, em massa) foi adotada como referência pela possibilidade de ser extrudada nas condições da impressora utilizada. A partir daí, foram testados 4 percentuais de substituição da areia pela perlita expandida: 25%, 50%, 75% e 100%. É importante destacar que em função da diferença de massa específica dos agregados, essa substituição foi feita levando em consideração o volume. Assim, as proporções avaliadas são destacadas pelo Quadro 2.

Quadro 2 – Proporções em massa

Traços	Cimento	Areia	PE	a/c	SP (%)	HPMC (%)
REF	1	2	0	0,36	0,7	0,15
PE25	1	1,49	0,02	0,36	0,7	0,15
PE50	1	0,99	0,05	0,36	0,7	0,15
PE75	1	0,5	0,07	0,36	0,7	0,15
PE100	1	0	0,09	0,36	0,7	0,15

O processo executivo se deu por meio de pesagem em balança de precisão, pré-homogeneização de todos os materiais secos e produção das misturas. Uma vez obtido o compósito, prosseguiu-se com a realização dos ensaios no estado fresco (para todas as dosagens propostas) e também na impressora 3DCP (considerando apenas as composições REF, PE50 e PE100). A referida máquina, com configuração em pórtico, apresenta área de impressão de 1 m^2, altura de 1,20 m e bico circular com 25 mm de diâmetro.

2.2.1 Ensaios no estado fresco

A avaliação do espalhamento na mesa de consistência ocorreu mediante indicações da NBR 13276 (ABNT, 2016). Contudo, levando em consideração as propriedades requisitadas ao processo de extrusão, esse teste foi repetido em diferentes intervalos de tempo para analisar sua perda de consistência com o tempo (Figura 2): imediatamente após finalização da mistura (t0) e de 10 em 10 minutos até totalizar em 30 minutos de ensaio (t1 – 10 minutos, t2 – 20 minutos e t3 – 30 minutos).

Figura 2 – Perda de consistência com o tempo da composição de referência

Em relação à viscosidade, esta foi investigada de forma similar ao proposto por Nunes *et al.* (2023). Utilizou-se um viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I (IKA®) à temperatura constante de 25 °C com uma palheta de quatro pás (104 mm de comprimento, 12,7 mm de diâmetro). A mistura inserida num Becker de 500 ml foi submetida à análise em diferentes intervalos de velocidade angular (8 rpm, 12 rpm, 15 rpm, 17 rpm, 30 rpm, 40 rpm e 84 rpm), primeiramente de forma crescente e, posteriormente, de forma decrescente com os mesmos valores de velocidade. Isso foi feito para que o compósito entrasse em fluxo e tornasse possível a obtenção de resultados mais consistentes.

A densidade de massa foi ensaiada mediante especificações da NBR 13278 (ABNT, 2005), a partir da inserção de 3 camadas da mistura em um molde cilíndrico, sendo cada uma golpeada 20 vezes com a espátula na posição vertical. Esse recipiente ainda foi submetido à 3 quedas (cada uma à altura de 3 cm) e posterior rasamento do compósito fresco. A verificação da retenção de água, por sua vez, foi feita conforme indicado na NBR 13277 (ABNT, 2005), onde as composições foram submetidas a uma pressão de sucção equivalente a uma coluna de 51 mm de mercúrio por 15 minutos. Em ambos os ensaios, os dados necessários foram coletados para cumprimento dos cálculos estabelecidos nas normas correspondentes.

Por fim, a avaliação da capacidade de construção se deu mediante adaptação de metodologias presentes na literatura (Pasupathy; Ramakrishnan; Sanjayan, 2022; Nunes *et al.*, 2023). Antes de iniciar o processo de impressão, levando em conta que a capacidade do motor extrusor varia de 10 – 60 Hz, 1 filamento foi extrudado para 4 taxas de bombeamento diferentes (15 Hz, 30 Hz, 45 Hz e 60 Hz), enquanto a velocidade linear (2100 mm/min) e altura de queda do bico (20 mm) foram mantidas constantes. Esse teste permite definir as condições de impressão de cada mistura considerada uma vez que a obtenção da peça 3DCP não vai depender apenas de aspectos relacionados a dosagem, mas também de ajustes nos parâmetros da máquina. Além disso, a relação h/d foi analisada conforme apresentada por Huang *et al.* (2022), sendo "h" a altura de deposição e "d" o diâmetro do bico extrusor. Uma vez definidos esses valores, blocos com dimensões projetadas de 190 mm x 140 mm x 190 mm (altura x largura x comprimento) foram impressos e a quantidade de camadas necessárias à sua obtenção foram levadas em consideração.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados do teste na mesa de consistência realizado em diferentes intervalos de tempo.

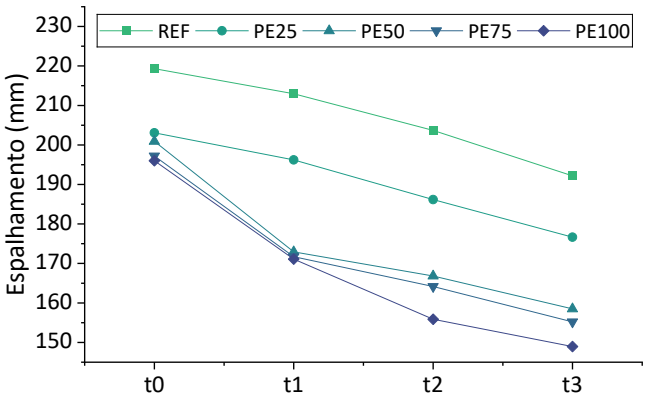


Figura 3 – Espalhamento das composições de análise

De modo geral, é visto que o espalhamento diminui com o aumento no teor de perlita em substituição à areia natural para todos os intervalos de tempo que o ensaio foi executado. Em t0 (imediatamente após a finalização da mistura) a diminuição foi de 7,4%, 8,4%, 10,1% e 10,6% para PE25, PE50, PE75 e PE100, respectivamente, em comparação à REF. Essa redução não foi tão acentuada entre as dosagens contendo agregado leve, o que pode estar atribuído ao fato da PE ($d_{máx}$ = 2,36 mm) com maior tamanho de partícula em relação à areia ($d_{máx}$ = 1,18 mm) demonstrar uma microestrutura com predominância de poros fechados, provocando uma absorção de água com consequente diminuição da fluidez de forma mais lenta (Leyton-Vergara *et al.*, 2019). Com o passar do tempo, esses valores de espalhamento vão ficando cada vez menores, principalmente nas misturas com maior teor de PE.

É visto que os resultados em t0 variaram de 196 – 219 mm, de forma similar ao encontrado por Inozemtcev e Qui Duong (2020) para compósitos 3DCP com cenosferas de vidro (170 – 225 mm). Para os demais intervalos de tempo, foram encontradas faixas de espalhamento de 171 – 213 mm (t1 = 10 min), 156 – 204 mm (t2 = 20 min) e 149 – 192 mm (t3 = 30 min). Mesmo decorridos 30 minutos do compósito em descanso (t3), a dosagem de referência demonstrou comportamento similar às dosagens com PE ensaiadas imediatamente após a finalização da mistura (t0). Em t3, perdas de fluidez de 8,1%, 17,5%, 19,2% e 22,5% foram constatadas para, respectivamente, PE25, PE50, PE75 e PE100, comparativamente à REF. Tal comportamento já era esperado devido ao uso do agregado leve,

contudo, é importante ressaltar que esses valores não podem ser tomados como condições para extrusão em todos os sistemas de impressão pois, além dos aspectos relacionados ao processo de dosagem, o desenvolvimento de compósitos 3DCP também vai depender da máquina utilizada. Sob o ponto de vista da impressão 3D, composições com maior tempo de manuseio podem ser vistas como indicativo de que tais traços não acarretarão em problemas no sistema de bombeamento da impressora dentro deste intervalo de tempo. Na sequência, os resultados obtidos para densidade de massa, retenção de água e viscosidade são destacados na Figura 4.

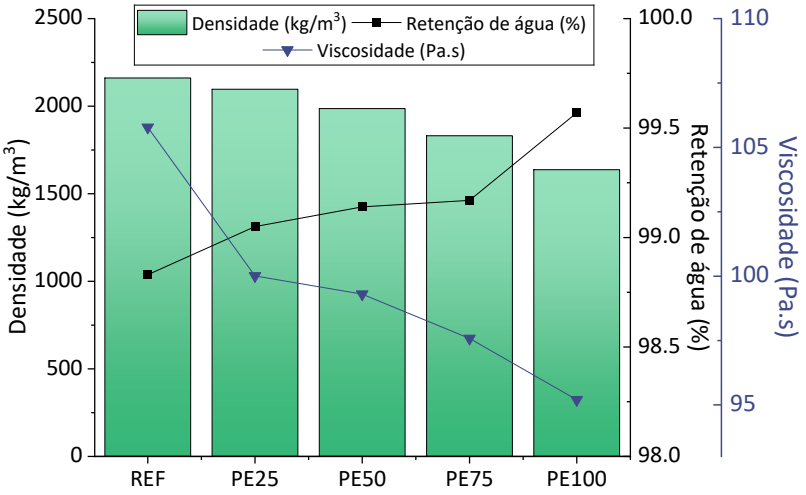


Figura 4 – Resultados de densidade, retenção de água e viscosidade das misturas

Em relação à densidade no estado fresco, quanto maior o teor de substituição da areia natural pela perlita expandida, menor foram os valores alcançados para esta propriedade. Comparado à REF, essas reduções foram de 3,0%, 8,1%, 15,3% e 24,3% para, respectivamente, PE25, PE50, PE75 e PE100. Foi possível permanecer na faixa de densidade de 1637 – 2161 kg/m^3, estando próximo ao encontrado por Zhou *et al.* (2018) para composições leves com microesferas de vidro e cenosferas de cinza volante (1589 – 2333 kg/m^3) e Rangel *et al.* (2023) para misturas 3DCP confeccionadas com cortiça granulada (1480 – 2155 kg/m^3).

Observa-se que os resultados obtidos na análise de retenção de água foram elevados, o que já era esperado devido ao uso da hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) nas dosagens. Estes aditivos se caracterizam por promover uma hidratação mais lenta da pasta de cimento através da fixação das moléculas de água em sua estrutura, diminuindo a quantidade que se apresenta livre e, consequentemente, aumentando a retenção de água das misturas (Zhang *et al.*, 2016). Uma vez que o teor de HPMC permaneceu constante para todas as composições (0,15% em relação à massa do cimento), as variações constatadas podem estar relacionadas à incorporação da PE.

Este agregado leve é capaz de reter água tanto no interior dos poros como também na superfície do material. É de se esperar que maiores quantidades impliquem em capacidade de reter água aumentada. Contudo, é importante destacar que o tamanho das partículas de perlita expandida exerce certa influência nesta propriedade, tanto pela predominância de poros fechados nos grãos de maiores dimensões como também pela sua menor superfície específica. Ou seja, quanto maior a granulometria da PE, mais lento se torna o processo de retenção de água (Lee *et al.*, 2022). Como consequência, as variações verificadas nas misturas contendo este agregado (PE25, PE50, PE75 e PE100) foram moderadas, aumentando levemente em função da maior quantidade de perlita (alcançando o valor máximo de 99,6% para PE100) quando comparado à REF (98,8%).

A viscosidade das misturas, por sua vez, foi determinada com base na velocidade angular do motor que permitiu a extrusão dos compósitos frescos. Comparado à REF, verifica-se reduções de 5,4%, 6,1%, 7,7% e 10,1% para, respectivamente, PE25, PE50, PE75 e PE100. Sabendo que a geometria dos agregados e a forma como estão empacotados na mistura possuem grande influência nas propriedades do estado fresco, pode-se dizer que, mesmo a perlita expandida sendo um agregado poroso, a principal razão para melhoria do fluxo e consequente redução da viscosidade com o aumento da energia aplicada pode estar relacionada à forma como os agregados estão empacotados. Uma maior esfericidade da partícula de PE além de diâmetro máximo característico mais elevado que o da areia normal utilizada (PE = 2,36 mm, AN = 1,18 mm) provavelmente implicou em menores forças de atrito entre os grãos e, consequentemente, ocasionou em maior mobilidade da mistura mediante aplicação da energia de cisalhamento.

Sabendo que o processo de impressão não depende apenas de aspectos intrínsecos à mistura, a Figura 5 destaca os resultados da avaliação da capacidade de extrusão das composições 3DCP.

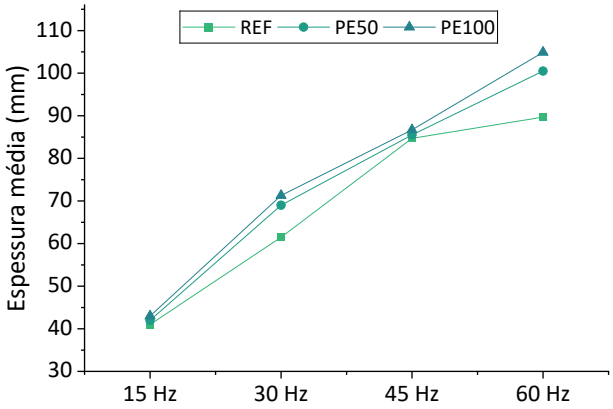


Figura 5 – Espessura média das camadas para as diferentes taxas de extrusão

Para uma mesma taxa de extrusão (15 Hz), obteve-se uma espessura média da camada aproximada para as três composições. Contudo, percebe-se que ao elevar a capacidade de bombeamento de forma simultânea ao percentual de PE, a espessura média dos filamentos aumenta também. Em 60 Hz, esse acréscimo foi de 12,0% e 17,0% para PE50 e PE100, respectivamente, em relação à REF. Conforme constatado na avaliação de viscosidade das dosagens, maiores teores de PE promoveram aumento na mobilidade do compósito fresco. De forma similar, quando submetida a aplicação de energia de cisalhamento decorrente do processo de extrusão, a deposição da mistura foi facilitada. De modo a restaurar a estabilidade do material durante a fase de repouso e considerando o empilhamento de camadas sobrepostas até a obtenção de uma peça 3DCP com altura estimada em 190 mm, verificou-se a importância de reduzir a taxa de bombeamento. A Figura 6 ilustra a variação nas dimensões dos filamentos extrudados.

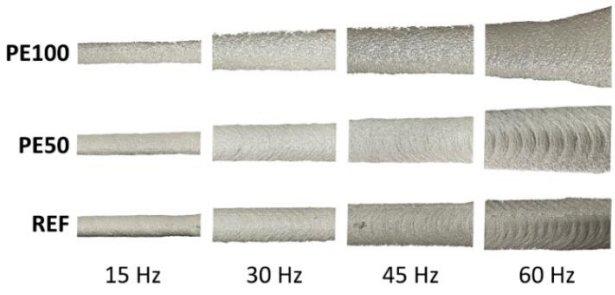


Figura 6 – Avaliação da capacidade de extrusão das misturas REF, PE50 e PE100

Ainda é possível notar a presença de marcas na superfície superior das misturas REF e PE50 quanto maior a taxa de bombeamento, sendo esse fato ainda mais evidente aos 60 Hz. Isso pode ser atribuído a uma elevada quantidade de material que é depositado conforme maior é a capacidade de extrusão do motor. Além disso, manter a altura de queda constante para todas as misturas permitiu que o bico deixasse marcas no filamento com o aumento da taxa de extrusão. O mesmo não foi evidenciado para a composição PE100, onde o principal motivo pode ser a maior mobilidade dessa dosagem que, ao ser submetida à energia de cisalhamento proveniente do processo de extrusão, já se espalhava com facilidade pela superfície. Em decorrência disso, a altura do filamento diminuiu em comparação às demais composições e, deste modo, impossibilitou a presença de marcas até mesmo para a maior taxa de bombeamento considerada. Sendo assim, a impressão dos blocos 3DCP ocorreu mediante especificado no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros utilizados na impressão dos blocos 3DCP

Misturas	Altura de queda (mm)	h/d	Velocidade linear (mm/min)	Taxa de extrusão (Hz)	N° de camadas empilhadas	Altura real dos blocos (mm)
REF	20	0,8	2100	15	15	190 ± 0,1
PE50	15	0,6	2100	12	16	190 ± 0,1
PE100	10	0,4	2100	10	26	190 ± 0,3

Percebe-se que para atingir aproximadamente a mesma altura, o número de camadas empilhadas variou em função da composição. A mistura REF foi a que evidenciou a menor quantidade de filamentos sobrepostos, onde a obtenção do bloco se deu com base nos mesmos parâmetros definidos na avaliação da capacidade de extrusão. A dosagem PE50, por sua vez, requisitou que ajustes fossem executados para proporcionar uma maior retenção de forma mediante empilhamento das camadas já que, ao manter as condições de impressão iguais à composição REF, demonstrou uma maior deformabilidade da peça com o decorrer da impressão. Ao implementar as mudanças julgadas necessárias (reduzir a altura de queda do bico e taxa de extrusão), foi possível produzir um bloco 3DCP que se assemelhou bastante ao traço de referência, com apenas uma camada a mais. PE100, por sua vez, já vinha exibindo nas demais análises uma elevada mobilidade da mistura. Esse comportamento se intensificou durante a impressão do elemento, dificultando o empilhamento das camadas sob condições semelhantes à REF e PE50. Deste modo, a execução do bloco só foi possível ao também reduzir os parâmetros de taxa de extrusão e altura de queda do bico. Levando em conta o objetivo de alcançar a altura projetada de 190 mm, foi necessário empilhar uma maior quantidade de camadas já que estas sofreram maiores deformações no decorrer da impressão.

Huang *et al.* (2022) verificaram que menores valores de relação h/d ocasionam em achatamento dos filamentos. Pode-se dizer que o equilíbrio encontrado entre essas variáveis e a taxa de bombeamento permitiu a obtenção de peças impressas para todas as composições avaliadas (REF, PE50 e PE100). Seu aspecto final é destacado pela Figura 7.

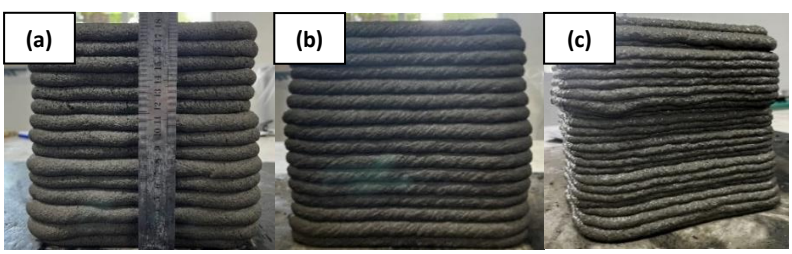


Figura 7 – Blocos impressos (a) REF (b) PE50 (c) PE100

Mesmo alterando os parâmetros da máquina de modo a possibilitar o empilhamento das camadas para todas as dosagens, as misturas REF e PE50 conseguiram se apresentar esteticamente bem semelhante entre si, destacando-se pela integridade dos filamentos e ausência de falhas de continuidade. De acordo com Buswell *et al.* (2018), esse comportamento é indicativo de uma boa qualidade de impressão. Na composição PE100, por sua vez, nota-se uma evidente deformação lateral nas camadas superiores e inferiores que, conforme sugerido por Wolfs e Suiker (2019), pode estar relacionada à baixa rigidez do compósito fresco ou à excentricidade na colocação dos filamentos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente ao exposto, verifica-se que o presente artigo cumpriu com o objetivo inicialmente proposto ao avaliar as propriedades no estado fresco de compósitos 3DCP com diferentes teores de perlita expandida. De modo geral, é possível concluir que:

- O espalhamento das misturas reduziu com o aumento no percentual de PE para todos os intervalos de tempo que o ensaio foi realizado. Depois da composição de referência, PE25 foi a dosagem que demonstrou menor perda de consistência com o tempo.
- A densidade dos compósitos frescos diminuiu quanto maior o teor de perlita expandida utilizada, atingindo o menor valor (1637 kg/m^3) para a dosagem com percentual máximo de substituição da areia natural por agregado leve (PE100).
- Para todas as composições, a retenção de água foi considerada elevada devido ao uso da hidroxipropilmetilcelulose. Uma vez que o percentual desse aditivo foi constante para todas as dosagens, o aumento nessa propriedade foi atribuído a presença da PE.
- As propriedades reológicas podem ser fortemente influenciadas pela geometria dos agregados e pela forma que se encontram empacotados na mistura. Dessa forma, a composição contendo apenas perlita (PE100) demonstrou maior mobilidade sob fluxo por conta da esfericidade e maior diâmetro do agregado leve comparado ao agregado natural.
- Menores taxas de extrusão permitiram a obtenção de filamentos com menor alteração na espessura média das camadas. Ao aumentar esse parâmetro, quanto menor a viscosidade da mistura, maior eram as variações dimensionais dos filamentos.
- O número de camadas empilhadas na construção dos blocos 3DCP variou em função da composição. Mesmo alterando as condições de impressão para cada peça impressa, REF e PE50 destacaram-se pela integridade de seus filamentos, enquanto PE100 evidenciou uma maior deformabilidade.
- Apesar das propriedades intrínsecas da perlita expandida, foi possível extrudar com sucesso blocos 3DCP contendo 50% desse agregado em substituição parcial à areia mantendo os teores de SP, HPMC e relação água/cimento iguais aos da composição de referência. É válido ressaltar que a realização de ajustes nestes aspectos para as demais dosagens analisadas pode trazer melhorias no desempenho das misturas com PE, principalmente em associação à parâmetros de impressão definidos adequadamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB) -

Termo n° 16/2022, Instituto Federal da Paraíba (IFPB) - PRPIPG e DIPPED/JP e a Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13276, de 28 de setembro de 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 13277, de 31 de outubro de 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 13278, de 31 de outubro de 2005. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 23, de 15 de julho de 2000. Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 248, de 01 de setembro de 2003. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 45, de 31 de março de 2006. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR NM 46, de 01 de setembro de 2003. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 52, de 10 de fevereiro de 2009. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Barbosa, M. S., dos Anjos, M. A. S., Cabral, K. C., & Dias, L. S. (2022). Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. Construction and Building Materials, 341. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127775

Bedarf, P., Szabo, A., Zanini, M., & Dillenburger, B. (2023). Robotic 3D Printing of Geopolymer Foam for Lightweight and Insulating Building Elements. 3D Printing and Additive Manufacturing. https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0183

Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research, 112(May), 37–49. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006

Chen, Y., Chaves Figueiredo, S., Li, Z., Chang, Z., Jansen, K., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020). Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. Cement and Concrete Research, 132(February). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106040

Cuevas, K., Chougan, M., Martin, F., Ghaffar, S. H., Stephan, D., & Sikora, P. (2021). 3D printable lightweight cementitious composites with incorporated waste glass aggregates and expanded microspheres – Rheological, thermal and mechanical properties. Journal of Building Engineering, 44. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102718

Cuevas, K., Strzałkowski, J., Kim, J. S., Ehm, C., Glotz, T., Chougan, M., Ghaffar, S. H., Stephan, D., & Sikora, P. (2023). Towards development of sustainable lightweight 3D printed wall building envelopes – Experimental and numerical studies. Case Studies in Construction Materials, 18. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01945

Flatt, R. J., & Wangler, T. (2022). On sustainability and digital fabrication with concrete. Cement and Concrete Research, 158. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106837

Huang, X., Yang, W., Song, F., & Zou, J. (2022). Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters. Construction and Building Materials, 335. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127496

Inozemtcev, A., & Qui Duong, T. (2020). High-strength lightweight concrete with internal curing for 3D-printing in construction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 869(3). https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032003

Khan, S. A., Koç, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications. In Journal of Cleaner Production (Vol. 303). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027

Lee, K. S., Lee, D. S., Lim, C. S., Lee, S. P., Yang, J. E., & Chung, D. Y. (2022). Water Retention Characteristics of Various Sizes of Expanded Perlite Produced from Two Different Types of Rocks. Horticulturae, 8(9). https://doi.org/10.3390/horticulturae8090805

Leyton-Vergara, M., Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J., Cárdenas-Triviño, G., & Piggot-Navarrete, J. (2019). Influence of granulometry on thermal and mechanical properties of cement mortars containing expanded perlite as a lightweight aggregate. Materials, 12(23). https://doi.org/10.3390/ma12234013

Motalebi, A., Khondoker, M. A. H., & Kabir, G. (2024). A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing. In Sustainable Operations and Computers (Vol. 5, pp. 41–50). KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.08.003

Nunes, G. M., Anjos, M. A. S., Lins, A. B. S. M., Negreiros, A. M. S., & Pessoa, L. R. (2023). Evaluation of the mechanical behaviour of representative volumetric elements of 3DCP masonry mixtures with partial replacement of cement by limestone filler and metakaolin. Journal of Building Engineering, 78. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107650

Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2022). Enhancing the properties of foam concrete 3D printing using porous aggregates. Cement and Concrete Composites, 133, 104687. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104687

Pessoa, S., Guimarães, A. S., Lucas, S. S., & Simões, N. (2021). 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141(September 2020). https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794

Rangel, C. M., Guimaraes, A. S., Salet, T. A. M., & Lucas, S. S. (2023). 3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings. https://doi.org/10.2139/ssrn.4570577

Sambucci, M., & Valente, M. (2021). Influence of waste tire rubber particles size on the microstructural, mechanical, and acoustic insulation properties of 3d-printable cement mortars. Civil Engineering Journal (Iran), 7(6), 937–952. https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091701

Sambucci, M., Marini, D., Sibai, A., & Valente, M. (2020). Preliminary mechanical analysis of rubber-cement composites suitable for additive process construction. Journal of Composites Science, 4(3). https://doi.org/10.3390/jcs4030120

Tabassum, T., & Ahmad Mir, A. (2023). A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction. Materials Today: Proceedings, 93, 408–414. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.013

Tay, Y. W. D., Tan, M. J., & Wong, T. N. (2023). Tailoring Light-Weight Aggregates for Concrete 3D Printing Applications. Materials, 16(7), 2822. https://doi.org/10.3390/ma16072822

Volpe, S., Petrella, A., Sangiorgio, V., Notarnicola, M., & Fiorito, F. (2021a). Preparation and characterization of novel environmentally sustainable mortars based on magnesium potassium phosphate cement for additive manufacturing. AIMS MATERIALS SCIENCE, 8(4), 640–658. https://doi.org/10.3934/matersci.2021039

Volpe, S., Sangiorgio, V., Petrella, A., Coppola, A., Notarnicola, M., & Fiorito, F. (2021b). Building envelope prefabricated with 3d printing technology. Sustainability (Switzerland), 13(16). https://doi.org/10.3390/su13168923

Wolfs, R. J. M., & Suiker, A. S. J. (2019). Structural failure during extrusion-based 3D printing processes. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(1–4), 565–584. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03844-6

Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. Construction and Building Materials, 181, 447–454. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060

Zhang, Y., Zhao, Q., Liu, C., & Zhou, M. (2016). Properties comparison of mortars with welan gum or cellulose ether. Construction and Building Materials, 102, 648–653. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.116

Zhou, H., Brooks, A. L., Hanna, D., & Salarieh, B. (2018). Earth and Space 2018 600 Thermal and Mechanical Properties of Cementitious Composites for Additive Construction of Energy-Saving Habitats. Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments, 600–611. https://doi.org/10.1061/9780784481899

Zhu, B., Wang, Y., Sun, J., Wei, Y., Ye, H., Zhao, H., & Wang, X. (2023). An experimental study on the influence of waste rubber particles on the compressive, flexural and impact properties of 3D printable sustainable cementitious composites. Case Studies in Construction Materials, 19. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02607

Zou, M., Liu, C., Zhang, K., Li, W., Cao, Q., Zhang, L., Gu, T., Zhang, G., & Liu, L. (2023). Evaluation and control of printability and rheological properties of 3D-printed rubberized concrete. Journal of Building Engineering, 80. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107988

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CONCRETOS PERMEÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CAULIM

Diego Bezerra[a]; Leane Sales[a]; Fabíola Rocha[a]; Aline Nóbrega[b]; Raphaele Malheiro[c]

[a]Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, Centro de Tecnologia, Castelo Branco III, João Pessoa, Paraíba, Brasil, diegop.bezerra@hotmail.com, leanepriscillab@gmail.com, fabiolamaiar@outlook.com

[b]Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, Centro de Tecnologia, Universitários, Campina Grande, Paraíba, Brasil, alinefnobrega@hotmail.com

[c]Universidade do Minho, CTAC, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

RESUMO

O crescimento urbano resultou no aumento de áreas impermeáveis, levando a problemas como inundações e alagamentos. Para lidar com isso, surgiram as "Cidades Sensíveis à Água", que buscam práticas sustentáveis para minimizar o impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico. Uma prática importante é o uso de concreto permeável, que permite a absorção da água. Estudos estão sendo realizados para incorporar resíduos industriais, como o resíduo de caulim (RC), no concreto permeável, visando melhorar seu desempenho. A pesquisa analisou a influência do RC nas propriedades do concreto permeável, com substituições de 10, 20, 30 e 40% do agregado convencional. A mistura com 30% de RC (RC30) alcançou os melhores resultados de resistência à compressão (9,44 MPa) e permeabilidade ($1{,}03 \times 10^5$ mm/h no estado seco), representando um aumento de 55% na permeabilidade sem comprometer o desempenho mecânico. Esses resultados atendem aos requisitos para uso em pavimentos de tráfego leve. Esses avanços contribuem para o desenvolvimento de soluções sustentáveis nas cidades modernas.

Palavras-chave: Concreto permeável, Permeabilidade, Resíduo industrial.

1 INTRODUÇÃO

Com intuito de diminuir os problemas causados no ciclo da água, derivados da acelerada urbanização, países como China, Estados Unidos e França destacam-se no estudo de mecanismos que amenizem os efeitos causados pela impermeabilização dos solos (Benevenuto, 2018). Nesse contexto, se origina a expressão "*Water Sensitive Cities*", que segundo Januszkiewicz e Golebieski (2019) relaciona ambientes construídos com desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, novas tecnologias estão sendo implementadas, a exemplo de poços de infiltração, trincheiras de infiltração, bacias de detenção e pavimentos permeáveis, com uso do concreto permeável. Este concreto permite a maior taxa de infiltração da água pluvial para o solo, menor taxa de escoamento, diminuição da necessidade de tanques de detenção podendo ser aplicado em calçadas, estacionamentos e vias de tráfegos leves. A temática tem sido estudada por Candian Filho *et al.* (2022), Xu Cai *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2020).

Segundo Lamb (2014), o concreto permeável é um material com ausência ou pouca quantidade de agregado miúdo, isso forma uma estrutura porosa, com grandes poros conectados entre si, que permite o fluxo de fluidos no seu interior. Essa propriedade drenante associada aos aspectos mecânicos dos concretos permeáveis já são alvos de estudo nas pesquisas de Yi Zhang *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2019).

Ademais, são diversas as pesquisas que estudam a introdução de novos materiais como componentes dos concretos permeáveis a exemplo de Santos (2017) e Tavares e Kazmierczak (2016), que utilizaram agregados recliclados em substituição do agregado graúdo comum em misturas de concreto permeável, e Ribeiro (2014), que utilizou agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana em substituição do agregado natural nas misturas. Nesse direcionamento, trabalhos como os de Faria *et al*. (2019), Oliveira (2017), utilizaram resíduo da construção e trabalho como Aquino *et al*. (2019) e Bezerra (2023) utilizaram resíduo de caulim (RC).

A introdução de resíduos industriais nas misturas dos concretos permeáveis além de contribuir para sua reutilização, promovendo a economia circular, pode potencializar as propriedades drenantes dos concretos permeáveis, a depender das suas características físicas. Nesse contexto, o resíduo de caulim pode ser visto como alternativa viável a essa aplicação, pois segundo Patrício (2016) o RC apresenta potencial de adsorção, isso pode auxiliar na propriedade de permeabilidade em concretos permeáveis.

As principais reservas de caulim no Brasil encontram-se nos estados do Pará e Amazonas, juntas, no ano de 2017, representavam 98,4% da reserva total brasileira (Medeiros, 2022). Desse contexto, pode ainda ser levantada a falta de política ambiental no gerenciamento do RC que é depositado em contato direto com o solo, próximo de mananciais de água e de residências, fato negativo no aspecto social e ambiental que torna a reciclagem do RC sustentavelmente necessária (Azerêdo, 2012).

Diante disso, esta pesquisa propõe investigar as propriedades mecânicas e físicas de concretos permeáveis contendo a fração grossa do RC em substituição parcial do agregado graúdo de forma a contribuir com o desenvolvimento científico do tema e promover a economia circular.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental consistiu de duas etapas: Caracterização física dos materiais e Ensaios nas misturas, no estado fresco e endurecido. A Figura 1 apresenta o Fluxograma com essas etapas e a seguir estão descritas cada uma delas.

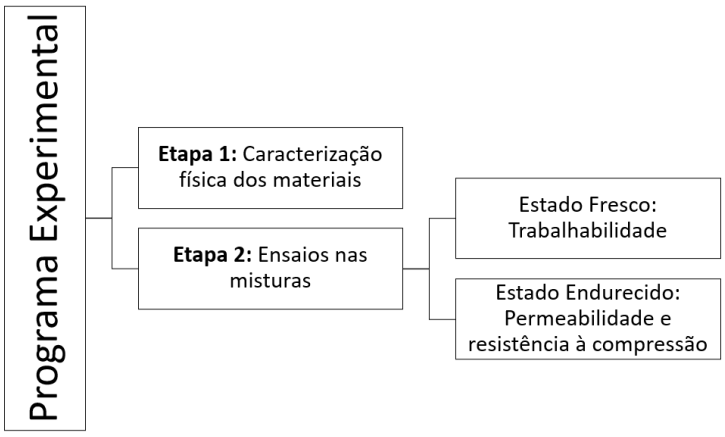


Figura 1 – Fluxograma do programa experimental

2.1. Caracterização física dos materiais

Na análise física foram verificadas as massas específicas, massas unitárias e granulometria dos agregados graúdos (brita 0 e brita 1) e do resíduo de caulim, além da massa específica do CP V ARI. Antes dos procedimentos normativos foi realizado o beneficiamento do RC através da seleção e peneiramento (material passante na peneira 19) do material, pois o mesmo continha matéria orgânica e materia de granulometria maior que 19 mm (Figura 2).

Figura 2 – Beneficiamento do RC.

A partir do procedimento da NBR 16916 (ABNT, 2021) foram obtidos os valores da massa específica para o RC, brita 0 e brita 1. Já as massas unitárias foram obtidas pelo procedimento da NBR 16972 (ABNT, 2021) e os resultados estão expostos no Quadro 1, assim como o da massa específica do CP V ARI, tendo sido esta fornecida pelo fabricante.

Quadro 1 - Resultado do ensaio de massa específica dos agregados, RC e cimento e da massa unitária dos agregados e RC.

Ensaios/Materiais	Resíduo de Caulim	Brita 0	Brita 1	CPV ARI
Massa específica	3,35 g/cm³	2,60 g/cm³	2,63 g/cm³	3,00 g/cm³
Massa unitária	1,38 g/ cm³	1,33 g/ cm³	1,22 g/ cm³	-

O resultado da massa específica para a amostra do RC foi compatível com os resultados encontrados por Aquino *et al*. (2019). Já para a brita 1 e brita 0 os valores encontram-se no intervalo do que é comumente utilizado (Tavares e Kazmierczak, 2016; Pereira e Barbosa, 2015). No que se refere à massa unitária concluiu-se que os valores encontrados para os agregados e o RC foram semelhantes aos encontrados por Batezini *et al*. (2021) e Aquino *et al*. (2019).

Ao comparar os resultados entre si existe uma aproximação entre a massa unitária do RC (1,38 g/cm³) e da brita 0 (1,33 g/cm³), que pode ser justificada pela semelhança de forma e granulometria entre os materiais. Além disso, é possível concluir que o RC possui maior massa por unidade de volume que a brita 1 e 0.

O ensaio de granulometria seguiu a metodologia da norma NBR 7211 (ABNT, 2022). A Figura 3 apresenta as frações retidas para o RC. Ademais, o mesmo procedimento foi realizado para os agregados graúdos convencionais (brita 0 e brita 1).

Figura 3 - Frações de resíduo de caulim retidas nas malhas das peneiras.

Após peneiramento no equiamento da marca ProoUTest foi possível montar as curvas granulométricas de cada material que estão apresentadas na Figura 4.

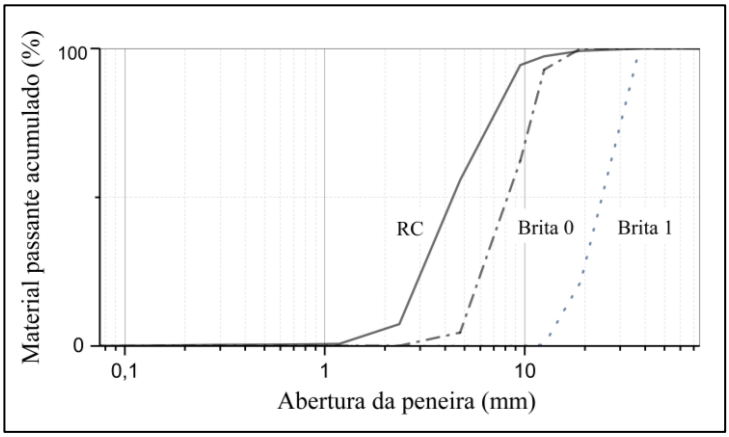


Figura 4 - Curvas granulométricas do resíduo de caulim, brita 0 e brita 1.

De acordo com as curvas apresentadas na Figura 4 é possível observar que o diâmetro máximo da brita 1 foi de 19 mm, enquanto para a brita 0 foi de 9,5 mm, mesmo valor do diâmetro máximo para o RC. Assim como para as massas específicas e unitárias, a granulometria obtida para as britas vai ao encontro dos valores comumente utilizados (Candian Filho *et al*. 2021). No que se refere à

granulometria do RC, continua a seguir a tendência dos valores apresentados no trabalho de Aquino *et al*. (2019).

Além disso, percebe-se uma aproximação entre os resultados da brita 0 e do RC. Dessa forma, as características granulométricas do RC são equivalentes às características granulométricas da brita 0, tornando justificável a substituição pelo resíduo em relação a parcela de agregado graúdo correspondente a brita 0.

2.2. Misturas e ensaios

O Quadro 1 apresenta as proporções em massa dos materiais utilizados nas misturas estudadas.

Quadro 1 – Proporções em massa dos materiais utilizados nas misturas.

Mistura	CP V ARI	RC	Brita 0	Brita 1	Água
RefB0B1	1000 g	-	2000 g	2000 g	300 g
RC10	1000 g	200 g	1800 g	2000 g	300 g
RC20	1000 g	400 g	1600 g	2000 g	300 g
RC30	1000 g	600 g	1400 g	2000 g	300 g
RC40	1000 g	800 g	1200 g	2000 g	300 g

No estado fresco optou-se por realizar o ensaio de trabalhabilidade pelo método do abatimento do cone de Abrams e pelo método de VeBe - DNIT 064 (ABNT, 2004) - esse é aplicado em concretos utilizados em pavimentos, com aparência seca e segregada. O ensaio consiste em medir o tempo do adensamento de uma amostra obtida por meio do abatimento do tronco de cone.

Para a realização dos ensaios no estado endurecido foram moldados corpos de prova (CP) conforme a NBR 5738 (2021) em moldes cilíndricos do tipo 10x20cm, para realização do ensaio de resistência à compressão e em moldes prismáticos de 10x10x40cm, para realização do ensaio de permeabilidade. Após 24 horas da moldagem os CP foram desmoldados e em seguida submetidos à cura úmida (colocados em tanques com água, com cal, a temperatura ambiente de 25°C) até a idade de 28 dias.

Em seguida foi realizado o tratamento dos CP, fazendo uma regularização em suas faces transversais para o ensaio de compressão (NBR 5739, ABNT 2018). Cada face passou por um processo de capeamento feito com pasta de cimento.

Já o ensaio de coeficiente de permeabilidade, realizado nos CP prismáticos, foi feito em amostras no seu estado seco ao vento e no estado saturado por 24 horas. O intuito de realizar o estudo na amostra saturada foi compreender o funcionamento do concreto permeável depois de grandes incidências pluviométricas. A análise da permeabilidade foi conduzida pela NBR 16416 (2015), por meio do cálculo do coeficiente de permeabilidade com carga constante, ou seja, sem mudança na altura da coluna d'água.

O coeficiente de permeabilidade foi calculado conforme a Equação 1, onde C é uma constante, m é a massa do fluido infiltrante (kg), d é o diâmetro interno do cilindro (mm) e t é o tempo de percolação (s) (Faria *et al*. 2018). Essa equação calcula a velocidade que a água passa nos vazios do concreto permeável.

$$K = \frac{C.m}{d^2.t} \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ENSAIO NO ESTADO FRESCO

A Figura 5 apresenta o gráfico com os resultados obtidos dos ensaios de trabalhabilidade das misturas referência (sem RC) e com RC.

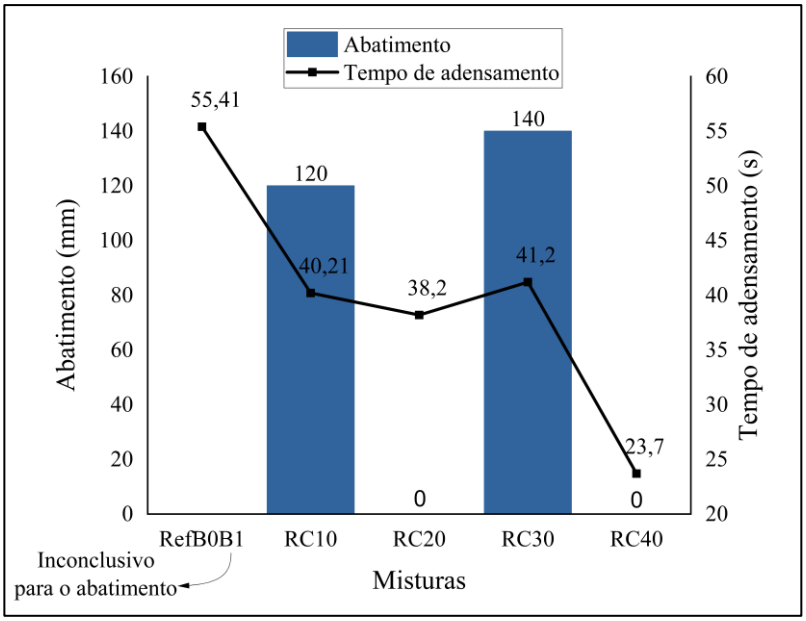


Figura 5 - Resultados do ensaio de trabalhabilidade realizado nas misturas de concreto permeável

A análise foi realizada através de dois métodos: no eixo Y à esquerda estão os resultados pelo método do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67 (ABNT, 1998)), apresentados por meio de barras, e no eixo Y à direita encontram-se os resultados do método de VeBe (DNIT 064 (ABNT, 2004)), exibidos em pontos. Já no eixo X estão apresentadas as misturas analisadas.

Na Figura 5 pode ser observado que o ensaio do abatimento foi inconclusivo para a amostra referência, pois ao realizar o procedimento experimental ocorria um desmoronamento do tronco de cone. Isso ocorreu por não existir boa coesão entre os componentes presentes na mistura, essa falta de coesão derivou da ausência de agregado miúdo nas amostras de concreto permeável, ocasionando a falta de entrosamento entre os grãos (Chandrappa *et al*. 2016).

Percebe-se que quando ocorreu a substituição do agregado graúdo (brita 0) pelo RC houve a formação do tronco de cone e assim obtenção dos resultados para o método do abatimento, dessa forma o RC levou a uma maior coesão nas misturas, como também verificado na pesquisa de Aquino *et al.* (2019). Isso pode ser justificado pelo formato dos grãos de RC que ao substituir o agregado natural proporcionou uma mistura com componentes que possuíam maior entrosamento entre a pasta de cimento hidratada, agregados graúdos e RC.

Entretanto, não existiu uma linearidade entre os resultados, pois o RC possuía formato dos grãos variando desde de formas angulares até grãos mais arredondados, que se mostraram com proporções diferentes para cada mistura. Desse contexto, acredita-se que a mistura que obteve melhor trabalhabilidade possuía maior presença de grãos arredondados, diferente das misturas que tinham menores trabalhabilidade, com maior parcela de grãos angulares de RC.

Para as misturas com 20 e 40% de RC (RC20 e RC40) o tronco de cone se formou e se manteve estável com abatimento de 0 mm, decorrente da baixa trabalhabilidade, esses resultados estão em

consonância com os obtidos por Bauer *et al.* (2020), Sandoval *et al*. (2019) e pelas normas NBR 16416 (ABNT, 2015) e ACI 522R (2010), esses afirmaram que o abatimento do tronco de cone para concretos permeáveis deve estar entre 0 e 20 mm.

Para a amostra RC10 o abatimento foi 120 mm e para RC30 foi de 140 mm, esses resultados se mostraram fora dos limites estabelecidos pela NBR 16416 (ABNT, 2016) e pela ACI 522R (2010). Desses resultados constata-se que a amostra RC30 apresentou maior abatimento e consequentemente melhor trabalhabilidade.

3.1. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.1.1. PERMEABILIDADE

Os resultados do coeficiente de permeabilidade para cada mistura estão apresentados na Figura 6.

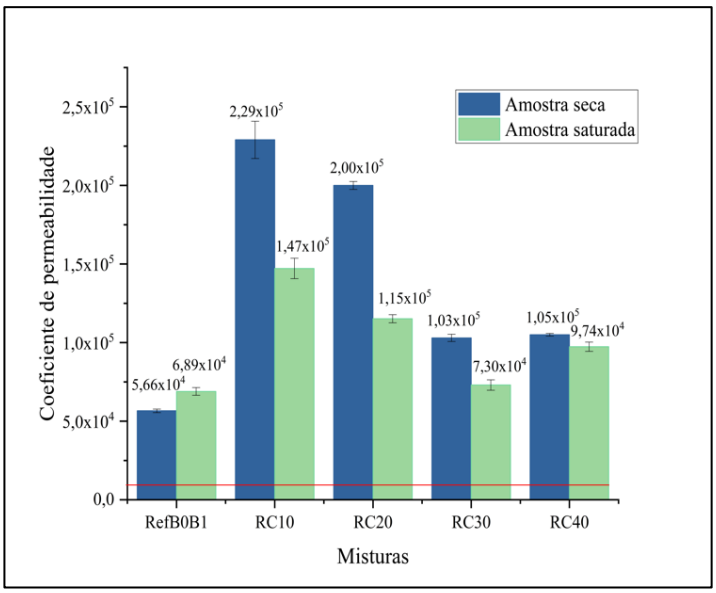


Figura 6 - Resultados do ensaio coeficiente de permeabilidade realizado nas misturas de concreto permeável no estado seco e saturado.

O gráfico da Figura 6 apresenta no eixo Y os valores em ordem crescente do coeficiente de permeabilidade para as amostras ensaiadas no estado seco e saturado. No eixo X estão apresentadas as misturas analisadas (RefB0B1, RC10, RC20, RC30 e RC40). Além disso, as barras em azul apresentam os resultados da análise na amostra seca, já as barras em verde fazem referência aos resultados da análise nas amostras saturadas.

Na Figura 6 percebe-se que todas as misturas apresentaram coeficiente de permeabilidade médio acima de $2{,}5x10^3$ mm/h, menor valor estabelecido pelas normas ACI 522R (2010) e NBR 16416 (ABNT, 2015).

É perceptível que, para as misturas com RC, as amostras secas ao vento tiveram uma média do coeficiente de permeabilidade superior ao das amostras saturadas. Isso pode ser justificado pela presença de água nos vazios das amostras saturadas, que de certa forma impediu o escoamento e ocasionou um menor coeficiente de permeabilidade (Schwetz *et al.* 2015). Entretanto, esse evento não ocorreu para a amostra RefB0B1 que provavelmente não tinham entre seus vazios água aprisionada.

Além disso, é notório que dentre as misturas a que apresentou menor variação do coeficiente de permeabilidade do estado seco para o estado saturado foi a RC30 (29,13%). Desse contexto, pode ser afirmado que a amostra com 30% de RC não teve uma mudança significativa da sua funcionalidade drenante quando passa do estado seco para o saturado. Isso é um efeito benéfico na aplicação em campo, visto que não ocorreria uma mudança que ocasionasse alteração significativa no desempenho drenante do RC30, mesmo após ocorrência de chuvas intensas e seguidas.

Da Figura 6 percebe-se também que com a substituição do agregado graúdo (brita 0) pelo RC, houve um incremento do coeficiente de permeabilidade, ou seja, o resíduo de caulim contribuiu para maior permeabilidade das placas em teste. Esse fato foi apresentado na pesquisa de Aquino *et al.* (2019) e pode ser justificado por Patrício (2019), que comprovou em sua pesquisa que o resíduo de caulim possui potencial de adsorção.

3.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O gráfico da Figura 7 apresenta os resultados da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.

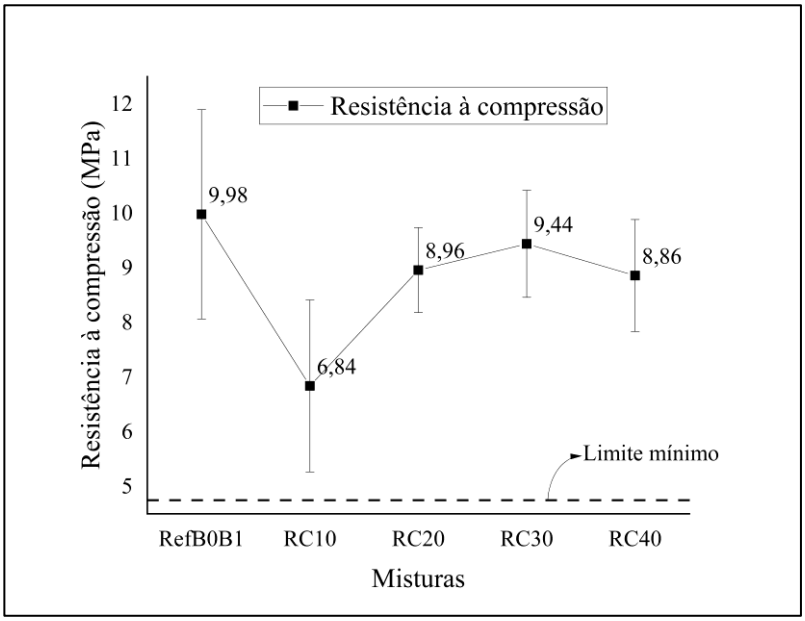


Figura 7 - Resultados da resistência à compressão uniaxial para diferentes misturas.

Pela Figura 7 percebe-se que a maior resistência à compressão uniaxial ocorreu na amostra RefB0B1, sem RC (9,98 MPa). Para as amostras RC10, RC20, RC30 e RC40 esses valores foram respectivamente iguais a 6,84 MPa; 8,96 MPa; 9,44 MPa e 8,86 MPa. O aumento da resistência para as misturas com maiores porcentagens de RC pode ser devido ao maior empacotamento das partículas, com as misturas que possuem proporções de agregados graúdos naturais e RC. Dessas respostas, pode-se afirmar que todos os resultados ficaram acima do mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2016), que foi de 2,5 MPa. Além disso, as resistências encontradas foram superiores as estabelecidas pela ACI 522R-10 (2010), de 2,8 MPa.

Desses resultados compreende-se que ao ser realizada a substituição parcial do agregado graúdo pelo RC houve um decréscimo de resistência, esse comportamento foi não-linear e é justificado pela configuração dos vazios que pode ter ocorrido diferentemente para cada mistura (Faria *et al*. 2019). Outra justificativa para o decréscimo da resistência pode estar relacionada com o formato dos grãos

de RC que para a mistura RC 10 pode ter apresentado maior parcela em forma lamelar, isso ocasiona a formação de uma zona de transição mais frágil e provoca o decréscimo da resistência mecânica. Diferente do que ocorreu para as misturas RC20, RC30 e RC40.

Além disso, Sandoval *et al*. (2019) e Tavares e Kazmierzak (2016) realizaram, respectivamente, estudos em amostras contendo resíduos da escória de alto forno, com granulometrias que variavam de 6 até 70mm, e agregado reciclado na proporção de até 100%, onde as amostras apresentaram também um decréscimo, respectivamente iguais a 40 e 50%, na resistência à compressão quando comparada à mistura sem resíduos, enquanto nesta pesquisa os decréscimos ficaram entre 5,4 e 32%.

Entretanto, percebe-se que a resistência à compressão da mistura RC30 teve um valor mais próximo ao referência decréscimo sem elevada discrepância, ao ser comparada com a mistura referência.

O gráfico da Figura 8 apresentada a relação entre o coeficiente de permeabilidade e a resistência à compressão uniaxial para cada mistura.

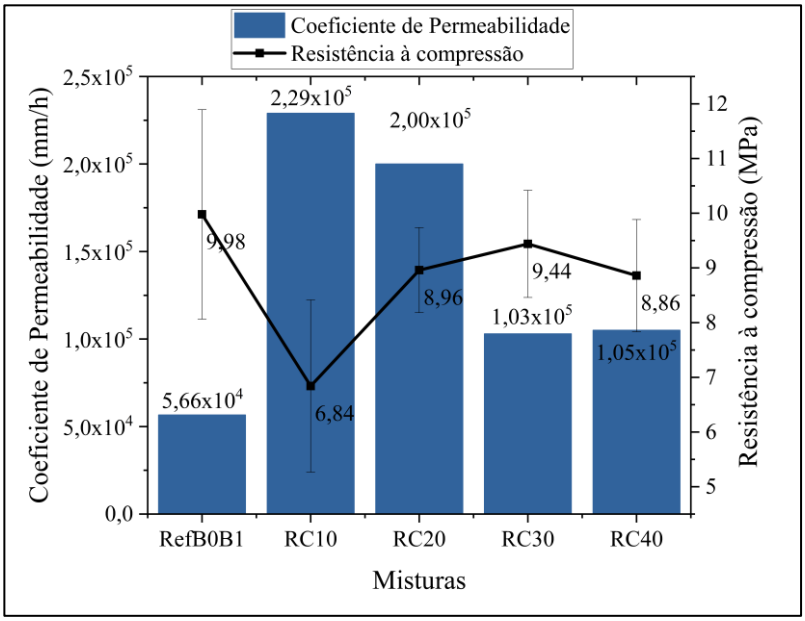


Figura 8 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade no estado seco e resistência à compressão nas misturas de concretos permeáveis.

Pelo gráfico da Figura 8 o eixo Y à esquerda apresenta em ordem crescente os valores médios dos coeficientes de permeabilidade. Enquanto o eixo Y à direita apresentada os valores médios da resistência à compressão uniaxial, com seus respectivos desvios padrão e no eixo X estão apresentadas as misturas analisadas.

Da leitura da Figura 8 pode ser entendido que quanto menor o coeficiente de permeabilidade maior foi a resistência à compressão uniaxial do concreto permeável. A maior resistência à compressão uniaxial correspondeu a mistura referência, essa obteve o menor coeficiente de permeabilidade (RefB0B1).

Já a amostra RC10 foi a que obteve maior coeficiente de permeabilidade, no entanto sua resistência média atingiu o menor valor, que foi de 6,84 MPa, mesmo assim essa resistência foi maior que o mínimo exigido pela ACI 522R (2010). Nas pesquisas de Aquino *et al.* (2019) e Batezini *et al.* (2021) as menores resistências à compressão uniaxial também foram referentes as amostras que obtiveram maiores coeficientes de permeabilidade.

4 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado, é possível concluir que a introdução do RC nas misturas contribuiu para uma melhor trabalhabilidade do concreto permeável, sendo a mistura RC40 a que obteve maior valor de trabalhabilidade.

Quanto à permeabilidade, todas as misturas obtiveram coeficientes maiores que a mistura referência, tanto para o estado saturado quanto para o estado seco, sendo a mistura RC10 a que obteve maiores coeficientes de permeabilidade com valor igual a 2,29 x 10^5 mm/h para o estado saturado e 1,47 x 10^5 para o estado seco. Esses valores são maiores que os exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Ainda sobre a permeabilidade, pôde-se concluir que os melhores desempenhos drenantes se procederam nas misturas RC10 e RC30, sendo a mistura RC30 a que apresentou menor variação entre os coeficientes encontrados em seu estado seco e saturado.

Em relação à resistência à compressão uniaxial todas as misturas obtiveram resultados maiores que o mínimo esperado pela NBR 16416 (ABNT, 2015), sendo a mistura RC30 a que teve maior resultado dentre as misturas com RC, atingindo o valor de 9,44 MPa.

Dessa forma, para as situações estudadas, o RC apresenta características viáveis para ser utilizado em misturas de concretos permeáveis. Além disso, a mistura RC30 apresentou acréscimo do coeficiente de permeabilidade e menor variação de resultados no desempenho mecânico do ensaio de resistência à compressão uniaxial. Assim, o uso dessa porcentagem é o mias indicado, garantindo também maior volume de RC reciclado.

REFERÊNCIAS

Associação brasileira de norma técnicas. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021

___NBR 7211: Agregados para concretos - requisitos. Rio de Janeiro: 2022

___ NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021

___ NBR NM 67: Concreto - Determinação da trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro: ABNT, 1998

___ NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018

___ NBR 5738: Concreto - Procedimento de moldagem e curo de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2021

___ NBR 16416: Pavimentos Permeáveis de Concretos - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: Abnt, 2015

Aquino, Samuel Medeiros de *et al*. (2019). Estudo do uso do resíduo de caulim nas propriedades de concreto permeável (POROSO). In: simpósio de Pesquisa Inovação e Pós-Graduação do IFPB, 3., João Pessoa, 2019. p. 1-11

Azerêdo, Aline Figueirêdo Nóbrega de (2012). Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais. 2012. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife

Bauer, A. L. *et al*. Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended (2020). Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 464-482. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000300002

Batezini, Rafael *et al*. (2021). Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement (2021). Ambiente Construído: Ambiente construído, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 177-194

Benevenuto, Andrey. Concreto permeável: UFF pesquisa soluções para uma urbanização sustentável. 2018. Disponível em: https://www.uff.br/?q=noticias/15-08-2018/concreto-permeavel-uff-pesquisa-solucoes-para-uma-urbanizacao-sustentavel

Bezerra, Diego de Paiva *et al*. Propriedades de concretos permeáveis contendo resíduo de caulim. 2023. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa

Candian Filho, Edison Luis *et al*. (2021). Concreto permeável com areia descartada de fundição: propriedades mecânicas e hidráulicas. Revista Matéria, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 1-14, doi.org/10.1590/S1517 707620220001.1354

Chandrappa A.K., Biligiri K.P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state of the art review, Constr. Build. Mater. 262–274, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054

Costa, F. B. P. *et al*. (2019) Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [*s. l*], v. 11, n. 5, p. 1-9

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. DNIT 064: Pavimento rígido - Determinação da trabalhabilidade do concreto pelo consistômetro VeBe - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004

Faria, Andréia da Conceição de (2019). Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo da resistência. In: 33° CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., Balneário Camboriú. v. 33, p. 1-12

Internacional Concrete Abstracts Portal. 522R - 10: Report on pervious. ACI, 2010. 38 p

Januszkiewicz, K. & Golebieski J. (2019). "Water Sensitive City" Within City as A Strategy for Activate Polluted Urban Areas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 10, 471

Lamb, Gisele Santoro (2014). Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Medeiros, Ailma Roberia Souto de (2022). Alternativas para otimização doprocesso de beneficiamento de caulim da região seridó dos estados da paraíba e do rio grande do norte. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de E Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande

Oliveira, Daniela Dolovitsch de (2017). Análise do desempenho mecânico em concretos permeáveis com substituição parcial do agregado graúdo por resíduo da construção civil. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijui, Ijuí

Patrício, Aline Cadigena Lima (2016). Potencial de adsorção do resíduo do beneficiamento do caulim. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande

Pereira, Katrine Krislei; Barbosa, Monica Pinto (2015). desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de campinas. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Campinas, p. 1-6

Pils, S. E. *et al*. (2019). Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 101-121, FapUNIFESP (SciELO), http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000100009

Ribeiro, Aline (2014). Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul

Sandoval, G. F. B. *et al*. (2019). Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [*s. l*], v. 12, n. 3, p. 1-9

Santos, Rafael Reinheimer dos (2017). Estudo da resistência mecânica do concreto permeável com substituição de agregado natural por agregado reciclado. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa

Schwetz *et al*. (2015). Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve. In: Congresso Latino Americano Da Patologia da Construção, 13., Lisboa

Tavares, L. M. e Kazmierczak, C. S. (2016). Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis, Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 9, n.1, p. 75-89

Xu Cai *et al*. (2021). Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. Road Materials and Pavement Design, v. 22, n. 10, p. 2181-2196, doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193

Yi Zhang *et al*. (2021). Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. Construction and Building Materials, v. 266, p. 121074, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121074

Zhao, Jinhui *et al.* (2020). Novel Backwashing maintenance method for Permeable concrete pavement: Two-Year field study. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 146, n. 4, p. 04020003, Doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001456

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS À BASE DE CAL HIDRATADA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA

Vinicius Vieira[a]; Diego Bezerra[a]; Fabíola Rocha[a]; Aline Nóbrega[b]; Raphaele Malheiro[c]

[a] Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, Centro de Tecnologia, Castelo Branco III, João Pessoa, Paraíba, Brasil, eng.viniciussilvavv@gmail.com, diegop.bezerra@hotmail.com, fabiolamaiar@outlook.com

[b] Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, Centro de Tecnologia, Universitários, Campina Grande, Paraíba, Brasil, alinefnobrega@hotmail.com

[c] Universidade do Minho, CTAC, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, raphaelemalheiro@civil.uminho.pt

RESUMO

O estudo aborda os desafios enfrentados nas intervenções em edifícios históricos, especialmente no que diz respeito a aplicação de argamassas de restauro em alvenarias antigas, devido à necessidade de compatibilização química e física do material restaurador com o substrato antigo. Nesse cenário, a Sílica Ativa (SA) destaca-se como uma adição promissora para o restauro, devido às suas propriedades únicas quando adicionada a misturas à base de cal, como as reações pozolânicas com o Hidróxido de Cálcio ($Ca(OH)_2$) e seu efeito fíler. Desta forma, a fim de avaliar a influência da adição da SA nas misturas à base de cal, o estudo compreendeu três etapas: a obtenção e caracterização física dos materiais seguidas da produção e ensaios para avaliar as propriedades no estado fresco das misturas. Foram adicionados diferentes teores de SA (10%, 20% e 30% em relação à massa de cal), mantendo uma relação cal/agregado de 1:3 em massa. Os resultados foram comparados com valores normativos e literatura recente. Observou-se que as misturas com adição de SA requerem aumento na relação água/cal para alcançar a mesma trabalhabilidade da mistura de referência. No entanto, todas as misturas apresentaram espalhamento dentro do intervalo normatizado, evidenciando a viabilidade da adição de SA.

Palavras-chave: Sílica ativa, Cal hidratada, Revestimento argamassado.

1 INTRODUÇÃO

A importância do restauro está intrinsecamente ligada à necessidade de conservar as raízes históricas de uma comunidade e oferecer uma conexão tangível com o passado (Santos *et al.*, 2021). Entretanto, apesar da importância dessas edificações, o desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras que atendam às exigências específicas com capacidade de solucionar e/ou prevenir a incidência de danos nos edifícios históricos ainda são escassos e incipientes (Stolz; Wasem, 2020). Ademais, o processo de restauro de edificações históricas apresenta inúmeros desafios, principalmente no que diz respeito à escolha dos materiais utilizados (Bauer; Souza; Mota, 2021), devido a necessidade de compatibilização dos materiais utilizados ao realizar o restauro com o substrato existente em um revestimento histórico. Essa abordagem não apenas visa preservar a estética, mas também garantir a funcionalidade dos elementos arquitetônicos e/ou estruturais (Sales, 2022).

Em obras de restauro e conservação o uso de cimento Portland apresenta incompatibilidade com o revestimento antigo, tendo em vista suas diferentes características em relação ao original, como: alta rigidez, baixa porosidade e presença de sais (Seabra et al., 2009). A sua aplicação atinge não somente as propriedades da argamassa, como também o valor histórico e cultural de uma região (Obrzut; Medeiros; Luso, 2020). Desta forma, a cal emerge como um aglomerante promissor. Contudo, a utilização da cal apresenta desafios notáveis, sendo a hidraulicidade e resistência uma questão crítica a ser abordada em argamassa à base de cal (Mattos, 2018). A importância de escolher cuidadosamente o aglomerante, considerando suas propriedades, ressalta a complexidade dos projetos de restauro, uma vez que a escolha inadequada pode comprometer a durabilidade e a autenticidade das estruturas históricas (Bauer *et al.* 2020).

Nesse cenário, a sílica ativa (SA) emerge como uma adição de considerável potencial para a área de restauro. A integração da SA nas formulações de argamassas não apenas visa melhorar suas propriedades mecânicas e durabilidade, mas também oferece um caminho promissor para a redução do impacto ambiental associado à produção de materiais de construção (Magalhães, 2018). Portanto, ao utilizar a SA nas argamassas, não apenas se aproveita esses resíduos, evitando sua disposição inadequada e reduzindo a demanda por materiais naturais, mas também se contribui para a redução do impacto ambiental. Esse aspecto é crucial dada a crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade na indústria da construção, que tem direcionado a atenção para alternativas ecologicamente responsáveis, como a sílica ativa (Bertequini; Machi; Doná, 2019).

Oliveira *et al.* (2023) mencionam que, devido ao tamanho reduzido das partículas de SA, sua adição promove um aumento na quantidade de finos na mistura final, resultando em um maior teor de exsudação. Desta forma, a influência da adição de sílica tem dois efeitos na composição da mistura, atuando como um efeito físico (fíler), preenchendo os espaços vazios oriundos do processo de hidratação do cimento (Liberalino *et al.* 2020), e como efeito químico, devido a SA possuir alta reatividade com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)2), formando produtos de hidratação adicionais que contribuem para o desenvolvimento de propriedades aglomerantes (Magalhães, 2018).

Portanto, com base em estudos prévios, justifica-se o uso de argamassas à base de cal com SA. Essa escolha representa um notável avanço no campo do restauro de edificações históricas, desempenhando um papel crucial na preservação da herança cultural e arquitetônica. No entanto, é crucial destacar que as propriedades das argamassas no estado fresco, especialmente a trabalhabilidade, desempenham um papel fundamental na eficácia e sucesso das aplicações. As reações de hidratação nas misturas introduzem dinâmicas complexas nos mecanismos de endurecimento, e é essencial que essas reações não comprometam a trabalhabilidade da mistura durante a aplicação. Diante desse cenário desafiador, os resultados desta pesquisa oferecem

perspectivas valiosas para profissionais e pesquisadores envolvidos na área de conservação do patrimônio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo foi feito um programa experimental que teve como objetivo investigar a influência da adição de SA nas propriedades de uma argamassa de restauro. O programa experimental consistiu em três etapas: materiais utilizados, caracterização dos materiais e ensaios nas misturas de argamassas, no estado fresco. Os tópicos a seguir descrevem cada uma das etapas realizadas.

2.1 ETAPA 1: MATERIAIS UTILIZADOS

As argamassas foram produzidas com cal hidratada tipo CH-I e agregado miúdo convencional, obtidos em comércios locais da cidade de João Pessoa (Brasil), a água utilizada na mistura estava dentro dos parâmetros normativos. A SA adicionada nas dosagens é de fabricação da empresa Grupo Cementos de Chihuahua (GCC) denominada Microsilex, adquirida no Brasil através da empresa Comércio Importação e Exportação Ltda (CLANAP).

2.2 ETAPA 2: CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os procedimentos de caracterização física do agregado miúdo natural foram conduzidos de acordo com as seguintes normativas NBR NM 26 (ABNT, 2009), NBR NM 27 (ABNT, 2001) e NBR 7211 (ABNT, 2022). Já as informações para a cal hidratada e a sílica ativa comprada foram retiradas dos catálogos dos fabricantes.

2.3 ETAPA 3: PRODUÇÃO E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO DAS MISTURAS

A produção e estudo das misturas, foi realizada baseando-se no estudo Garijo et al. (2020) onde foram produzidas fixando-se a relação cal/agregado em 1:3 e relação água/aglomerante 0.9 ambas em volume. De forma análoga, no estudo de Magalhães (2018), foram caracterizadas formulações de argamassas à base de cal hidratada, elaboradas com adições pozolânicas, em especial a sílica ativa, com a relação cal/agregado/sílica ativa de 1:3:0,5. Ambos os trabalhos almejavam o cumprimento de requisitos fincionais e de compatibilidade para argamassas antigas. Desta forma, foi estabelecido como parâmetro de referência, a composição de cal e areia, com traço volumétrico de 1:3 com intuito de observar a influência da adição de sílica ativa nos resultados até uma proporção de 1:3:0,3 em volume, ou seja, até à adição de 30% de SA, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Identificação e traços das misturas a serem estudadas

Identificação	Amostra	cal: areia: adição em massa
Amostra de referência	REF	1:8,75:0
Adição de 10% de sílica ativa	SA10	1:8,75:0,11
Adição de 20% de sílica ativa	SA20	1:8,75:0.21
Adição de 30% de sílica ativa	SA30	1:8,75:0,31

As misturas foram preparadas de acordo com a normativa brasileira referente às argamassas, NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo de mistura e determinação do índice de consistência (ABNT, 2016). No entanto, é importante ressaltar que essa norma não apresenta uma metodologia específica para a confecção de argamassas à base de cal hidratada. Dentro desse contexto, os procedimentos de execução das composições a serem estudadas nesta pesquisa também foram embasados em trabalhos científicos recentes que abordam experiências com argamassas de cal e adições.

As misturas de argamassa para revestimentos com e sem adição de SA foram avaliadas no estado fresco. A apresentação detalhada da metodologia empregada para a análise no estado fresco das composições de argamassa será apresentada nos subtópicos a seguir.

2.3.1 Ensaios no estado fresco

Para argamassa no estado fresco foram realizados os ensaios de densidade de massa no estado fresco, por meio dos procedimentos estabelecidos na NBR 13278 (ABNT, 2005) e de índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016). A normativa brasileira que regula o método de determinação do índice de consistência da argamassa não fornece valores de referência para este parâmetro. Portanto, o estabelecimento do intervalo de confiança para a obtenção do teor ideal de água nas misturas baseou-se na literatura recente que tratam de argamassas de revestimento à base de cal (Magalhães, 2018; Garijo *et al.,* 2020), além de testes de tentativa e erro com o objetivo de ajustar a consistência.

Os resultados dos testes realizados para a definição da argamassa de referência estão apresentados no Quadro 2. Observou-se, assim, uma variação nos valores de espalhamento em função do percentual de adição nas composições analisadas. Para a definição do teor de água nas misturas foram realizados testes com a amostra de referência com a proporção 1:3 em volume de cal hidráulica e areia, em espalhamentos inferiores a 250 mm percebeu-se uma maior rigidez e menor trabalhabilidade da mistura, o que poderia dificultar sua aplicação em superfícies ou em espaços mais complexos, já em misturas com espalhamento superior a 260 mm ± 5 observou-se que as misturas efetuadas evidenciaram consistência fluida e com presença de segregação.

Além disso, a análise da amostra de referência abrangeu a uniformidade e espalhamento das bordas da mistura ensaiada, mas também a presença de segregação e de exsudação, por meio de inspeção visual.

Quadro 2 –Teste para definição da mistura de referência

A/C	Espalhamento (mm)	Segregação		Exsudação		Bordas	
		Sim	Não	Sim	Não	Uniforme	Heterogéneo
0,85	283	X		X			X
0,83	267		X		X		X
0,70	225	X			X		X
0,75	235	X			X	X	
0,78	240		X		X	X	
0,80	265		X		X	X	

A partir dos resultados dos testes de consistência e avaliação dos aspectos visuais das pastas, estabeleceu-se um espalhamento mínimo aceitável para o ensaio de 250 mm e o valor máximo de 265 mm. No caso de argamassas que apresentaram espalhamento fora desse intervalo, procedeu-se à elaboração de novas misturas, com ajuste no teor de água, assegurando a conformidade com os critérios estipulados. A amostra escolhida corresponde a uma relação A/C de 0,80 e um espalhamento de 265 mm em conformidade com o Quadro 2.

Para a análise da densidade de massa, foram realizados os procedimentos da NBR 13278 (ABNT, 2005). O teor de ar incorporado foi calculado a partir da densidade, quantidade de água e massa específica dos materiais. O tópico a seguir abordará sobre as análises realizadas nas amostras no estado fresco aos 14, 28 e 56 dias de cura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão abordados os resultados e discussões derivados das análises realizadas nas misturas de argamassas à base de cal hidratada com e sem adição de sílica. Esses resultados foram obtidos por meio dos ensaios detalhados no tópico 2 (Materiais e métodos).

3.1 ANALISE FÍSICA

Na análise física foram verificadas a massa específica, massa unitária e granulometria da areia por meio de peneiramento. A Dimensão Máxima Característica encontrada para a amostra ensaiada corresponde a 9,5 mm. Tendo em vista a ausência de normativas que especifiquem os requisitos exigíveis de agregados miúdos destinados à produção de argamassas, optou-se por realizar o beneficiamento da amostra, por meio de peneiramento, almejando-se tanto diminuir sua dimensão máxima característica, quanto a retirada de eventuais impurezas existentes na amostra. Uma vez que quanto maior a dimensão máxima característica do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que tem de ser coberta pela pasta de ligante, para uma dada relação água/ligante.

A massa específica foi calculada a partir da relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Já a massa unitária foi obtida pela relação entre a massa da unidade de volume da areia, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma temperatura determinada, e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar, a uma temperatura estabelecida (NBR 45, 2006). A sua determinação é de fundamental importância para a conversão do traço em massa para o traço em volume, comumente usados em obra, o que facilita as atividades em campo; esse parâmetro é, ainda, essencial para dosagem rigorosa em laboratório. Os resultados estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de massa específica e unitária do agregado miúdo

Ensaio	**Material**	
	Cal	**Areia**
Massa específica	2,34 g/cm³	2,60 g/cm³
Massa unitária	2,56 g/cm³	1,2 g/cm³

Já os parâmetros físicos da SA utilizou-se das informações contidas no catálogo do fabricante, apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades físicas da SA

Propriedades	ASTM C-618	Microsilex
Finura, passa na malha nº 325 (45µm)	ASTM C-430 ≥76,0	96
Densidade	ASTM C-604 Não se aplica	2,3%
Índice de atividade pozolânica até 7 dias	ASTM C-311 ≥75	105%

Em relação à finura, a norma estabelece que a porcentagem máxima permitida de material retido na peneira de 45µm é de 10,0%. No que diz respeito ao índice de atividade pozolânica até 7 dias, é exigido que seja igual ou superior a 105,0%. Diante desses critérios, os resultados obtidos na amostra estão em conformidade com as diretrizes estabelecidas, apresentando uma finura de 4,0% e um índice de atividade pozolânica de 105,0%, atendendo aos requisitos específicos estipulados

3.2 DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO

A Figura 1 apresenta os resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco.

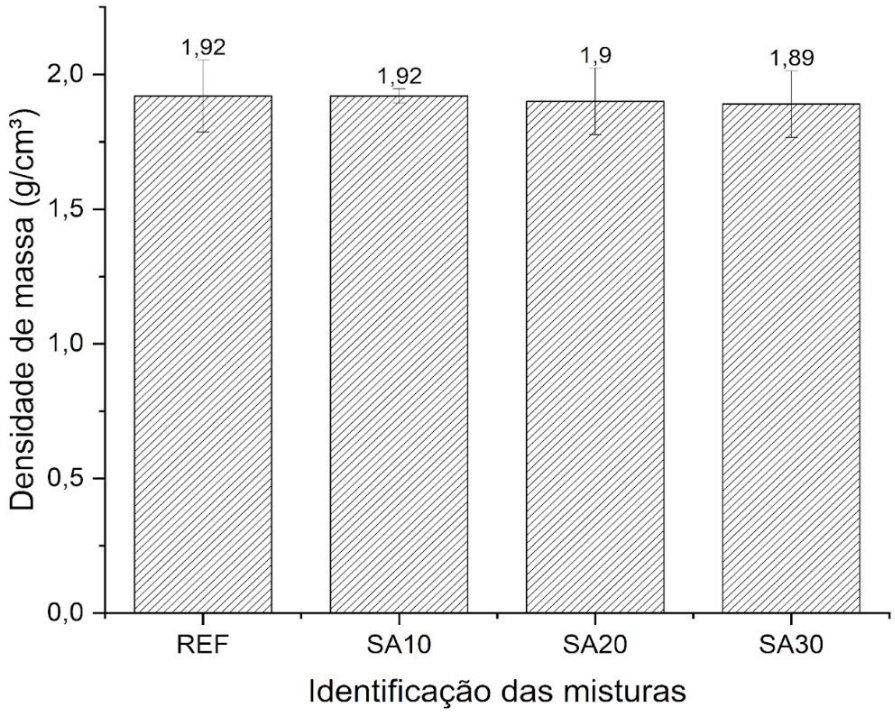


Figura 1 – Densidade de massa no estado fresco

O gráfico apresentado na Figura 1 possui em seu eixo Y os valores de densidade de massa em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal no estado fresco. No eixo X, estão apresentadas

as misturas estudadas, são elas: REF, SA10, SA20 e SA30. Comparando os resultados das amostras REF com as demais amostras com adições de sílica, percebe-se que a amostra REF apresentou o valor mais alto de densidade de massa, registrando 1,92 g/cm³. Por outro lado, as amostras com adições de SA20 e SA30 demonstraram valores ligeiramente mais baixos, com declínios de densidade correspondente a 1,04% e 1,56%, respectivamente. Para a mistura com 10% de sílica (SA10) não houveram mudanças no valor de densidade de massa.

Esses resultados sugerem que a adição de sílica ativa (SA) não influenciou significativamente a densidade de massa das misturas em comparação com a amostra de referência (REF). De acordo com Souza (2013), esse comportamento de argamassas com adições pozolânicas contribui para o aumento na densidade de massa no estado fresco. Tendo em vista que a adição de SA em uma quantidade maior poderia aumentar o teor de partículas finas e consequentemente a compactação do sistema e para o preenchimento dos espaços vazios.

3.3 TEOR DE AR INCORPORADO NO ESTADO FRESCO

No que diz respeito ao teor de ar incorporado, os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 2.

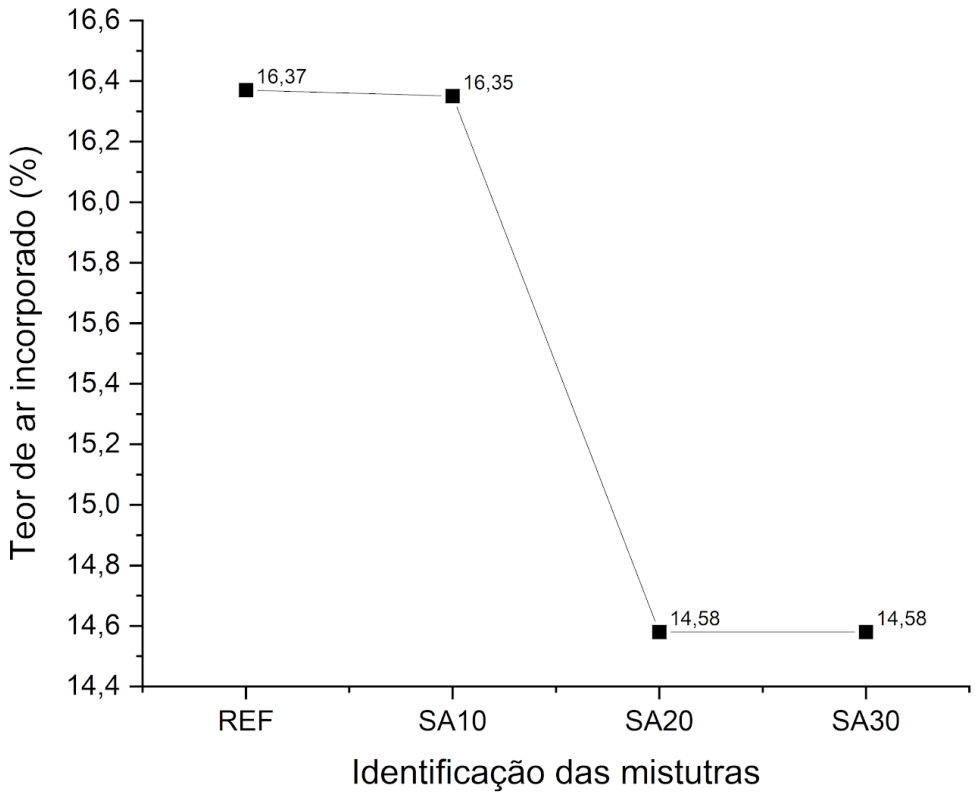


Figura 2 – Teor de ar incorporado no estado fresco

O gráfico da Figura 5 apresenta em seu eixo Y os valores de teor de ar incorporado em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal no estado fresco. No eixo X, estão apresentadas

as misturas estudadas (REF, SA10, SA20 e SA30). Acerca dos resultados, percebe-se que apenas para as misturas SA20 e SA30 houveram reduções nítidas do teor de ar incorporado, que correspondem a 10,93% e 11,67%, respectivamente. Os valores são condizentes com o ensaio de densidade de massa no estado fresco, uma vez quanto maior a densidade de massa no estado fresco menor é o teor de ar incorporado (Souza, 2013).

3.4 RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO NO ESTADO FRESCO

Na Figura 3 é apresentado o gráfico que relaciona a densidade de massa no estado fresco com o teor de ar incorporado para cada uma das misturas estudadas.

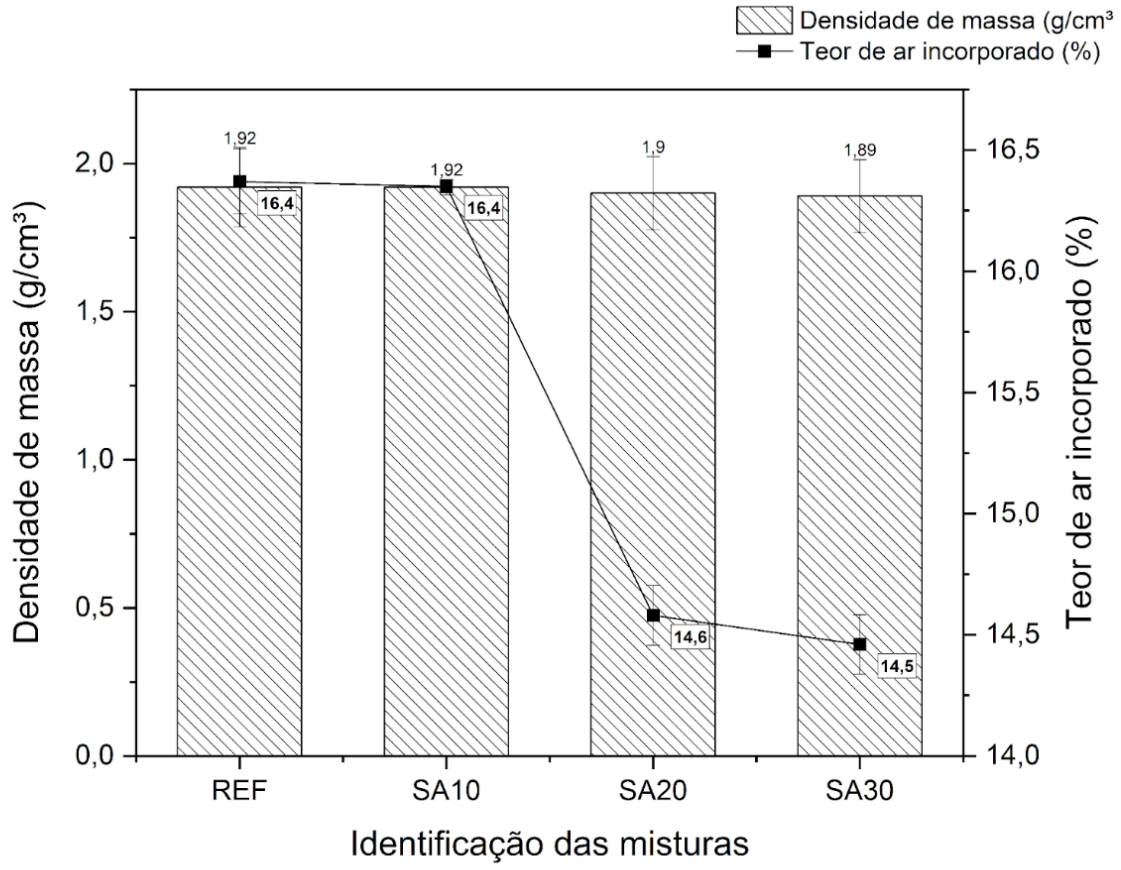


Figura 3 – Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado no estado fresco

Analisando o gráfico da Figura 6, onde no eixo X estão apresentadas as identificações das misturas, no eixo Y à esquerda apresenta em ordem crescente os valores de densidade de massa no estado fresco, enquanto o eixo Y à direita apresenta os valores do teor de ar incorporado para cada uma das misturas, as análises detalhadas desses dados foram previamente abordadas nos tópicos 3.2 e 3.3.

Comparando os resultados entre as amostras em estudo, observou-se que o teor de ar incorporado reduziu proporcionalmente as reduções de densidade de massa. No geral, as misturas SA20 e SA30 apresentaram um comportamento semelhante tanto para a análise de densidade quanto para o teor de ar incorporado. Já a amostra SA10 comportou-se semelhante à amostra REF, tendo um declínio de 0,12% acerca da densidade de massa e o mesmo teor de ar incorporado.

O teor de ar incorporado de uma argamassa plástica depende de uma série de fatores, a saber, tipo de misturador, tempo de mistura, fator a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar, dentre outros (Mansur; Mansur, 2006). Na situação em que nenhum agente é incorporado, os valores obtidos são geralmente muito baixos e praticamente independentes destes fatores.

Desta forma, a semelhança entre os resultados para todas as misturas estudadas pode ser justificada por vários fatores inter-relacionados. Primeiramente, a composição similar das misturas em termos de proporções de cal:areia:água e os baixos percentuais de adições de SA em relação a massa de cal, pode ter contribuído para características físicas e propriedades comparáveis. Além disso, o processo de mistura padronizado adotado para ambas as amostras garante a homogeneidade na distribuição dos materiais constituintes, incluindo a SA.

Nesse contexto, entende-se que o teor de ar incorporado é um parâmetro bastante influente na densidade de massa de argamassas à base de cal hidráulica. Além disso, o teor de ar é responsável por alterações na trabalhabilidade da mistura, pois quanto mais leve for a argamassa, maior a trabalhabilidade e o tempo em que se mantém trabalhável (Cintra; Paiva; Baldo, 2014). Isto possibilita reduzir o esforço durante a sua aplicação resultando em maior produtividade. Porém vale lembrar que o ar incorporado, que corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, prejudica a resistência mecânica final (Mansur; Mansur, 2006). As análises quanto aos resultados do ensaio de índice de consistência realizado almejando-se compreender a trabalhabilidade das misturas em estudo serão abordados no tópico a seguir.

3.5 TRABALHABILIDADE

No Quadro 5 estão apresentadas as diferentes composições de misturas que apresentam variações distintas nas relações entre água/aglomerante (A/A), A/S e da relação cal/sílica. Essas variações influenciam diretamente as propriedades reológicas e a consistência das misturas, refletindo-se nos resultados do ensaio de espalhamento, para o intervalo predefinido entre 250 e 265 mm.

Quadro 5 – Composição das misturas estudadas

Mistura	Água (g)	A/A	A/S	Cal/Sílica
REF	240,0	0,80	0,21	-
SA10	260,0	0,87	0,21	10,0
SA20	270,0	0,90	0,21	5,0
SA30	276,0	0,92	0,21	3,3

Do Quadro 5 observa-se que a adição de SA nas misturas interfere na quantidade de água necessária para obter-se um espalhamento dentro do intervalo fixado. A mistura REF, com uma relação A/A de 0,80, demonstra uma demanda de 240,0 g de água para atingir uma consistência pré-estabelecida. Em contraste, as misturas SA10, SA20 e SA30, que incorporam diferentes teores de sílica ativa, apresentam aumentos graduais nas relações A/A, exigindo quantidades proporcionais de água para manter a consistência desejada. Essa observação ressalta a influência direta da sílica ativa nas propriedades reológicas das misturas, evidenciando a necessidade de ajustes precisos nas proporções para atender aos requisitos de trabalhabilidade.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos do ensaio de trabalhabilidade das misturas referência e com adição de SA.

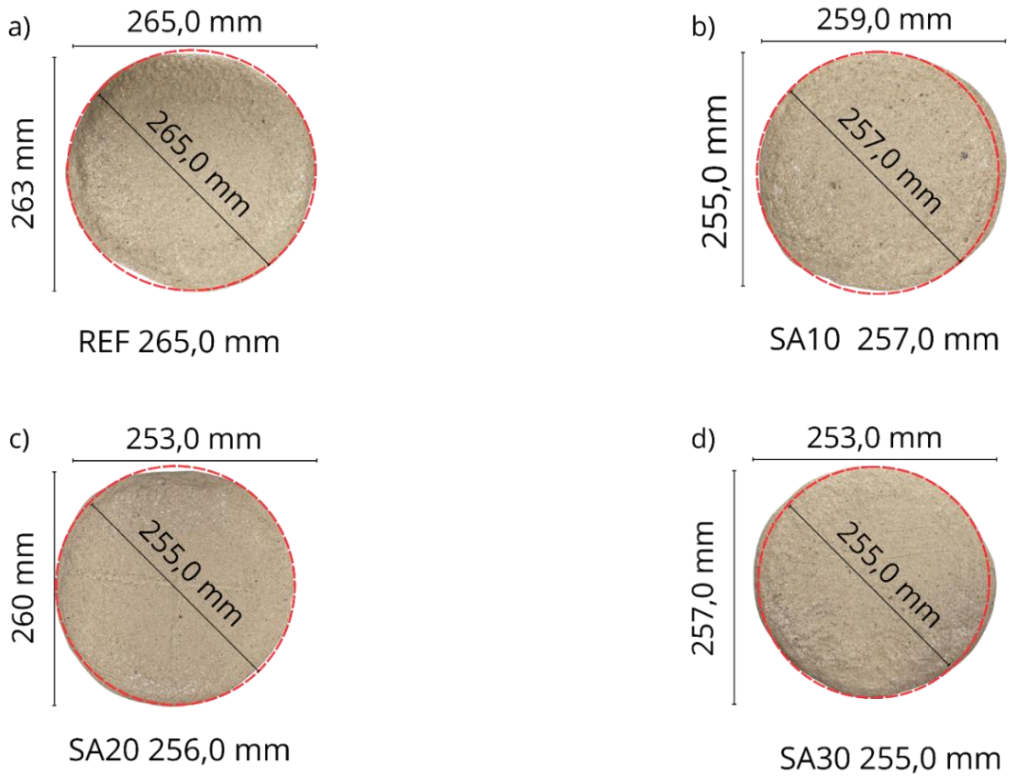


Figura 4 – Resultados do ensaio de índice de consistência: a) amostra REF; b) amostra SA10; c) amostra SA20; d) amostra SA30

A partir da análise da Figura 4, onde estão representadas a medição de três diâmetros ortogonais, para medir o espalhamento médio das misturas, além de círculos em vermelho que foram adicionados para facilitar a compreensão dos aspectos visuais acerca da uniformidade das bordas após o ensaio de trabalhabilidade na mesa de consistência. As misturas foram divididas nas Figuras 4a, 4b, 4c e 4d, correspondendo às misturas REF, SA10, SA20 e SA30, respectivamente.

A partir da análise da Figura 4 percebe-se a influência da adição de SA nas misturas, para a relação água/sólidos (A/S) fixada em 0,21. Enquanto a amostra REF atingiu um espalhamento de 265 mm, as misturas com adição de sílica (SA10, SA20, SA30) apresentaram reduções graduais em seus espalhamentos. Os declínios percentuais nos espalhamentos para as misturas com adição foram de 3,02%, 3,40%, e 3,77%, respectivamente. Desta forma, pode-se afirmar que a SA exerce um impacto significativo na quantidade de água necessária para alcançar o espalhamento da amostra de referência.

4 CONCLUSÕES

Acerca da análise dos resultados das misturas no estado fresco, verifica-se que o teor de ar incorporado exerceu uma influência proporcional sobre as reduções observadas na densidade de massa. Notavelmente, as misturas SA20 e SA30 exibiram comportamentos similares tanto em relação à densidade quanto ao teor de ar incorporado, contrastando com a amostra SA10, que apresentou uma

dinâmica semelhante à da amostra de referência (REF), com mínimas variações na densidade de massa e no teor de ar incorporado.

Além disso, observou-se que as argamassas com SA necessitaram de maiores quantidades de água em comparação com a argamassa de referência para atingir a mesma consistência (250 a 265 mm). Dessa forma, pode-se afirmar que a adição de sílica, embora em pequenos percentuais, impactou na trabalhabilidade das misturas, exigindo pequenos ajustes na relação água/materiais secos para garantir a consistência desejada.

Desta forma, os resultados deste estudo oferecem importantes contribuições para pesquisas futuras no campo da composição e comportamento de argamassas históricas. Especificamente, destacam-se as implicações da adição de sílica ativa nas propriedades no estado fresco das argamassas à base de cal hidratada, abrindo caminho para investigações mais aprofundadas sobre os efeitos desse aditivo em diferentes formulações e aplicações históricas.

1. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR NM 26: Amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR NM 45: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR NM 27: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 13276: Argamassa para revestimento de paredes e tetos –Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR-13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Rio de Janeiro, 2005.

Bauer, E *et al*. (2020). Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. Journal Of Building Pathology and Rehabilitation, [S.L.], v. 5, n. 1, 7. http://dx.doi.org/10.1007/s41024-020-0072-6.

BAUER, E., Souza, J. S., Mota, L. M. G. (2021). Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. Ambiente Construído, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 23-43. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400557.

Bertequini, A. B. T., Machi, I. S., Doná, W. (2019). Estudo de resistência à compressão do concreto reforçado com adição de sílica ativa. Revista Engenharia em Ação, Araçatuba, v. 4, n. 2, p. 18-34.

Cintra, C. L. D., Paiva, A. E. M., Baldo, J. B. (2014). Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. Cerâmica, [S.L.], v. 60, n. 353, p. 69-76. http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132014000100010.

Garijo, L *et al.* (2020). Age effect on the mechanical properties of natural hydraulic and aerial lime mortars. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 236, p. 1-12, Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117573.

Liberalino, V. P. S. L *et al*. (2020). Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas de revestimento com adição de sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis. Anais [...] . Florianópolis: Ibracon. p. 1-15.

Magalhães, A. C. A. (2018). Argamassa de cal com adições pozolânicas. Contribuição para o desenvolvimento de formulações para o restauro. 2018. 312 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, A Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Mansur, A. A. P., MANSUR, H. S. (2006). Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., Foz do Iguaçu, 2006. Anais [...] Foz do Iguaçu.

Mattos, F. C de. (2018) Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos. 2018. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Obrzut, L., Medeiros, A., Luso, E. (2020). Caracterização experimental de argamassas de substituição à base de cal submetidas ao envelhecimento natural e artificial. In: CBPTA 2020. CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2020, Fortaleza. Anais [...] . Fortaleza: Alconpat, 2020. p. 1-12.

Oliveira, S *et al*. (2023). Estudo da adição de fibras de máscaras faciais N95, sílica ativa e pó de mármore em argamassa de alto desempenho. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 28, n. 2, p. 1-11. http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2023-0042.

Sales, L. P. B. (2022). Influência do cloreto de cálcio nas propriedades reológicas de pastas de cal com adições pozolânicas. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Santos, A. M., Silva, Â. J. C., Mota, J. M. F. (2021). Influência da Adição de Cal Hidratada na Aderência do Preparo da Base Chapisco e Argamassa para Revestimento. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-15. http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13039.

Seabra, M. P *et al*. (2009). Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 1147–1153.

Souza, J. S. C. (2013). Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Stolz, C. M., Wasem, K. S. (2020). Manifestações patológicas em edificação histórica no Vale dos Sinos/RS. Revista Tecnologia e Tendências, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 37-52. http://dx.doi.org/10.25112/rtt.v11i1.2189.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) E DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2) NA RESISTÊNCIA DE ARGAMASSAS

Maria José de Souza Serafim[a]; Giovana Machado Clovandi[b]; Isabelle Valença de Carvalho[b]; Kamirã Barbosa Ribeiro[a]

[a]Universidade de Brasília - UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília, Brasil, mmariajo@unb.br; barbosakamira@gmail.com

[b]Centro Universitário de Brasília - CEUB, Setor D Sul Lote 3, CEP 72020-111, Brasília, Brasil, giovanaclovandi@gmail.com; valencaisabelle@gmail.com

RESUMO

Estudos de materiais cimentícios suplementares (MCS) têm sido desenvolvidos utilizando a cinza de casca de arroz (CCA), devido às suas propriedades pozolânicas. O dióxido de titânio (TiO_2), aliado a CCA proporciona benefícios em argamassas, devido a compatibilidade dessa união. Neste contexto, esse trabalho investigou a influência da CCA juntamente TiO_2 como MSC em argamassas. Para tal preparou-se corpos de prova, sendo um produzido apenas com cimento Portland (referência) e outros com substituição de cimento por 4, 9 e 15% CCA, sendo em cada traço adicionado separadamente, 5% TiO_2 Anatase ou 5% TiO_2 Rutilo. Avaliou-se a resistência à compressão da cada argamassa aos 7, 14, 28 e 42 dias de hidratação. Os resultados mostraram ganho de resistência para a traço 4% CCA e 5% TiO_2, em relação a referência a aos demais traços, em ambas as fases Anatase e Rutilo, com exceção de 7 dias, provavelmente devido ao efeito filler do dióxido. Os traços de cinza de casca de arroz associados ao dióxido de titânio Rutilo, aos 42 dias, apresentaram ganho de resistência em relação à referência. Estes resultados foram esperados, pois com o aumento da idade também aumenta a resistência das argamassas.

Palavras-chave: Cinza de Casca de Arroz, Dióxido de titânio, Resistência à compressão, Argamassas

1 INTRODUÇÃO

O Cimento é o material de construção mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água. Como consequência de sua produção, há diversos impactos ambientais, especialmente, durante a obtenção do clínquer, processo no qual o gás carbônico é o principal gás liberado durante a queima de matérias-primas moídas, além da extração de recursos naturais e aumento do consumo de energia global (Fernandes *et al*., 2018). O cenário cimentício tende a crescer expressivamente, decorrente do aumento no número de obras, o que levará a uma emissão de gases poluente ainda maior. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de procedimentos que mitiguem os impactos no ecossistema mundial, para que, a qualidade de vida da população possa ser estendida (Bonato, 2014).

Conforme Bonelli (2022), uma das formas de minimizar os índices de poluição e degradação ambiental, seria reaproveitar os resíduos de outros processos. Nesse contexto, surge a conveniência de utilizar a casca de arroz, na forma de cinzas, substituindo parcialmente o cimento, como um material cimentício suplementar, na fabricação de argamassas. Sabe-se que pós a retirada da casca (cerca de 20% do peso do grão), todo esse material é descartado, normalmente de forma indevida, podendo ser por vezes utilizado como fonte de energia devido ao seu alto poder calorífico e, contudo, em seguida, também é rejeitado (Pouey, 2006).

Estudos têm apontado a eficácia da introdução desse elemento na composição das argamassas. Devido ao seu elevado teor de sílica, há um aumento considerável nos valores de resistência dos corpos de prova, principalmente em idades mais avançadas, além de uma diminuição expressiva nos índices de vazios bem como os de absorção, não alterando, assim, as propriedades particulares do cimento. Ademais, por ser um resíduo de baixo valor de mercado, o traço torna-se mais acessível, no que tange aos preços (MohseniI *et al*, 2016; Natarajan *et al*. , 2022; Bheel *et al*., 2019).

Além disso, o uso de materiais cimentícios suplementares, como o dióxido de titânio (TiO_2), aliado a CCA possui muitos benefícios para o desempenho da argamassa, tendo em vista que essa adição permite uma elevada compatibilidade com outras adições minerais (Essawy, 2013). Dessarte, por ser um material de baixo custo (Shaaban *et al*, 2020) e por estimular o aumento da resistência e diminuir a porosidade, o dióxido de titânio tornou-se alvo e motivo de discussões entre os pesquisadores que buscam alternativas mais sustentáveis para a fabricação de cimento, utilizando ambas as fases Anatase e Rutilo para o desenvolvimento dessas pesquisas (Shultz, 2020; Fernandes, 2017).

Considerando a importância das propriedades da CCA e do TiO_2, bem como o impacto positivo de seu uso para o meio ambiente, este projeto de pesquisa teve como propósito analisar o desempenho desses elementos substituídos parcialmente no cimento, examinando as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas. Para realizar o objetivo referido anteriormente, foram fabricados corpos de prova de referência e com as substituições em teores predefinidos, sobre os quais se submeteram os ensaios descritos na norma, e, em seguida, os resultados foram avaliados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland pode ser constituído somente por clínquer e por substância reguladora de pega, o gesso, o qual se denomina cimento Portland comum; no entanto, outros materiais podem ser acrescentados na produção de cimentos com Materiais Cimentícios Suplementares – MCSs. A

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica o cimento Portland em diferentes tipos de acordo com os seus componentes e propriedades.

O tipo de cimento a ser escolhido é função da disponibilidade de mercado e, principalmente, das propriedades que se deseja do produto cimentício ou do tipo de edificação a que se destina. É de grande importância o conhecimento das proporções dos compostos presentes em cada cimento, para o mesmo tenha a finalidade de aplicação desejada (Gobbo, 2009; Ribeiro *et al.*, 2019).

2.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCSs)

Os MCSs são materiais inorgânicos finamente moídos (normalmente com granulometria igual ou menor que o cimento) que podem ser adicionados ao concreto com finalidades de melhorar suas propriedades ou proporcionar características especiais ao concreto, geralmente essas características são resistência mecânica e a durabilidade (Duart, 2008). Entre os materiais cimentícios suplementares mais importantes estão as pozolanas, sendo que as mais comumente utilizadas são as cinzas volantes, a escória de alto forno, a sílica ativa, o metacaulim e, em menor quantidade, a cinza de casca de arroz (Rêgo, 2004; Cordeiro, 2009).

Os MCSs podem proporcionar diminuição do consumo de cimento, redução de desperdícios favorecendo menor impacto ambiental e, ainda, a redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2) dos fornos de cimento (Neville, 1997; Mehta *et al.*, 2014). Além das vantagens técnicas, o uso de substituições parciais de MCS para cimento também afetam os custos de produção por causa do seu baixo custo quando comparado com o cimento. A escolha de um tipo específico de material cimentício, tal como a cinza de casca de arroz, escórias, cinzas volantes, sílica ativa, é guiado principalmente por preocupações sobre disponibilidade e as características de desempenhos especificados para o concreto a uma determinada idade, bem como os custos de produção (Pinheiro, 2016).

2.3 DISPONIBILIDADE DA CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA)

A casca de arroz é definida como um resíduo da produção de arroz ao redor do mundo. Essa substância geralmente é rejeitada e desprezada devido a seu baixo valor comercial e, muitas vezes, descartada de maneira inapropriada e prejudicial ao meio ambiente (Fernandes *et al.*, 2018), já que as empresas geralmente não possuem métodos de aproveitamento desse resíduo.

Atualmente, ela vem sendo utilizada como fonte de energia, devido ao seu alto poder calorífico, todavia, na maior parte dos casos, é descartada, geralmente, de forma inadequada e em locais inapropriados. Após a sua queima de forma controlada, ela se torna um pó cinza com elevados teores de sílica, alcançando valores de 90 a 95%, que no cimento é utilizado na forma de pozolana.

Esse método de manipulação é feito quando a sílica é moída finamente e, na presença de água, gera um composto com características cimentícias. Além disso, vale ressaltar que a CCA pode adquirir um aspecto escuro se queimada da maneira incorreta, em consequência da não oxidação dos carbonos fixos. Dessa forma, as impurezas inorgânicas e carbonos não são retirados do composto, consequentemente, quando substituída no cimento, pode ocasionar uma queda na resistência da argamassa devido à presença das impurezas resultando em um aspecto mais escurecido (Pouey, 2006; Natarajan *et al*., 2022). No entanto, pode-se realizar um teste de perda ao fogo para conhecer o teor de pureza que a substância adquiriu ao ser queimada e, dessa maneira, julgar se o uso dessa cinza é apropriado para a argamassa.

Dessarte percebeu que existe uma alta disponibilidade dessa substância para a produção de cinza o que torna esse produto extremamente barato, por conseguinte, os custos de produção do material cimentício seriam reduzidos de maneira significativa, pois substituiria o clínquer que possui uma produção mais cara (Camilo, 2018; Bheel *et al*. ,2019).

2.4 EFEITOS DO USO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NO MEIO AMBIENTE

Primeiramente, o uso da cinza da casca de arroz (CCA) como um substituto para o cimento, seria extremamente benéfico para o meio ambiente que vem sofrendo desgaste há muito tempo devido às ações antropogênicas relacionadas à construção civil. Diante da degradação, o ecossistema mundial começou a mostrar os resultados desses comportamentos, assim, é fundamental que decisões sejam tomadas em favor da sustentabilidade (Fernandes, 2017). Consoante Thais Bonelli (2022), o reaproveitamento de resíduos é ótima alternativa para minimizar impactos ambientais. Dessa maneira, a substituição parcial do cimento por CCA, um resíduo pouco usado, ajudaria a mitigar as emissões de gases poluentes, especialmente o CO_2, derivado da produção do clínquer. Além disso, vale salientar que o descarte indevido da cinza leva à emissão de metano e óxido nitroso, gases que prejudicam a atmosfera da Terra, à vista disso, o reaproveitamento dessa substância evitaria que esses gases fossem lançados na natureza. Em suma, conforme Camilo (2018) e Masanja (2022) a CCA seria responsável por reduzir os índices de poluentes no ar, acarretado uma melhora na qualidade da atmosfera.

2.5 EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS

Além dos benefícios ambientais, a CCA também dispõe de vantagens no que tange as propriedades físicas. Estudos como o de Fernandes (2018), de Natarajan (2022) e de Ludwig (2014) mostraram que o uso da cinza proporcionou às amostras um aumento considerável nas resistências, no entanto, esse crescimento se tornou mais perceptível apenas em idades mais avançadas, fato ocorrido devido à reatividade da pozolana ser mais lenta. Ademais, os autores salientaram que a CCA não alterou as demais propriedades e características da argamassa nas idades mais recentes, ou seja, até 28 dias de cura, assim, a substância poderia ser utilizada como um substituto parcial ao cimento sem que houvesse perdas no tocante as particularidades da argamassa que poderiam impossibilitar tal modificação.

Além disso, a CCA também diminui a absorção de água nas argamassas, bem como o índice de vazios. Esse fato se deve ao tamanho das partículas da substância que por ser extremamente fina consegue atingir os vazios presentes na argamassa. Consequentemente, a absorção de água torna-se limitada impedindo que futuramente a argamassa manifeste quaisquer patologias referentes a essa propriedade física. Além disso, ensaios realizados recentemente demonstraram que os índices de absorção e de vazios são reduzidos significativamente conforme o aumento dos teores de CCA e do tempo de cura. Em síntese, o uso parcial da CCA nas argamassas apresenta inúmeras vantagens em algumas propriedades importantes desse material tão comumente usado no campo da Engenharia Civil (Mohseni *et al*., 2016; Silva, 2019;).

2.6 DISPONIBILIDADE DO DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2)

O dióxido de titânio, também conhecido como o titânio (IV) ou óxido de titânia, é o óxido natural de titânio, com a fórmula química TiO_2 e possui três estruturas cristalinas na natureza, são elas as formas: Anatase, Rutilo e brookita. Todos esses três tipos apresentam a mesma fórmula química: TiO_2, porém as suas estruturas cristalinas são diferentes. As duas primeiras apresentam estruturas cristalinas tetraédricas enquanto a brookita apresenta estrutura ortorrômbica (Kaleji, 2011; Gupta, 2011). Geralmente a fase bruquita é metaestável, portanto, de baixo interesse.

A forma mais comum é o Rutilo, que também é a fase de equilíbrio em todas as temperaturas. As fases metaestáveis e Anatase da brookita se convertem para Rutilo após aquecimento (Cotton *et al*., 1995). O Rutilo, o anatásio e a brookita, contêm seis titânios coordenados, como mostra a Figura 1 (Moellmann *et al*., 2012).

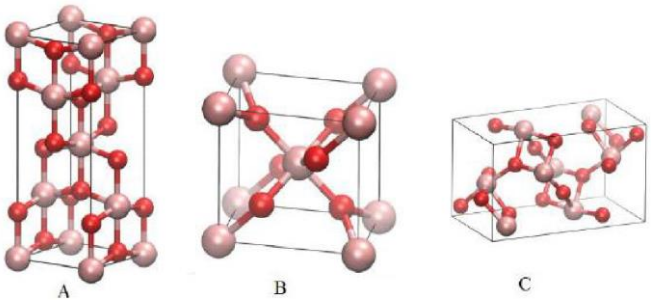


Figura 1 - Estruturas cristalinas do TiO_2: Anatase (A), Rutilo (B) e Brooquita(C).

O TiO_2 apresenta partículas nanométricas (1 a 100 nm) (Rashad, 2015) e propriedade fotocatalítica, conhecida como efeito Honda-Fujishima, o que justifica a sua ação autolimpante. Ele atua como excelente fotocatalisador e é eficaz para a obtenção de alguns tipos de superfícies autolimpantes, manifesta-se a hipótese de que o material possa ser introduzido no traço do concreto, com o objetivo de reduzir manchas nas fachadas (Schultz, 2020).

Entre os semicondutores, o TiO_2 tem demonstrado ser um semicondutor adequado para o processo fotocatalítico. Processos que constituem, especialmente, despoluição de águas contaminadas com micro poluente orgânico, geração de gás hidrogênio e sistemas antiembaçantes e autolimpantes para espelhos (Shultz, 2020).

2.7 EFEITOS DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS

Uma propriedade importante observada do TiO_2 é a sua influência na resistência mecânica em argamassas e concretos. O TiO_2 é um material inerte as reações de hidratação dos materiais cimentícios, porém por suas partículas serem nanometricas ele atua preenchendo os poros, reduzindo a porosidade da argamassa (Ehrenbring *et al*., 2022).

Não apenas a substituição de cimento por TiO_2 pode melhorar a resistência à compressão de materiais cimentícios, como também sua adição no processo de fabricação do clínquer que apresentou resultados positivos quanto à otimização da presença de C_3S, sendo o teor ótimo de 4,5% em massa (Ribeiro, 2021).

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados os materiais listados a seguir:

- Areia padrão do IPT
- Cimento Portland CP II F32
- Cinza da casca de arroz
- Dióxido de titânio nas fases Anatase e Rutilo

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 PREPARO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

A queima da casca do arroz foi realizada seguindo o procedimento descrito a seguir.

A casca do arroz foi colocada em cápsulas cerâmicas e levada ao forno mufla, para aquecimento a partir da temperatura ambiente. A temperatura de queima foi pré-programada para o forno atingir um máximo de 600°C, permanecendo por 2 horas. Em seguida, o forno foi desligado aguardou-se pelo seu resfriamento até atingir a temperatura ambiente. A CCA obtida está mostrada na Figura 2. A CCA foi pulverizada em almofariz.

Figura 2: Cinza da Casca de Arroz tratada em 600°C por 2 horas em forno mufla.

Após o preparo, a CCA foi submetida ao ensaio de teor de sólidos, de acordo com a NM 18:2012, que determina um valor 6%, para que o material seja aplicado como MSC em argamassas. O ensaio foi realizado em triplicata e, a média do teor de sólidos obtida ficou em 4,40%.

3.2.2 PREPARO DAS ARGAMASSAS

Para a realização dos ensaios, moldaram-se os corpos-de-prova de acordo com a NBR 7215/2019, para a determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Prepararam-se argamassas segundo com os traços utilizados: somente com cimento para o traço de referência e mais seis traços distintos, cada um deles substituindo-se o cimento por 4, 9 e 15% em massa de CCA e 5% em massa de TiO_2, conforme apresenta o Quadro 1.

Quadro 1 – Nomenclatura e composição das argamassas.

ARGAMASSA	COMPOSIÇÃO
Referência	100% cimento CP II F32
4CCA/5A	91% de CP V + 4% de CCA + 5% Anatase
9CCA/5A	86% de CP V + 9% de CCA + 5% Anatase
15CCA/5A	80% de CP V + 15% de CCA + 5% Anatase
4CCA/5R	91% de CP V + 5% de CCA + 5% Rutilo
9CCA/5R	86% de CP V + 5% de CCA + 5% Rutilo
15CCA/5R	80% de CP V + 5% de CCA + 5% Rutilo

Em seguida, as argamassas com substituição por 4, 9 e 15% de cinza de casca de arroz, associada separadamente a um teor fixo de 5% de dióxido de titânio Anatase e Rutilo, foram preparadas. As substituições parciais propostas do cimento modificaram apenas a massa de cimento, visto que os materiais, cinza de casca de arroz e dióxido de titânio, não possuem água em suas fórmulas, assim, a relação água/cimento permaneceu inalterada e igual a 0,48. Prepararam-se quatro corpos de prova para cada traço em cada idade. Na Tabela 1 estão os traços e a nomenclatura das argamassas.

Tabela 1. Traços utilizados no preparo das argamassas.

Traço CCA/TiO_2	**Cimento Portland (g)**	**Cada fração de areia (g)**	**CCA (g)**	**TiO_2 Anatase (g)**	**TiO_2 Rutilo (g)**	**Água (g)**
Referência	624,00	468	***	***	***	300
4CCA/5A	567,8	468	25,0	31,2	***	300
9CCA/5A	536,6	468	56,2	31,2	***	300
15CCA/5A	499,2	468	93,6	31,2	***	300
4CCA/5R	561,6	468	25,0	***	31,2	300
9CCA/5R	536,6	468	56,2	***	31,2	300
15CCA/5R	499,2	468	93,6	***	31,2	300

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a resistência à compressão, de acordo com a NBR 7215/2019, estão apresentados nas Figuras 3 e 4, para as substituições do cimento por CCA associada ao TiO_2 Anatase e Rutilo, nas idades estudadas e nos variados teores de substituição.

Para as resistências aos 7 dias de idade, as argamassas com dióxido de titânio Anatase apresentaram resultados similares com as argamassas com o dióxido Rutilo, porém ambas com valores inferiores de resistência da argamassa de referência.

Aos 14 dias de hidratação, o teor de substituição de 4% de cinza da casca de arroz com ambos os dióxidos Anatase e Rutilo, apresentaram maior resistência em relação à referência. Para os teores de 9 e 15% de cinza de casca de arroz mantiveram menor resistência que a referência para os dióxidos e, valores bem próximos entre as duas fases.

A partir dos ensaios aos 28 dias, as médias das substituições por dióxido de titânio Anatase apresentaram maiores resultados que as médias por substituição por dióxido de titânio Rutilo, com exceção do traço 15% de cinza de casca de arroz. Nessa idade, também se observa maior resistência, ou seja, a maior média em relação aos resultados de resistência das argamassas de referência dos traços 4% de cinza da casca de arroz e ambos os dióxidos e, 9% CCA com o dióxido Anatase. Estes resultados devem-se, provavelmente, devido ao efeito filer.

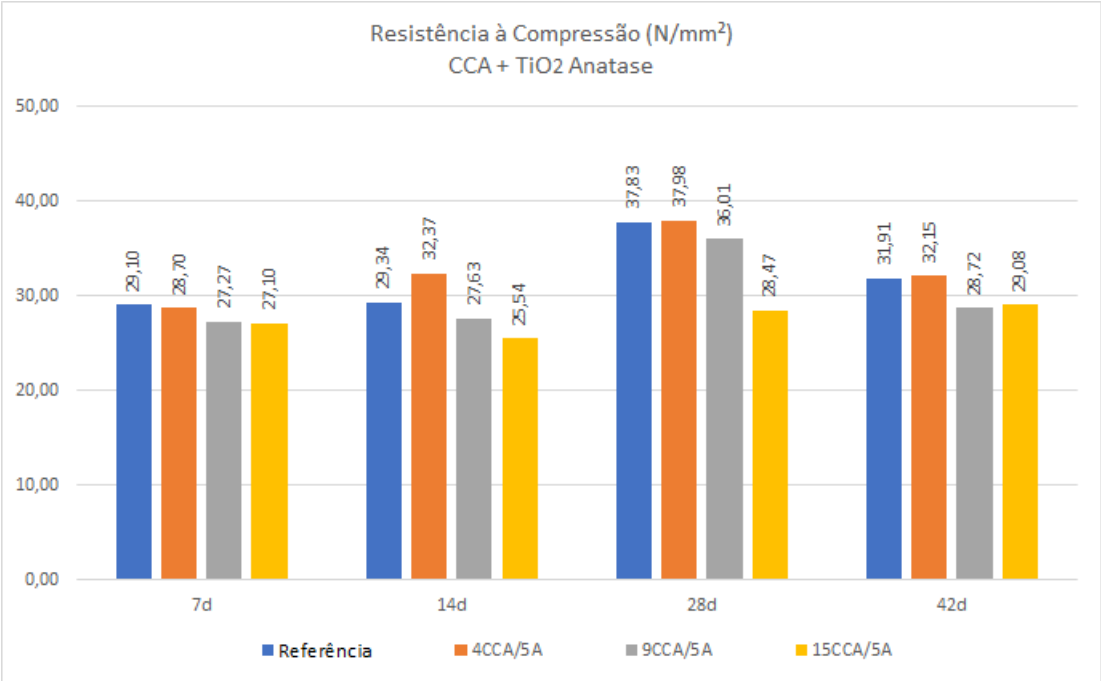


Figura 3. Resistência à compressão para as substituições com CCA e TiO_2 na fase Anatase, nas idades de 7, 14, 28 e 42 dias.

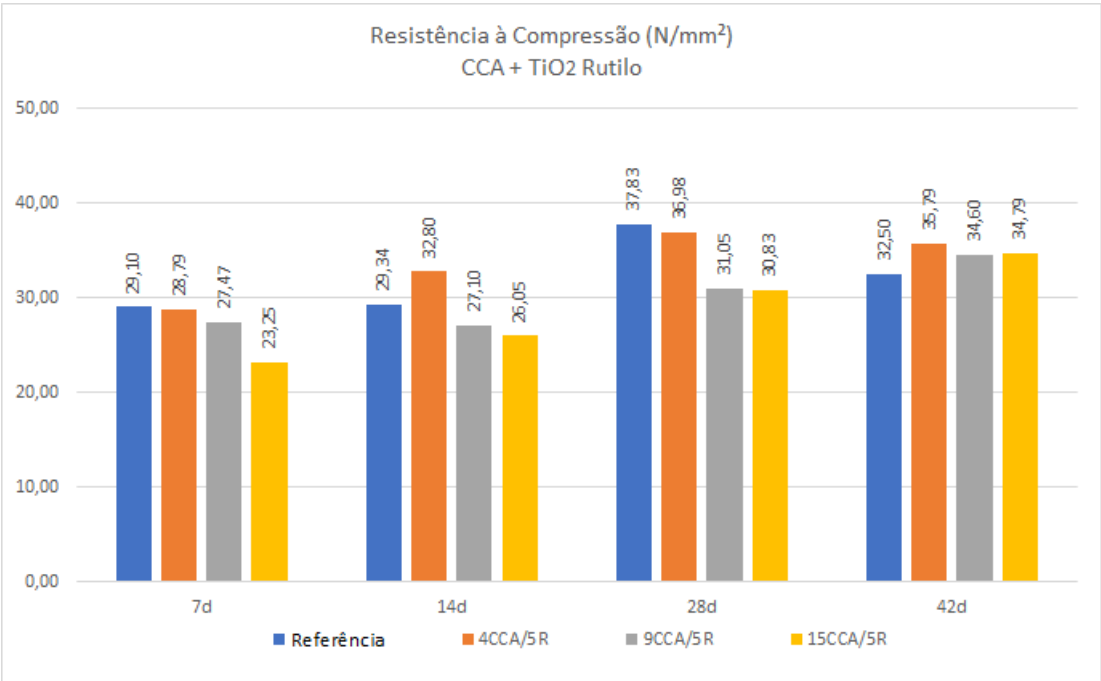


Figura 4. Resistência à compressão para as substituições com CCA e TiO_2 na fase Rutilo, nas idades de 7, 14, 28 e 42 dias.

Em 42 dias, os ensaios de resistência apresentaram resultados relativos maiores para argamassas com o dióxido de titânio Rutilo do que com dióxido Anatase. Em relação à resistência da referência, todas as argamassas com substituições de dióxido Rutilo apresentaram maiores resultados. O mesmo comportamento não ocorreu com as argamassas com substituições do cimento pelo dióxido Anatase, que apresentaram menor resistência que a referência, com exceção do traço 4% CCA e a referência que não foi significativa.

A tendência que se manteve aos 28 e 42 dias de idade, com o traço com 4% de CCA apresentando maior resistência que a referência e os demais traços, ratifica a propriedade da pozolana dispor de uma reação mais lenta, atingindo melhores resultados em idades mais avançadas.

É possível observar nas Figuras 3 e 4, que o teor que mais se destacou foi o de 4% que superou os valores da resistência da referência e dos demais teores de CCA, aos 14, 28 e 42 dias de idade, provavelmente devido ao efeito filler do óxido. A exceção ocorreu aos 7 dias, que a resistência foi menor que a referência, porém maior que dos demais teores de CCA nesta idade.

5 CONCLUSÕES

Abordou-se nessa pesquisa, estudo para avaliação da influência da substituição por variados teores de cinza da casca de arroz associada ao dióxido de titânio nas fases cristalinas Anatase e Rutilo, em argamassas de cimento. Este estudo permitiu dar continuidade a investigações quanto à viabilidade de uso de dióxidos de titânio como material cimentício suplementar em argamassas de cimento Portland.

Observou-se pelos ensaios de resistência à compressão com substituições da cinza da casca de arroz e dióxido de titânio, que os maiores resultados em relação à referência, ocorreram com substituição de 4% CCA e 5% TiO_2 Anatase aos 14, 28 e 42 dias.

A substituição CCA associada ao TiO_2 na forma cristalina Rutilo apresentou ganho de resistência em relação à referência em todos os traços aos 42 dias de hidratação.

A cinza da casca de arroz apresenta propriedades pozolânicas, responsável pela eficiência da sua substituição parcial do cimento. Assim, podem ser desenvolvidos outros estudos com esses materiais em teores mais altos ou associados a outros materiais.

Os resultados experimentais obtidos não impedem que maiores estudos sejam desenvolvidos, como por exemplo, utilizando-se substituições conjuntas do dióxido de titânio nas fases Anatase e Rutilo, com outros materiais cimentícios suplementares e avaliar a resistência à compressão e outras propriedades de compósitos cimentícios obtidos.

Pode-se também avaliar outras propriedades e aplicações de argamassas resultantes de substituições de cimento pelos dióxidos de titânio, pois se sabe das vantagens econômicas e ambientais da utilização de materiais cimentícios suplementares, destacando-se que estes compostos de titânio apresentam propriedades significativas o que agrega a grande importância na investigação de novas aplicações para estes materiais.

REFERÊNCIAS

Bheel, N.; Dayio, A.; Abro, A.; Shaikh, S.; Shar, I.; Shaikh, Z. (2019). Use of rice husk ash as cementitious material in concrete. Engineering Technology & Applied Science Research, v. 9, p. (4209-4212)

Bonato, M. (2014). Desempenho Mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais orgânicas e fotocatalíticas. Universidade Federal do Paraná, p. (1-189)

Bonelli, T.M. (2022). Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com adição de cinza de casca de arroz. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Técnologico de Joinville, p. (1-58)

Camilo, M.G. (2018). Estudo do uso de cinza de casca de arroz como material cimentício suplementar para produção de concreto. UNISUL, p. (1-38)

Cordeiro, L.N.P. (2009). Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Cotton, F.A.; Wilkinson, G.; Gaus, P.L. (1995). Basic Inorganic Chemistry, 3rd ed., John Wiley & Sons, p. 550

Duart, M.A. (2008). Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

Ehrenbring, H.Z.; Christ, R.; Pacheco, F.; Francisco, L.W.; Bolezina, G.C.; Hanauer, N.B.; Grings, G.G.; Tutikian, B.F. Analysis of the Self-Cleaning Potential of Glass Fiber Reinforced Concrete (GRC) with TiO_2 Nanoparticles.

Essawy, A.A.; El.Aleem, S.A. (2014). Physico-mechanical properties, potent adsorptive and photocatalytic efficacies of sulfate resisting cement blends containing micro silica and nano-TiO_2. Construction and Building Materials, v. 52, p. 1–8

Fernandes, C. (2017). Estudo sobre a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em argamassas fotocatalíticas. Universidade Federal do Ceará, p. (1-86)

Fernandes, D.; Rodrigues, S.; Carrijo, S. (2018).Cinza da casca de arroz como substituição parcial do cimento. Pesquisa UNIFEMES, p. (1-7)

Gobbo, L.A. (2009). Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo

Gupta, S.M.; Tripathi, M. (2011). Chinese Science Bulletin, v. 56, p. 1639

Kaleji, B.K.; Mamoory, S.R.; Sanjabi, S. (2011). Reaction kinetics, Mechanisms and Catalysis, v. 103, p. 289

Ludwig, D. (2014). Concreto com adição de cinza de casca de arroz. Univates, p. (1-58)

Masanja, D.N.; Muya, M.S.; Nyangi, P. (2022). Characteristics of Combined Rice and Wheat Husk Ashes as a Partial Replacement for Cement in Mortar. Civil Engineering Journal. v. 08, p. (1-12)

Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. (2014). Concreto: estrutura, propriedades e materiais. Ed. IBRACON, 3ª Edição, São Paulo

Moellmann, J.; Ehrlich, S.; Tonner, R.; Grimme, S. (2012). A DFT-D study of structural and energetic properties of TiO_2 modifications. Journal of Physics: Condensed Matter, v. 24, p. 424206

Mohsenil, E.; Naseri, F.; Amjadi, R.; Khotbehsara, M.; Ranjbar, M. (2016). Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano-TiO_2 and rice husk ash. Constrution and Building Materials v.114, p. (656-664)

Natarajan, S; Jeelani, S.H.; Sunagar, P.; Magade, S.; Salvi, S.S.; Bhattacharya, S. (2022). Investigating Conventional Concrete using Rice Husk Ash (RHA) as a Substitute for Finer Aggregate. Journal of Physics: Conference Series, p. (1-8)

Neville, A.M. (1997). Propriedades do concreto; tradução Salvador E. Giammusso. 2ª ed. Pini, São Paulo

Pinheiro, D G.L. (2016). Avaliação da atividade pozolânica em cinzas de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Pouey, M. (2006). Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. (1-345)

Rashad, A.M. (2015). A Synopsis about the Effect of Nano-Titanium Dioxide on Some Properties of Cimentitious Materials – A Short Guide for Civil Engineer. Reviews on Advanced Materials Science, v. 40(1), p. 72-88

Rêgo, J.H.S. (2004). As cinzas de casca de arroz (CCAs) cristalina e amorfa como adição mineral ao cimento – Aspectos da microestrutura das pastas. 2004. 274 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília

Ribeiro, K.B.; Andrade, T.M.; Serafim, M.J.S.; Rêgo, J.H.S. (2019). Influência da substituição de óxido de nióbio em argamassas de cimento. Anais do 61º Congresso Brasileiro de Concreto - IBRACON. ISBN 21758182

Ribeiro, K.B. (2021). Influência da substituição de cimento por dióxido de titânio na resistência mecânica e propriedades físicas de argamassas. Brasília/DF: Programa de Iniciação Científica (PIC) em Engenharia Civil – Centro Universitário de Brasília – UniCEUB

Silva, R. (2019). Estudo da durabilidade de concretos com a substituição do cimento por cinza de casca de arroz sob ação de sulfatos. UNIVATES, p. (1-68)

Shaaban, I.; El-Sayad, H.; El-Ghaly, A.; Moussa, S. (2020). Effect of micro TiO_2 on cement mortar. European Journal of Materials Science and Engineering v. 5(2), p. (58-68)

Schultz, T.L. (2020). Ensaios de concreto autolimpante para utilização na construção civil. UniLAVRAS, p. (1-62)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

NANOSSÍLICA FUNCIONALIZADA COM 3-AMINOPROPILTRIETOXISILANO (APTES) PARA UTILIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS - UMA REVISÃO DA LITERATURA

Andréia de Paula[a]; Kleymer Henrique Pereira Silva[a], João Henrique da Silva Rêgo[a], Maria José de Souza Serafim[a]

[a]Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, Prédio SG – 12, 1º andar, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, cep 70910-900, paula_adp@yahoo.com.br, kleymerhenriquepereirasilva@gmail.com, jhenriquerego@unb.br, mmariajo@unb.br.

RESUMO

A nanossílica (NS) é uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento tem resultado na melhoria da resistência à compressão e no refinamento da porosidade, o que influencia na durabilidade dos materiais cimentícios. Todavia, a NS contribui para potencializar efeitos indesejáveis no comportamento reológico, trabalhabilidade e propriedades endurecidas finais. Alguns pesquisadores promoveram mudanças na superfície da NS (funcionalização) visando minimizar os efeitos adversos. O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão da literatura, com foco nas principais pesquisas já produzidas sobre funcionalização da NS com APTES. Foram definidas as condições de contorno e a base de dados a ser utilizada. Fez-se a seleção e avaliação dos artigos, aplicando critérios de exclusão, a fim de selecionar aqueles que tinham aderência ao tema. Os resultados mostraram que a NSF com APTES resulta em melhor dispersibilidade, melhoria na resistência à compressão em idades mais avançadas, formação de C-S-H adicional, alteração na microestrutura do gel C–S–H, retardo da hidratação do cimento, melhora na trabalhabilidade e redução da porosidade. Torna-se relevante novas pesquisas sobre o tema, buscando identificar como a NSF atua na reologia dos materiais cimentícios e verificar o efeito do tamanho da partícula de NS na funcionalização com aminosilano.

Palavras-chave: Nanossílica, Funcionalização, APTES, Cimento Portland.

1 INTRODUÇÃO

De acordo Xu *et al*. (2016), nos últimos anos, os efeitos das nanopartículas nas propriedades de materiais à base de cimento têm sido amplamente investigados e podem desempenhar um papel importante para um uso eficiente do cimento. Devido aos seus tamanhos de partículas, área superficial notável e alta reatividade, a NS se apresenta como uma nanopartícula com grande potencial de utilização em materiais à base de cimento.

Os nanomateriais possuem excelentes propriedades e funções que podem proporcionar aos compósitos cimentícios alto desempenho, melhora nas propriedades mecânicas e de durabilidade (Cui *et al*., 2016; Kim *et al*., 2014; Han *et al*., 2015; García-Macías *et al*., 2017). Com o avanço da nanotecnologia, vários estudos foram realizados para investigar as propriedades dos nanomateriais interagindo com os produtos de hidratação do cimento (Makar *et al*., 2009; Land e Stephan, 2012; Han *et al*., 2013; Pan *et al*., 2015; Mohammed *et al*., 2015).

A NS possui uma reatividade pozolânica rápida e um efeito acelerador na hidratação do cimento (Senf *et al*., 2009; Madani *et al*., 2012). Pesquisas demonstraram um ganho na resistência à compressão de misturas formuladas com nanopartículas de sílica, principalmente nas idades iniciais (Feng *et al*., 2020; Fernández *et al*., 2013). Além disso, segundo Mendes e Repette (2019) e Fernández *et al*. (2013), o efeito de empacotamento que melhora a distribuição granulométrica, reduzindo a porosidade e a pozolanicidade entre NS e hidróxido de cálcio (CH) produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), são os principais efeitos da NS na microestrutura da matriz cimentícia.

No entanto, a adição de nanopartículas a matriz cimentícia não traz apenas benefícios. A quantidade excessiva de NS pode causar aglomeração, devido à dispersão inadequada, o que resulta em efeitos negativos sobre o comportamento reológico, trabalhabilidade e propriedades endurecidas finais de compósitos de cimentos (Durgun e Atahan, 2017; Ren *et al*., 2020). Devido à sua alta energia de superfície (Yang *et al*., 2021; Fraga *et al*., 2020; Singh *et al*., 2013; Hou *et al*., 2013; Bahmani *et al*., 2016; Durgun e Atahan, 2017; Andrade *et al*., 2018; Ganesh Rathod *et al*., 2018; Sonebi *et al*., 2015) as nanopartículas de sílica se aglomeram facilmente, dificultando sua dispersão uniforme no concreto (Fang *at al*.; 2021). A aglomeração de nanopartículas de sílica pode afetar adversamente as propriedades reológicas e as propriedades mecânicas de longo prazo nos materiais a base de cimento (Yajun *et al*., 2003).

De acordo com Zhao *et al*. (2020), essa aglomeração leva à formação de muitos locais defeituosos no nano compósito, limita a eficiência dos nanomateriais na matriz e aumenta o custo dos nano compósitos. A formação e presença desses aglomerados dificulta a dispersão adequada das nanopartículas nas misturas de cimento, levando à criação de zonas fracas no produto final, afetando o comportamento reológico da pasta e as propriedades finais endurecidas.

A limitação da trabalhabilidade das pastas e argamassas pode ocasionar possíveis problemas na durabilidade e resistência a longo prazo (Balapour *et al*., 2018; Lim *et al*., 2018; Martins *et al*., 2020). Já o rápido ganho de resistência nas idades iniciais introduzido pela utilização de NS, traz como consequência negativa a retração autógena.

Para evitar estes efeitos indesejados, a modificação da superfície da NS através de processos de funcionalização tem se apresentado como uma solução para vencer os desafios na utilização de NS nas misturas a base de cimento (Collodetti *et al*., 2014; Monasterio *et al*., 2015; Gu, Wei *et al*., 2017; Gu *et al*., 2018; Huang *et al*., 2020; Dileep *et al*., 2021). Segundo Fraga *et al*. (2021) e Martins (2022), a

funcionalização é um processo químico que consiste em incluir novas funções químicas a nano partícula, anexando grupos funcionais à superfície dessas nanopartículas hidrofóbicas, a fim de melhorar o comportamento hidrofílico desses materiais. A presença de grupo silanóis na superfície da sílica permite que ocorra a sua modificação química, produzindo novos materiais com as mais variadas aplicações tecnológicas.

Em se tratando da nanossílica funcionalizada (NSF), a reação química que ocorre durante a funcionalização, substitui os grupos silanóis (OH) da superfície da NS por um outro grupo de maior interesse, geralmente os grupos amina, e mais especificamente em se tratando deste trabalho, utilizando o reagente 3-aminopropiltrietoxisilano (APTES). Para Fraga *et al*. (2021), os aminosilanos são conhecidos por terem uma polaridade que permite que eles sejam dispersos em meio iônico (como as pastas de cimento Portland) mais facilmente do que outros grupos orgânicos, como os grupos silanol presentes na NS.

De acordo com Collodetti *et al*. (2014), Vasconcellos *et al*. (2020) e Fraga *et al*. (2021) a cinética de hidratação de pastas de cimento é alterada com a incorporação da NSF quando comparada com uma pasta de referência contendo apenas cimento ou com uma pasta contendo NS, porém estes efeitos variam de acordo com o grupo químico utilizado. As pesquisas realizadas por Rong *et al* (2020), Collodetti *et al* (2014), Monastério *et al* (2015), Vasconcellos (2021), Martins (2022) e Paula (2023), utilizando como agente funcionalizador da NS os aminossilanos encontraram resultados positivos tais como: melhor dispersibilidade, melhoria na resistência à compressão em idades posteriores, aumento do período de indução, formação do C-S-H adicional, aumento no comprimento das cadeias de silicato, alteração na microestrutura do gel C–S–H, retardo da hidratação do cimento, redução na demanda por aditivo, melhora na trabalhabilidade e redução do volume de poros total.

Os trabalhos publicados sobre funcionalização de NS com APTES mostram que há uma molhora na dispersibilidade, na resistência à compressão em idades posteriores, um aumento do período de indução, formação do C-S-H adicional, aumento no comprimento das cadeias de silicato, alteração na microestrutura do gel C–S–H, retardo da hidratação do cimento, redução na demanda por aditivo, melhora na trabalhabilidade e redução da porosidade, porém ainda há muito o que se estudar sobre os efeitos da aplicação do NSF com APTES na matriz cimentícia.

Por este motivo, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão da literatura, com foco nas principais pesquisas já produzidas sobre funcionalização da NS com APTES, mostrando que ainda muito pouco se sabe sobre os efeitos da funcionalização da superfície da nanossílica com APTES, sendo importante realizar novos estudos a fim de entender melhor os efeitos que a funcionalização da NS com APTES traz para a matriz cimentícia.

2 METODOLOGIA

Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura com foco nas principais pesquisas já realizadas sobre a funcionalização da nanossílica utilizando como agente funcionalizador o 3-aminopropiltrietoxisilano (APTES). Para encontrar os artigos mais relevantes sobre o tema, foi preciso delimitar a área de conhecimento (Engenharia e ciência dos materiais), definir o espaço-tempo da pesquisa (adotando os últimos 10 anos de publicações, ou seja, estudos mais recentes) e definir o descritor das palavras-chaves utilizando o termo em inglês “functionalized nanosilica”, através dos filtros de busca, disponíveis na plataforma Periódicos Capes. A busca de artigos pela palavra chave “functionalized nanosilica” teve como objetivo verificar os artigos que tratam de NSF independente do

tipo de agente funcionalizante utilizado. A base de dado escolhida foi o banco de publicações da Web of Science, sendo analisados apenas artigos publicados nesse periódico. Inicialmente foram avaliados todos os artigos encontrados com aderência ao descritor das palavras-chaves, sendo possível identificar a evolução das publicações ano a ano, os países que mais publicaram e as áreas de pesquisa onde estão concentrados os maiores números de publicações.

Em seguida, foi acrescentada a busca mais uma palavra chave, o termo em inglês “cement” buscando identificar os artigos que tratam de nanossílica funcionalizada para utilização em materiais cimentícios. Foi realizada a seleção e avaliação dos artigos encontrados por meio da análise dos títulos e dos resumos de cada um dos artigos, buscando-se aqueles que tinham aderência ao tema: Nanossílica funcionalizada com APTES para utilização em materiais cimentícios. Posteriormente, foi realizada a leitura na íntegra dos artigos selecionados pelo critério de exclusão, afim de apresentar os principais resultados da aplicação da NSF em materiais cimentícios. A Figura 1 apresenta uma síntese dos procedimentos adotados para análise dos trabalhos científicos.

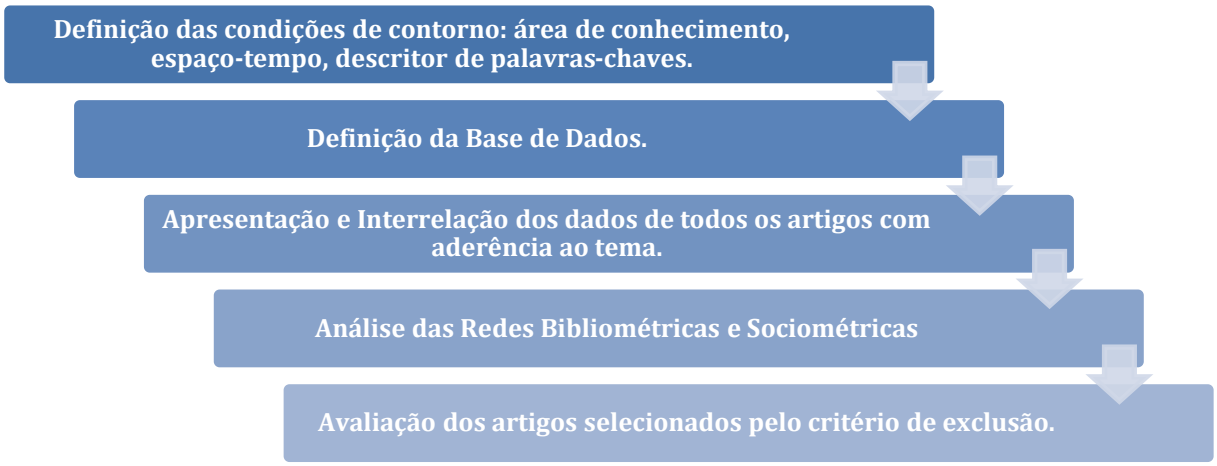


Figura 1: Procedimento adotado para análise dos trabalhos científicos

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento aplicado na base de dados da Web of Science resultou em 287 publicações entre os anos 2013 até março de 2024, adotando-se como descritor de palavras-chaves o termo em inglês “functionalized nanosilica” e realizando a busca nos campos título do artigo, resumo e palavras-chave. Em seguida, passou-se para a análise dos artigos encontrados.

3.1 Evolução da produção científica com o tempo

Ao analisar a Figura 2, é possível notar que dentre as 287 publicações encontradas, o maior número de publicaçõe sobre o tema se deu em 2019 (total de 42 publicações). A média de publicações de 2013 a 2018 (6 anos) foi de 17,85 artigos. Já a média de publicações de 2020 até março de 2004 é de 23,2 artigos, mostrando o crecente interesse sobre o tema.

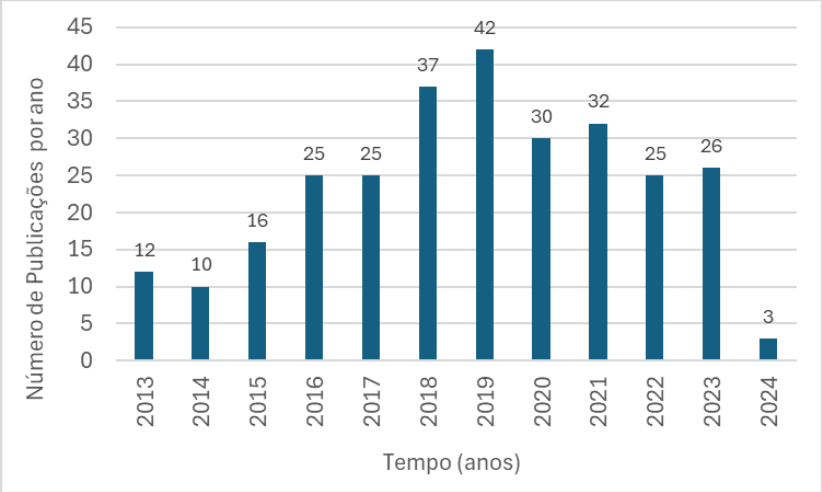


Figura 2 – Evolução das publicações por ano

3.2 Volume de publicações por país

Já a Figura 3 mostra o resultado dos 15 (quinze) países que mais publicam sobre o tema. Nota-se que a China é o país que mais produz conhecimento científico sobre funcionalização de nanossílica, com 92 publicações, o que representa aproximadamente 32% de toda a publicação científica nos últimos 10 anos, com um total de 92 artigos publicados. Iran, Índia, Estados Unidos, Arábia Saudita, Brasil e Espanha aparecem na sequência, como os países que mais publicam sobre o tema. O Brasil ocupa o sexto lugar em publicações científicas sobre funcionalização de nanossílica, mostrando que ainda há muito o que se pesquisar sobre o tema.

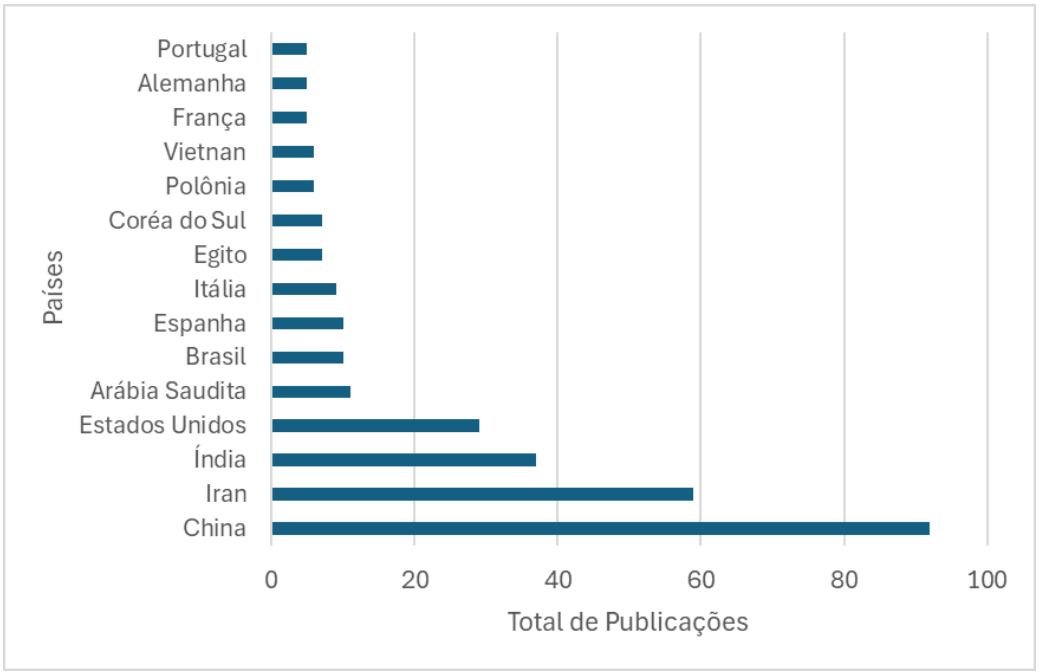


Figura 3 – Total de publicações por país

3.3 Área de pesquisa com maior número de publicações

Analisando a Figura 4 é possível identificar as áreas de pesquisa que mais publicam artigos sobre Funcionalização de Nanossílica. Nota-se que a área de Química é a que mais produz conhecimento científico sobre o tema, seguida da área de Ciência dos Materiais e Ciência dos Polímeros. A área de Engenharia aparece em quarto lugar com metade do número de artigos publicados em relação a área de Química, o que mostra que ainda há muito o que pesquisar sobre a utilização de nanossílica funcionalizada no campo da engenharia.

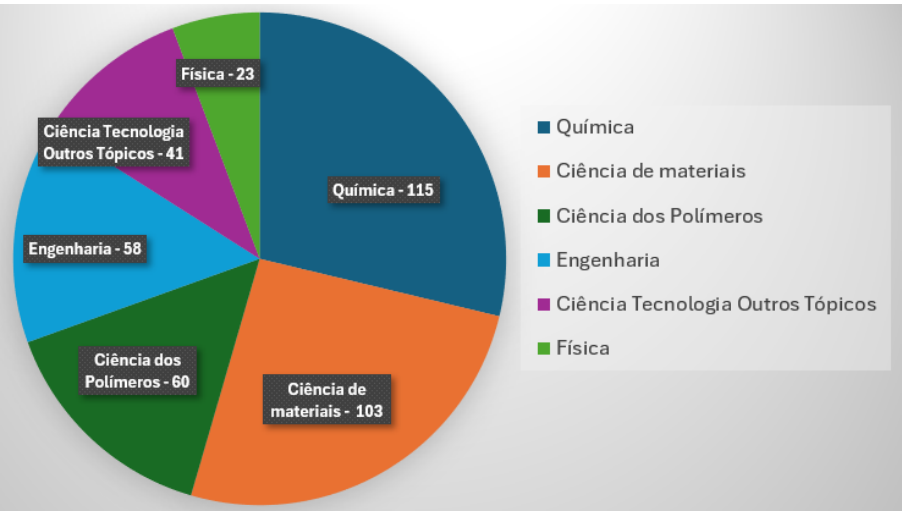


Figura 4 – Áreas de Pesquisa

3.4 Análise das Redes Bibliométricas e Sociométricas

Para realizar uma análise de redes bibliométrica e sociométricas, utilizou-se a ferramenta VOSviewer versão 1.6.20, desenvolvida na Universidade de Leiden (Holanda), que fornece uma interface para visualização dessas análises. De acordo com Van Eck *et al* (2014) esta ferramenta utiliza um método de visualização baseado na distância entre os nós da rede analisada, onde a distância entre dois nós indica aproximadamente a intensidade da relação entre eles.

As análises no software foram realizadas quanto a relação das publicações entre autores. Os parâmetros escolhidos para realizar esta análise foi o acoplamento bibliográfico para analisar a relação entre as publicações dos autores, uma vez que este parâmetro utiliza o número de referências compartilhadas como medida de similaridade entre elas.

Na Figura 5, cada nó representa um autor, e nós com a mesma cor representam colaboração no desenvolvimento de trabalhos. O nível de intensidade do volume de colaboração entre os autores é representado pela distância entre os nós e quanto mais próximos estiverem, mais forte será o vínculo em termos de coautoria. O grupo com mais relevância inclui os autores li, xiaohong e zhang, zhijin que fazem parte do cluster 1. Vale ressaltar o cluster 2 (verde) composto por pesquisadores que fazem parte grupo de pesquisa “Pesquisa e Inovação em Materiais Cimentícios” da Universidade de Brasília - UnB que realizam pesquisas sobre o assunto. Mesmo que o número de documentos ainda seja

relativamente pequeno, é possível notar certa interação entre os diversos autores no desenvolvimento das pesquisas.

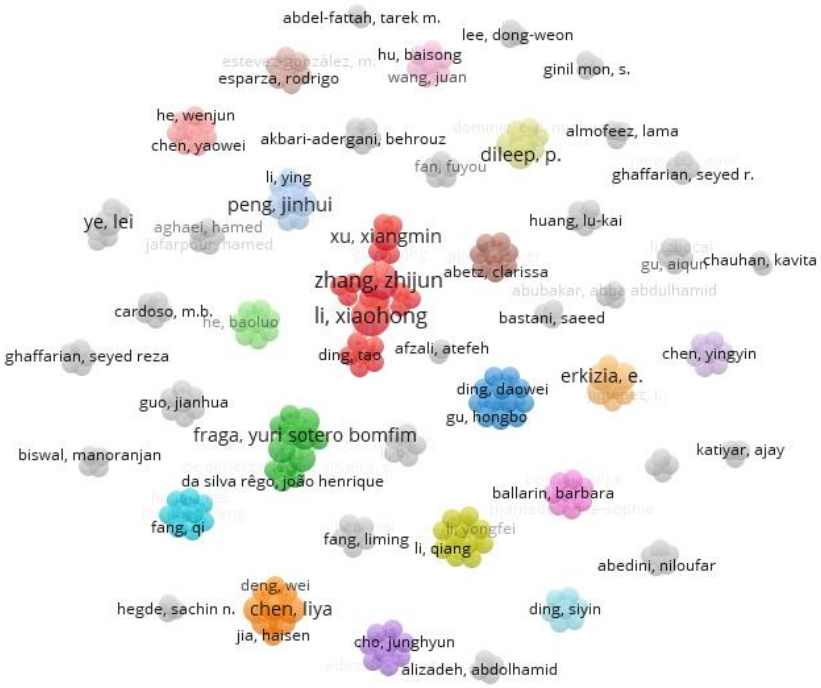


Figura 5 – Análise da rede de autores

3.5 Análise dos artigos pelo critério de exclusão

A partir da leitura da íntegra dos artigos selecionados pelo critério de exclusão, observou-se que dos 287 (duzentos e oitenta e sete) artigos que tratavam de funcionalização de nanossílica, apenas 12 (doze) tratam da utilização de NSF em materiais cimentícios e desses 12 (doze) artigos, apenas 7 (sete) utilizaram como agente funcionalizador o APTES. Interessante observar que dos 7 (sete artigos) que tratam de utilização de NSF com APTES para utilização em materiais cimentícios, 4 (quarto) são artigos de pesquisadores Brasileiros, 2 (dois) artigos são de pesquisadores espanhõis e 1 (um) artigo é de pesquisador Chinês. Estes dados podem ser vistos no Quadro 1.

Vale ressaltar que dos 4 (quatro) artigos brasileiros publicados sobre o tema, 3 (três) são fruto de pesquisas realizadas pelo grupo de pesquisa “Pesquisa e Inovação em Materiais Cimentícios” da Universidade de Brasília - UnB pela equipe do projeto de pesquisa intitulado “Microestrutura de pastas de cimento Portland com incorporação de NS funcionalizada com grupos amina”.

Quadro 1 – Análise dos artigos selecionados pelo critério de exclusão

Item	Título do Artigo	Autores	Ano de Publicação	País	Agente Funcionalizador
1	Exploring the potential of siloxane surface modified nano-SiO2 to improve the Portland cement pastes hydration properties	Collodetti, G; Gleize, PJP; Monteiro, PJM	2014	Brasil	N-(2-aminoetil)-3-aminopropil-trimetoxissilano (AAS) e (3-glicidoxipropil)-trimetoxissilano (GS)
2	Characterisation of cement pastes with innovative self-healing system based in epoxy-amine adhesive	Perez, G; Gaitero, JJ; Erkizia, E; Jimenez, I; Guerrero, A	2015	Espanha	amina
3	Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete	Perez, G; Erkizia, E; Gaitero, JJ; Kaltzakorta, I; Jiménez, I; Guerrero, A	2015	Espanha	3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
4	Effect of addition of silica- and amine functionalized silica-nanoparticles on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel	Monasterio, M; Gaitero, JJ; Erkizia, E; Bustos, AMG; Miccio, LA; Dolado, JS; Cerveny, S	2015	Espanha	tetraetoxissilano e 3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
5	The effects of nanoSiO2 on the properties of fresh and hardened cement-based materials through its dispersion with silica fume	Cai, YM; Hou, PK; Cheng, X; Du, P; Ye, ZM	2017	China	3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
6	Effect of amine functionalized nanosilica on the cement hydration and on the physical-mechanical properties of Portland cement pastes	Vasconcellos, JS; Martins, GLO; Oliveira, GDR; Liao, LM; Rêgo, JHD; Sartoratto, PPC	2020	Brasil	3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
7	Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica	Fang, Y; Wang, JL; Ma, HB; Wang, L; Qian, X; Qiao, PZ	2021	Estados Unidos	ácido tânico
8	On the properties of nanosilicate-based filled dental adhesives: Synthesis, characterization, and optimized formulation	Solhi L.; Atai M.; Nodehi A.; Imani M.	2021	Iran	poli(ácido acrílico)
9	Nanosilica functionalized to switch from dormant to active for gas migration mitigation in Portland cement	Boul, PJ; Shanmugam, S; Johnson, KD	2022	Estados Unidos	maltodextrina
10	Hydration, mechanical performance and porosity of Portland cement pastes with functionalized nanosilica with APTES	Vasconcellos, JS; Fraga, YSB; Rego, JHD; Sartoratto, PPEC; Rojas, MF	2023	Brasil	3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
11	Analysis of the Microstructure and Porosity of Cement Pastes with Functionalized Nanosilica with Different Contents of Aminosilane	Martins, GLO; Fraga, YSB; de Paula, A; Rêgo, JHD; Terrades, AM; Rojas, MF	2023	Brasil	3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)
12	Comparative analysis of the synergistic effects of hybrid nanomaterial reinforcement in cementitious Composites: A perspective for pore refinement and thermal resistance	Suh, H; Kim, G; Cho, S; Li, P; Son, DH; Koo, D; Lim, J; Choi, CS; Seok, S; Bae, S	2023	Coreia do Sul	Óxido de grafeno

Alguns trabalhos importantes sobre funcionalização de NS para aplicação em materiais cimentícios não aparecem no Quadro 1, devido ao critério de busca adotado e das condições de contorno selecionadas. Porém, por se tratar de trabalhos importantes, achou-se por bem inserí-lo neste artigo, como demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Análise dos artigos não selecionados pelas condições de contorno.

Item	Título do Artigo	Autores	Ano de Publicação	País	Agente Funcionalizador
1	Synthesis of nanoSiO2@PCE core-shell nanoparticles and its effect on cement hydration at early age	Gu, Yue; Ran, Qianping; Shu, Xin; Yu, Cheng; Chang, Honglei; Liu, Jiaping.	2016	China	policarboxilato
2	Characterizing cement paste containing SRA modified nanoSiO2 and evaluating its strength development and shrinkage behavior	Gu, Yue; Wei, Zhenhua; Ran, Qianping; Shu, Xin; Lv, Kai; Liu, Jiaping.	2017	China	aditivo redutor de retração
3	Effects and mechanisms of surface-treatment of cementitious materials with nanoSiO2@PCE core-shell nanoparticles	Gu, Yue; Ran, Qianping; She, Wei; Shu, Xin; Liu, Jiaping.	2018	China	policarboxilato
4	Synthesis of nanoSiO2@graphene-oxide core-shell nanoparticles and its influence on mechanical properties of cementitious materials	Gu, Yue; Xia, Kailun; Wei, Zhenhua; Jiang, Linhua; She, Wei; Lyu, Kai.	2020	China	óxido de grafeno
5	Effects of Modified Nano-SiO2 Particles on Properties of High-Performance Cement-Based Composites	Rong, Zhidan; Zhao, Mingyu; Wang, Yali.	2020	China	silano (KH550)
6	Effects of functionalized nanosilica with low aminosilane content on the mechanical properties and microstructure of cementitious materials	Paula, Andréia de; Fraga, Yuri Sotero Bomfim; Rêgo, João Henrique da Silva; Serafim, Maria José de Souza.	2023	Brasil	3-aminopropiltrietoxis silano (APTES)

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A produção científica sobre funcionalização de NS vem crescendo nos últimos anos, tendo alcançado um total de 42 publicações em 2019. A média de publicações 2020 até março de 2004 é de 23,2 artigos, mostrando o crecente interresse sobre o tema;

- A China é o país que mais publica artigos sobre o tema, com aproximadamente 32% de toda publicação nos últimos 10 anos, seguida do Iran, Índia, Estados Unidos, Arábia Saudita, Brasil e Espanha.

- Com relação ao número de artigos publicados por autor, nota-se que as publicações científicas sobre o tema funcionalização de NS está pulverizado entre vários autores, sendo o grupo com mais relevância o dos autores Li, Xiaohong e Zhang, Zhijin. Foi possível notar certa interação entre os diversos autores no desenvolvimento das pesquisas;

- Através da análise dos artigos pelo critério de exclusão, observou-se que dos 287 artigos previamente selecionados, apenas 12 (doze) tratam efetivamente do processo de funcionalização da nanossílica para utilização em material cimentício e desses 12 artigos, apenas 7 (sete) utilizam como agente funcionalizador o APTES, mostrando que ainda há muito campo de pesquisa neste tema;

- Os trabalhos publicados sobre funcionalização de NS com APTES mostram que há uma melhora na dispersibilidade, na resistência à compressão em idades posteriores, um aumento do período de indução, formação do C-S-H adicional, aumento no comprimento das cadeias de silicato, alteração na microestrutura do gel C–S–H, retardo da hidratação do cimento, redução na demanda por aditivo, melhora na trabalhabilidade e redução da porosidade.

Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura buscando identificar publicações sobre NSF com APTES. Pôde-se notar, pelos resultados encontrados, que o tema ainda é pouco estudado, mas vem recebendo atenção de pesquisadores brasileiros e também de outros países. Dessa forma, justifica-se a necessidade da publicação do presente artigo, no sentido de direcionar e esclarecer pontos chaves na continuação de pesquisas relacionadas ao tema como identificar como a NSF atua na reologia dos materiais cimentícios e verificar o efeito do tamanho da partícula de NS na funcionalização com aminosilano.

REFERÊNCIAS

Andrade, D. Da S.; Rêgo, J. H. Da S.; Morais, P. C.; Lopes, A. N. De M.; Rojas, M. F. Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. Construction and Building Materials, v. 198, p. 445–455, 2019.

Bahmani, SH.; Farzadnia, N.; Asadi, A.; Huat, BBK. The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil. Construction and Building Materials, 118 (2016), pp. 294 - 306, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.075.

Balapour, Mohammad; Joshaghani, Alireza; Althoey, Fadi. Nano-SiO_2 contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. Construction and Building Materials, v. 181, p. 27–41, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266.

Chadegani, A. A. C., Salehi, H. *et al.* A Comparison between Two Main Academic Literatura Collections: Web of Science and Scopus Darabases. Asian social science, v. 9, 2013.

Collodetti, Giovana; Gleize, Philippe J. P.; Monteiro, Paulo J. M. Exploring the potential of siloxane surface modified nano-SiO_2 to improve the Portland cement pastes hydration properties. Construction and Building Materials, Volume 54, 2014, Pages 99-105, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.028.

Cui, Yanbin; Kundalwal, S. I.; Kumar, S. Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites. Carbon, Volume 98, 2016, Pages 313-333, ISSN 0008-6223, https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.018.

Dileep, P. *et al.* Functionalized Nanosilica for Vulcanization Efficiency and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites. 2021.

Durgun, Muhammed Yasin; Atahan, Hakan Nuri. Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO_2. Construction and Building Materials, Volume 142, 2017, Pages 431-443, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.098.

Fang, Yi; Wang, Jialai; Ma, Haibin; Wang, Liang; Qian, Xin; Qiao, Pizhong. Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica. Construction and Building Materials, Volume 312, 2021, 125467, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125467.

Feng, Pan; Chang, Honglei; Liu, Xin; Ye, Shaoxiong; Shu, Xin; Ran, Qianping. The significance of dispersion of nano-SiO_2 on early age hydration of cement pastes. Materials & Design, Volume 186, 2020, 108320, ISSN 0264-1275. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108320.

Fernández, J. M.; Duran, A.; Navarro-Blasco I.; Lanas, J.; Sirera, R.; Alvarez, J. I. Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. Cement and Concrete Research, Volume 43, 2013, Pages 12-24, ISSN 0008-8846. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.007.

Fraga, Yuri Sotero Bomfim; Rêgo, João Henrique Da Silva; Capuzzo, Valdirene Maria Silva; Andrade, Daniel Da Silva. Ultrasonication effect of silica fume and colloidal nanosilica on cement pastes. Revista Matéria, ISSN 1517-7076 artigos e-12847, 2020, V 25, nº4. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1147.

Fraga, Yuri Sotero Bomfim; Martins, Gabriel Lima Oliveira; João Henrique Da Silva. Influência da nanossílica funcionalizada com diferentes grupos funcionais nas propriedades de compósitos cimentícios: uma revisão. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, v. 10, n. 8, e27719817349, 2021 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409. http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17349.

Ganesh Rathod, N.; Moharana, N. C.; Parashar, SKS. Effect of nano-SiO_2 on physical and electrical properties of PPC cement using complex impedance spectroscopy. Mate. Hoje Proc., 5 (2018), pp. 193-199, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.071.

García-Macías, Enrique; D'Alessandro, Antonella; Castro-Triguero, Rafael; Pérez-Mira, Domingo; Ubertini, Filippo. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites, Composites Part B: Engineering, Volume 108, 2017, Pages 451-469, ISSN 1359-8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.025

Gu, Y., Ran, Q., She, W., & Liu, J. Modifying Cement Hydration with NS@PCE Core-Shell Nanoparticles. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(1), 1–13. 2017.

Gu, Yue; Wei, Zhenhua e*t al.* Characterizing cement paste containing SRA modified nano SiO_2 and evaluating its strength development and shrinkage behavior. Cement and Concrete Composites, v. 75, p. 30–37, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.001.

Gu, Yue *et al.* Effects and mechanisms of surface-treatment of cementitious materials with nano SiO_2@PCE core-shell nanoparticles. Construction and Building Materials, v. 166, p. 12–22, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.082.

Hou, Peng-Kun; Kawashima, Shiho; Wang Ke-Jin; Corr, David J.; Qian, Jue-Shi; Shah, Surendra P. Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash–cement mortar. Cement and Concrete Composites, Volume 35, Issue 1, 2013, Pages 12-22, ISSN 0958-9465. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.027.

Huang, Chunlong *et al.* Potential Effect of Surface Modified Nano-SiO_2 with PDDA on the Cement Paste Early Hydration. ChemistrySelect, v. 5, n. 11, p. 3159–3163, 2020.

Han B., Wang Y., Dong S. *et al.* Smart concretes and structures: A review. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015; 26(11):1303-1345. https://doi.org/10.1177/1045389X15586452.

Kim, Seong-Soo; Hooton. R. Doug; Cho, Tae-Jun; Lee, Jeong-Bae. 2014. Comparison of innovative nano fly ash with conventional fly ash and nano-silica. Jornal Canadense de Engenharia Civil. 41 (5): 396-402. https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0419.

Land, G.; Stephan, D. The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement. J. Mater. Sci., 47 (2012), pp. 1011-1017, 10.1007/s10853-011-5881-1.

Lim, Seungmin; Lee, Han Seung; Kawashima, Shiho. Pore structure refinement of cement paste incorporating nanosilica: Study with dual beam scanning electron microscopy/focused ion beam (SEM/FIB). Materials Characterization, v. 145, n. August, p. 323–328, 2018. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.045.

Madani H, Bagheri A., Parhizkar T. A reatividade pozolânica de hidrossóis de nanosílica monodispersos e sua influência nas características de hidratação do cimento Portland. Cem Concr Res. 2012; 42(12):1563–570.10.1016/j.cemconres.2012.09.004.

Makar, J.M.; Chan, G.W. Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes. J. Am. Ceram. Soc., 92 (2009), pp. 1303-1310, 10.1111/j.1551-2916.2009.03055.x.

Martins, G. L. O.; Fraga, Y. S. B.; Vasconcellos, J. S.; Rêgo, J. H. S. Synthesis and characterization of functionalized nanosilica for cementitious composites: review. Journal of Nanoparticle Research, v. 22, p. 1-10, 2020.

Martins, G. L. O. (2022). Microestrutura de pastas de cimento Portland contendo nanossílica funcionalizada com diferentes proporções de aminosilano. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-XXA/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189p.

Mendes, T. M.; Repette, W. L. Effect of nano-silica on Portland cement matrix. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 12 (06), Nov-Dec 2019. https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000600009.

Mohammed, A.; Sanjayan, J. G.; Duan, W.; Nazari, A. J. C. Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. Constr. Build. Mater., 84 (2015), pp. 341-347, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.083.

Monasterio, Manuel *et al.* Effect of addition of silica- and amine functionalized silica-nanoparticles on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. Journal of Colloid and Interface Science, v. 450, p. 109–118, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2015.02.066.

Pan, Z.; He, L.; Qiu, L.; Korayem, Ah.; Li, G.; Zhu, JW.; Collins, F.; Li, D.; Duan, WH.; Wang, MCJC. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. Cem. Concr. Compos., 58 (2015), pp. 140 - 147, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001.

Paula, Andréia de (2023). Efeito da Nanossílica Funcionalizada com Baixos Teores de Aminossilano nas propriedades mecânicas e na microestrutura dos materiais cimentícios. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-XXA/23, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.

Ren, Chunrong *et al*. Preparation and properties of nanosilica-doped polycarboxylate superplasticizer. Construction and Building Materials, v. 252, p. 119037, 2020: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119037.

Rong, Z.; Zhao, M.; Wang, Y. Effects of Modified Nano-SiO_2 Particles on Properties of High-Performance Cement-Based Composites. Materials 2020, 13, 646. https://doi.org/10.3390/ma13030646.

Senff, L.; Labrincha Ja, Ferreira VM, Hotza D. , Repette WL. Efeito da nano-sílica na reologia e propriedades frescas de pastas e argamassas cimentícias. Const Build Mater. 2009;23(7):2487–491.10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005.

Singh, L. P.; Karade, S. R.; Bhattacharyya, S. K.; Yousuf, M. M.; Ahalawat, S. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. Construction and Building Materials, v. 47, p. 1069-1077, 2013.

Sonebi, M.; García-Taengua, E.; Hossain, Kma.; Khatib, J.; Lachemi, M. Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer. Construir. Construir. Mate., 84 (2015), pp. 269 - 276, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.064.

Van Eck, N. J., Waltman, L., Visualizing bibliometric networks. Measuring scholarly impact: methods and practice, p. 285-320, 2014.

Vasconcellos, J. S.; Martins, G. L. O.; Almeida Ribeiro Oliveira, G. De; Lião, L. M.; Silva Rêgo, J. H. Da; Sartoratto, P. P. C. Effect of amine functionalized nanosilica on the cement hydration and on the physical-mechanical properties of Portland cement pastes. Journal of Nanoparticle Research, v. 22, n. 8, 2020.

Xu, Zhenhai; Zhou, Zonghui; Du, Peng; Cheng, Xin. Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate. Construction and Building Materials, Volume 125, 2016, Pages 1169-1177, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.003.

Yajun, Ji; Cahyadi, Jong Herman. Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 10, 2003, Pages 1543-1548, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00100-5.

Yang J., Deng S., Xu H., Zhao Y., Nie C., He Y. Investigation and practical application of silica nanoparticles composite underwater repairing materials Energies, v. 14. 202. 2021.

Zhao, Zhifang; Qi, Tianqi; Zhou, Wei; Hui, David; Xiao, Cong; Qi, Jieyi; Zheng, Zhihong; Zhao, Zhigang. A review on the properties, reinforcing effects, and commercialization of nanomaterials for cement-based materials. Nanotechnology Reviews 2020; 9: 303–322. https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0023.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DA NANOSSÍLICA FUNCIONALIZADA COM ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO NA RESISTÊNCIA E RETRAÇÃO AUTÓGENA DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Kleymer Henrique Pereira Silva[a], Yuri Sotero Bomfim Fraga[a], Andreia de Paula[a], Maria José de Souza Serafim[a], João Henrique da Silva Rêgo[a].

[a]Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, Prédio SG – 12, 1º andar, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, cep 70910-900, , kleymerhenriquepereirasilva@hotmail.com, yurisotero.engcivil@gmail.com, paula_adp@yahoo.com.br, mmariajo@unb.br, jhenriquerego@unb.br.

RESUMO

A nanossílica (NS) se enquadra como um material pozolânico que, quando utilizada como nano material cimentício suplementar (NMCS), proporciona alterações na microestrutura dos compósitos cimentícios, contribuindo para o aumento do desempenho mecânico e da durabilidade, principalmente nas idades iniciais. Porém, por apresentar elevada energia superficial potencial e alta capacidade de aglomeração, a NS pode gerar efeitos negativos quando aplicada em materiais cimentícios, como o aumento da retração autógena e redução do ganho de resistência à compressão em idades mais avançadas, quando comparado ao cimento de referência. Uma das alternativas para mitigar estes efeitos consiste na alteração química da superfície da NS, a partir da substituição dos grupos silanóis (OH) pelo enxerto de novas funções químicas de maior interesse, processo conhecido como funcionalização. Dentro dessa temática, este artigo tem por objetivo verificar o efeito da funcionalização da NS com aditivo redutor de retração (ARR) e sua aplicação em compósitos cimentícios. A metodologia desta pesquisa consiste na confecção de nanossílica funcionalizada com razão de massa de ARR/NSFA igual a 10%, denominada de NSFARR10. Para a investigação experimental, desenvolveu-se quatro diferentes argamassas, sendo uma argamassa produzida apenas com cimento Portland CP V-ARI e três argamassas substituindo 1% do cimento Portland por NS pura, NS funcionalizada com APTES (NSFA) e pela NSFArr10, objeto principal desta pesquisa. Para avaliação do suceso da funcionalização, foram realizados ensaios de DLS, Potencial Zeta e TGA nas nanossilicas utilizadas. As argamassas foram avaliadas quanto a retração autógena e a resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias de hidratação. Foi possível observar que a NSFArr10 promoveu a mitigação da retração autôgena, além de aumentar a resistência à compressão aos 28 dias em torno de 40% e 10% quando comparada as argamassas com cimento de referência e com a NS, respectivamente.

Palavras-chave: Retração autógena; Nanossílica funcionalizada; Resistência, Argamassas.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria cimentícia mundial, bem como os centros de pesquisas relacionados ao cimento Portland (CP) e seus derivados, tem buscado determinar novos meios para produção de materiais ecoeficientes que mitiguem as volumosas emissões de CO_2 e sejam tecnologicamente mais eficientes e de maior qualidade (Santos, 2018). Uma das alternativas para alcançar estes objetivos é a substituição parcial do cimento Portland por um material cimentício suplementar (MCS). Esta substituição possibilita uma redução na produção de cimento e consequentemente na emissão de CO_2.

Alguns dos principais tipos de MCS comumente empregadas como substituição parcial do cimento são os materiais pozolânicos, elementos silicoaluminosos com atividade cimentante relativamente baixa, porém capazes de reagir na presença de hidróxido de cálcio e, em temperatura ambiente, produzir um material com propriedades aglomerantes (Schmalz, 2018). Pesquisas recentes mostraram que entre os NMCS estudados, a NS mostra-se uma adição pozolânica muito benéfica devido a sua alta reatividade e elevado módulo de finura, sendo uma das principais nanopartículas (NPs) empregadas na produção de novos materiais (Najigivi *et al*., 2013; Du *et al*., 2014; Rashad, 2014; Reches, 2018; Liu *et al*., 2021; Vasconcellos, 2021; Xu *et al*., 2021; Fraga, 2023).

Apesar do crescente número de estudos relacionados a aglomeração da NS, os efeitos deste comportamento ainda podem ser considerados inconclusivos. Para reduzir os malefícios originados por esta aplicação foram propostas algumas soluções, entre elas a alteração química da superfície da NS para reduzir a sua aglomeração, denominada de funcionalização (Collodetti *et al*., 2014; Monasterio *et al*., 2015; Gu; *et al*., 2017; Gu *et al*., 2018; Vasconcellos, 2021; Yang *et al*., 2021; Martins, 2022; Fraga, 2023; De Paula, 2023).

A funcionalização da NS, ou silanização, é uma técnica que consiste na alteração química de sua superfície a partir da substituição dos grupos silanóis (OH^-) pelo enxerto de novas funções químicas de maior interesse. Esse processo facilita a adaptação do material conforme sua aplicação, melhorando a homogeneidade de dispersão e fortalecendo as ligações covalentes entre a NS e a matriz, reduzindo a aglomeração das nanopartículas. Os grupos amina, ou aminossilanos, carboxilas e os glicóis estão entre os grupos funcionais mais utilizados em processos de funcionalização da NS por possuir polaridade que possibilita uma maior dispersão em meios iônicos (como pastas de cimento Portland) que outros grupos orgânicos, sendo geralmente utilizado o reagente 3-aminopropiltrietoxisilano (APTES) (Collodetti, 2013).

Outra implicação motivada pela alta reatividade das nanopartículas de sílica é a formação superficial acelerada de silicato de cálcio hidrato (C-S-H) no clínquer, ocasionando um rápido ganho de resistência nas idades iniciais e prejudicando a hidratação completa do material. Além disso, o elevado consumo de aglomerante e a reduzida relação a/agl proporcionam o rápido refinamento dos poros capilares e, consequentemente, o aumento da tensão superficial nos meniscos destes, ocasionando o fenômeno conhecido como retração autógena (Chen *et al*., 2019; Gu *et al.*, 2017a). A aplicação de aditivos, como polímeros superplastificantes (SAP) e redutores de retração (ARR), é uma solução convencionalmente utilizada para minimizar os efeitos prejudiciais da NS quando aplicada a composição da matriz cimentícia (Rashad, 2018; Liu *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2020).

A funcionalização da NS melhora a conexão do material a outros aditivos químicos como o ARR, aumentando a afinidade entre eles (Gu *et al.*, 2018; Gu *et al.*, 2017). Desta forma, uma alternativa para aplicação do ARR é sua utilização na superfície da NS após a aplicação de uma solução com APTES, substituindo o grupo OH durante o processo, produzindo uma NS funcionalizada com ARR (NSFArr10). Considerando que a NS expande os efeitos da retração em produtos cimentícios de alto desempenho, a incorporação do ARR ajuda a mitigar esse efeito ao reduzir a intensidade da depressão nos meniscos dos capilares, melhorando o comportamento das pastas com adição de NS.

Buscando-se maior sustentabilidade e o desenvolvimento de material de alto desempenho, é importante a compreensão das características dos NS e de sua manipulação eficiente em escala nanométrica, de forma que ocorra uma sinergia entre a matriz cimentícia e a NS, possibilitando o aprimoramento das propriedades dos produtos à base de CP.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Nanossilica (NS)

O campo da nanotecnologia torna possível o desenvolvimento de materiais compostos de nanopartículas com dimensões em ordem menor que 100 nm, denominados de nanomateriais cimentícios suplementares (NMCS) (Guneyisi *et al.*, 2019). Os NMCS despontam como uma nova estratégia de confecção de produtos cimentícios ecologicamente mais eficientes, com propriedades mecânicas e durabilidade significativamente maiores (Barbhuiya *et al.*, 2020; Tawfik *et al.*, 2020).

Uma vasta gama de NMCS utilizados em projetos científicos pode ser encontrada na literatura. Ribeiro (2022) desenvolveu uma análise da utilização de nanotubos de carbono (NTC) para confecção de concretos, observando melhora nas propriedades mecânicas e diminuição da retração por secagem. Bonato (2014) investigou a adição de nano-TiO_2 em concretos com incorporação de fibras, os resultados indicaram um aumento de 17% na resistência. Por fim, Vasconcellos (2021) observou melhora significativa na microestrutura de pastas de cimento Portland com adição de NS em sua composição, sendo esta última mais comumente utilizada.

A NS é um material pozolânico caracterizado pelo reduzido tamanho, com diâmetro de partículas inferior a 100 nm e composta principalmente por partículas de sílica extremamente puras e amorfas. As NS são aditivos altamente eficientes para modificação de produtos cimentícios, mesmo em pequenas concentrações (<5%). As principais modificações são relacionadas à redução do tempo de pega, melhora da resistência e da durabilidade. Pesquisas atribuem essas alterações à reatividade única das nanopartículas, associadas ao seu pequeno tamanho e sua elevada área de superfície (Vasconcellos, 2021). A unidade básica de sílica (SiO_4) é constituída de 4 átomos de oxigênio que rodeiam um átomo de silício, construindo uma unidade tetraédrica com carga total possível igual a "-4" (Figura 1).

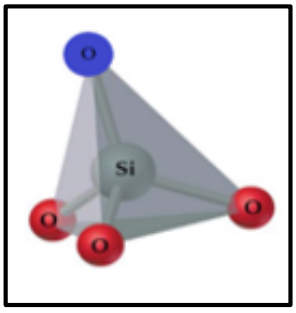


Figura 1 - Estrutura tetraédrica da partícula de sílica (Martins, 2022 - adaptado).

A NS desponta como um dos principais NMCS devido a sua propriedade pozolânica, capacidade do material de reagir com a portlandita (CH) produzida nas reações iniciais do cimento, formando uma quantidade extra de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) como produto (Equação 1). Essa característica permite a melhora nas propriedades mecânicas, visto que o C-S-H é a principal fase responsável pela aglomeração das partículas e a produção extra deste material contribui para a formação de uma microestrutura mais densa, reduzindo os espaços vazios (Senff *et al.*, 2010.; Martins, 2022).

$$C_3S + H \longrightarrow \text{C-S-H} + \text{Hidróxido de cálcio (CH)}$$

$$NS + CH + H \longrightarrow \text{C-S-H}_{adicional}$$

Equação 1 – Reação pozolânicas da NS

Além disso, a introdução de NS pode melhorar a gradação de partículas nas argamassas, preenchendo os espaços vazios e otimizando a sua estrutura porosa, condicionando uma melhora significativa na durabilidade do material (Barbhuiya *et al.*, 2020; Tawfik *et al.*, 2020). Esta característica física é denominada de efeito filler. Secundariamente, as partículas de NS finamente moídas possuem elevada área específica, com ampla presença de grupos silicosos reativos, oferecendo cargas à pasta de cimento que servem como ponto de nucleação para a formação de hidratos e aceleram a hidratação em idades precoces, possibilitando uma atividade pozolânica mais intensa.

2.2. Processo de funcionalização da NS

Mesmo sendo um material de grande interesse científico devido a possibilidade de uso nos mais diversos tipos de aplicações, a NS apresenta limitações quanto a sua utilização em materiais cimentícios. Estudos apontam que as NPs geralmente afetam negativamente a trabalhabilidade dos produtos de cimento, embora em alguns casos tenham ocorrido melhora na trabalhabilidade (Stein; Stevels, 1964). Devido a este fator, investigou-se que as nanopartículas de sílica se conglomeram facilmente, dificultando sua dispersão uniforme no concreto, devido às fortes forças de van der Waals (Sanchez, 2010; Aggarwal; Singh, 2015).

A tendência das partículas de NS de se aglomerarem umas com as outras na matriz de cimento tem sido objeto de um estudo particular. Assumia-se comumente que a NS possuía alta dispersão na matriz cimentícia. No entanto, observou-se que este material se aglomera em microescala em produtos à base de CP, o estado de dispersão da NS afeta sua reatividade, destino e transporte. Mais notavelmente, à medida que a NS se aglomera, uma fração de sua área de superfície fica coberta e, portanto, indisponível para reação. Consequentemente, uma alternativa sugeria foi que as partículas de NS devem ser adequadamente dispersas antes da mistura com CP, agregados, aditivos e água, utilizando técnicas de processamento de mistura direta, mistura ultrassônica e mistura de cisalhamento (moinho de três rolos) (Martins *et al.*, 2020).

Por apresentar elevada energia superficial potencial, a NS pode gerar efeitos negativos devido à aglomeração das partículas, como prejuízo na trabalhabilidade e reologia dos produtos cimentícios. A resistência à compressão também pode ser comprometida devido à aceleração das reações de hidratação iniciais promovida pela NS, que pode formar uma camada de C-S-H na superfície do clínquer, prejudicando a hidratação em idades mais avançadas (Ren *et al.*, 2020; Vasconcellos *et al.*, 2021).

A funcionalização é uma abordagem que altera a superfície das nanopartículas através de um procedimento químico que causa o enxerto de grupos funcionais mais adequados a determinado objetivo, minimizando limitações características destes materiais. Os processos de funcionalização da NS apresentam grande variação na literatura, tanto em relação às condições de preparo quanto aos agentes funcionalizadores e solventes empregados na mistura. Um desses exemplos é a funcionalização da NS com o uso combinado de APTES e ARR, originando a nanossílica funcionalizada com ARR (NSFArr) (Gu *et al.*, 2017b; Fraga, 2023).

Fraga (2023) realizou a produção da NSFArr em duas etapas. A primeira etapa de funcionalização ocorreu com a aplicação do 3-aminopropiltrietoxissilano (APTES) junto a uma quantidade de diclorometano, que é posteriormente retirado da solução, originando a NSFA. O APTES é um dos agentes mais aplicados em processos de funcionalização da NS por possuir polaridade que possibilita uma maior dispersão em meios iônico, reduzindo a quantidade de grupos OH livres para reação pozolânica. A segunda etapa do processo baseia-se na funcionalização da NSFA com aplicação do ARR, originando a NSFArr. Como o ARR possui muitos grupos carboxilas, ele é carregado negativamente e

pode ser atraído para a superfície da NSFA que é carregada positivamente, funcionalizando a NSFA por forças eletrostáticas (Gu *et al.*, 2017).

A Figura 2 apresenta as duas etapas do processo de produção da NSFArr realizada por Fraga (2023).

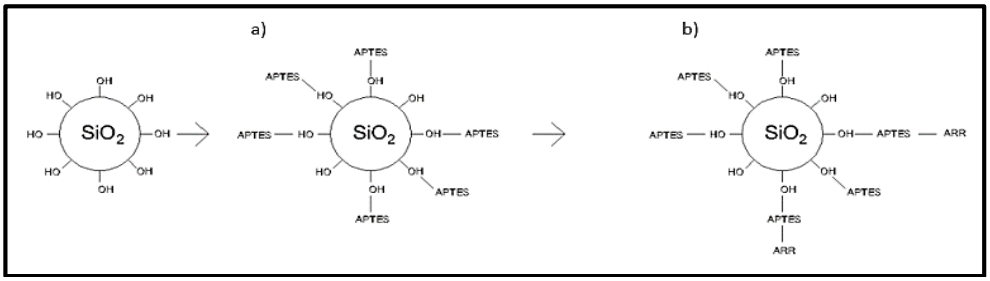


Figura 2 - Processo a) com saturação de APTES na primeira etapa e b) com saturação de ARR na segunda etapa de funcionalização (Adaptada de Fraga, 2023)

Na primeira etapa (a), ocorreu a saturação dos grupos OH da NS. Devido ao impedimento estérico, alguns grupos de hidroxila não foram ligados aos grupos funcionais de APTES. Na segunda etapa (b), ocorreu a saturação dos grupos APTES com os grupos funcionais de ARR. Alguns grupos de APTES ficaram livres devido ao impedimento estérico. Porém, há uma grande quantidade de ARR funcionalizado na superfície da NSFArr (Fraga, 2023).

3 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

3.1 FUNCIONALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA NSFARR10

O processo de produção da NSFArr10 consistiu na funcionalização preliminar da NS com APTES, e, posteriormente, realizou-se uma nova funcionalização da NSF com o ARR, formando a NSFArr10. A funcionalização da superfície da NS ocorre por hidrólise/condensação com o uso do APTES, que reduz a quantidade de OH livre na superfície do material, formando a NSFA. Após essa etapa, a NSFA é funcionalizada com ARR força eletrostática em solução aquosa.

Para produção da NSFA, preparou-se uma solução com 60 mL de NS, 4 mL APTES e 100 mL diclorometano em um balão de fundo redondo. O sistema foi submetido à agitação constante de um agitado magnético a 1500 rpm, por 24 horas. Após o fim do tempo de agitação, a mistura foi transferida para um funil de separação para separar o diclorometano da fase contendo a NSFA, que foi submetida a ultrassonicação para retardar a aglomeração das partículas. A produção da NSFArr constitui-se da acoplagem do ARR na superfície da NSFA, também submetido a agitação constante de 900 rpm, por 2 horas, conforme descrito na Figura 3.

Adicionar 100 ml de diclorometano, 60 ml de NS e 4 ml de APTES em um balão de fundo redondo acoplado a um agitador metálico.	Ligar o agitador magnético acoplado ao balão a 900 rpm na temperatura ambiente por 24 horas	Transferir a mistura para um funil de separação e submeter o sistema bifásico à sonicação por 10 minutos, formando a NSFA.	Incluir o Aditivo redutor de retração, gota a gota, sob agitação constante com a velocidade de 900 rpm por 2 horas, formando a NSFArr.

Figura 3 – Fluxograma do processo de funcionalização da NSFArr10 (Fraga, 2023).

A caracterização do material funcionalizado foi realizada utilizando técnicas de análise que possibilitam a correta compreensão da influência dos diferentes teores de funcionalização no processo de produção e nas propriedades da NSFArr10. As técnicas utilizadas foram o Dynamic Light Scattering (DLS) e o Potencial Zeta, utilizando equipamento Zetasizer Nano ZS90 da Malvern, além da Análise Termogravimétrica (ATG) com a utilização do analisador térmico simultâneo Netzsch STA 449 F3 Nevio.

3.2 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Ao todo, foram desenvolvidos quatro traços diferentes de argamassa, conforme observado no quadro 1. A mistura das argamassas foi realizada em um misturador planetário e seguiu os procedimentos descritos na literatura (Santos, 2018; Martins, 2022). Inicialmente, foram adicionados os componentes secos (cimento e areia nas quatro frações granulométricas) em uma cuba de aço inox com capacidade para 5 litros, sendo realizada a mistura em velocidade baixa (140 rpm em torno do eixo) por 4 minutos. Em seguida, sem parar o processo de mistura, foi adicionada a água com o aditivo superplastificante pré-dissolvido e as nanossílicas correspondentes, durante 1 minuto. Após a adição da água, foi realizada a mistura por 3 minutos na velocidade alta (285 rpm em torno do eixo). Depois, o misturador planetário foi desligado por 1 minuto, sendo realizada a raspagem do material aderido nas paredes da cuba. Por fim, os materiais foram misturados por mais 5 minutos na velocidade alta. Após o término da mistura, foi realizado o ensaio da mesa de consistência para verificar o espalhamento de acordo com o procedimento descrito no Anexo A da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Quadro 1 – Quantitativo de materiais para a moldagem das argamassas

Argamassa	**Materiais**							
	Cimento (g)	Água (g)	Areia (g)(x4)	NS (g)	NSFA (g)	NSFArr10 (g)	SP	
							(g)	(%)
M-REF	700,00	243,58	334,85	0,00	0,00	0,00	1,96	0,28
M-NS	693,00	224,65	334,85	23,33	0,00	0,00	5,54	0,80
M-NSFA	693,00	202,68	334,85	0,00	45,11	0,00	4,85	0,70
M-NSFArr10	693,00	198,79	334,85	0,00	0,00	49,65	4,85	0,70

Para a verificação da resistência a compressão, foram realizados ensaios de rompimento dos exemplares aos 2, 7 e 28 dias de hidratação, em conformidade com a EN 197-1 (European Committee For Standardization, 2011), com adaptações. Desenvolveram-se quatro corpos de prova de cada traço, para cada idade avaliada, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Para execução do ensaio de retração autógena, foram moldados corpos de prova prismáticos de argamassa, de 75x75x285mm, sempre retirados da mesma betonada, em formas metálicas. Foram moldados dois corpos de prova de argamassa por traço, sendo realizada a medição desde o tempo zero até os 14 dias de hidratação. As argamassas foram lançadas em duas camadas e adensadas com o auxílio de uma haste metálica, com cuidado para não mudar a posição dos pinos. Em seguida, elas foram vedadas com filme plástico e fita adesiva para evitar a evaporação da água. Os dados foram obtidos a partir de extensômetros acoplados aos pinos metálicos dos corpos de prova imediatamente após o tempo zero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização realizados tanto nas nanossílicas, para compreender a funcionalização do material, quanto nas argamassas produzidas, para se compreender o efeito da adição destes materiais em compósitos cimentícios.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOSSILICAS

4.1.1 DLS E ZETA

Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) é utilizado para determinar o raio hidrodinâmico das amostras analisadas, permitindo a verificação da NSFA quanto ao aumento das nanopartículas proporcionado pela ligação dos grupos funcionais na superfície da NS e variando de acordo com o teor de funcionalização (Liu *et al.*, 2021; Vasconcellos *et al.*, 2020). Por sua vez, o potencial Zeta é uma técnica que possibilita a verificação da propriedade de repulsão estérica entre as partículas de NSFArr10 e está associado à estabilidade da suspensão coloidal. Segundo a literatura, as suspensões coloidais que apresentam potencial Zeta próximo a 30 mV, positivo ou negativo, possuem alta estabilidade coloidal. No quadro 2 é possível observar os resultados obtidos no DLS e Potencial Zeta.

Quadro 2 – Resultados do DLS e Potencial Zeta

Amostra	D_H 1 (nm)	Área 1 (%)	D_H 2 (nm)	Área 2 (%)	D_H 3 (nm)	Área 3 (%)	$D_{H\ médio}$ (nm)	ξ (mV)
NS	21,74	100,0	0,00	0,0	0,00	0,0	17,85	-33,1
NSFA	26,04	95,1	0,00	0,0	3516,00	4,9	23,64	-29,4
NSFArr10	29,35	82,4	196,00	15,2	4371,00	2,3	31,83	-23,7

Através do quadro 2, é possível observar que a NS pura apresenta uma distribuição monomodal, com apenas um pico que representa o tamanho natural das partículas em torno de 20 nm. Percebe-se que, com a funcionalização da NS, ocorre o aumento do tamanho médio das partículas (20%) no pico D_H1, e indicando a absorção do APTES e ARE na superfície do material analisado. A NSFArr10 apresentou tamanhos de partículas maior que a NSFA, demonstrando que uma quantidade de ARR foi acoplada à superfície da nanossílica funcionalizada com APTES. Além disso, esta apresentou duas outras faixas de distribuição de partículas maiores e como a NS não apresentou partículas nesta faixa, sugere-se que a funcionalização cria uma pequena tendência de aglomeração das partículas.

A eficiência da funcionalização pode ser corroborada com os valores do Potencial Zeta, que está associado a estabilidade coloidal. A amostra NS apresentou Potencial Zeta negativo igual a -33,1 mV, indicando a existência de grupos silanóis na superfície, que podem favorecer as ligações com os grupos aminas. As amostras NSFA e NSFArr10 apresentaram Potencial Zeta inferior a nanossílica, apresentando estabilidade menor e, como visto nos resultados do DLS, uma leve tendência de aglomeração. Esses dados mostram o sucesso dos processos funcionalizantes empregados nesta pesquisa.

4.1.2 TGA

O TGA permitiu avaliar a funcionalização das amostras a partir da variação da perda de massa do material em função do aumento da temperatura em uma taxa programada, comparando-a com a

NS referência. A Figura 4 apresenta os valores da perda de massa entre 100°C e 1000°C. Os resultados indicaram que a perda de peso foi mais acentuada que nas NS Funcionalizadas (NSFA e NSFArr10), sendo um indicativo do sucesso do processo de funcionalização desenvolvido.

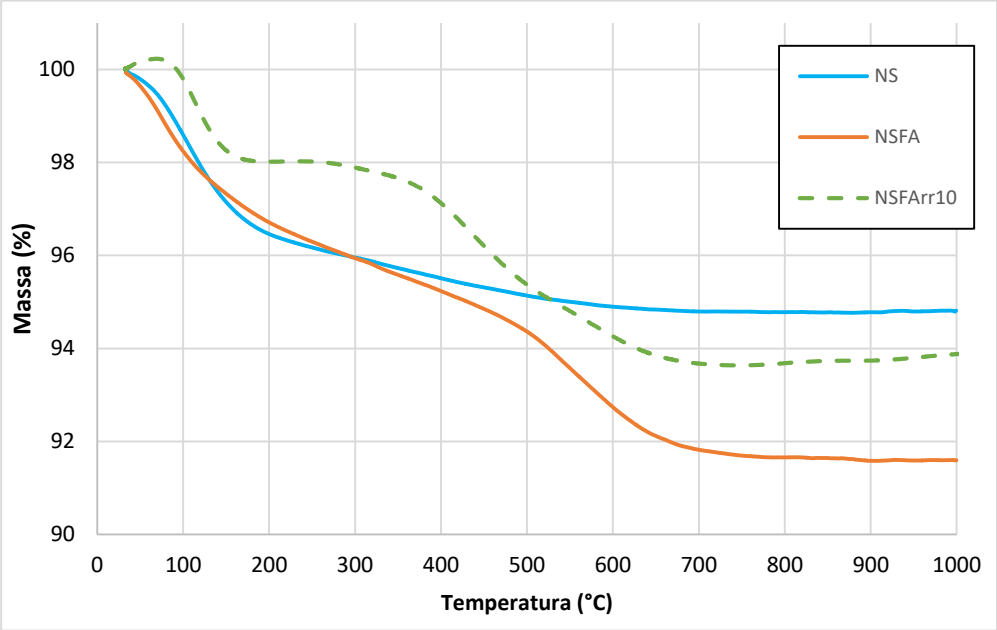


Figura 4 – Curvas termogravimétricas das nanossílicas

Algumas pesquisam pontuaram que a faixa de 350°C a 550°C corresponde, entre outros efeitos, a oxidação e pirólise do ARR na superfície das NSFArr10 (Gu et al, 2016; Sotero, 2023). Utilizou-se o mesmo raciocínio para desenvolver uma análise especifica relacionada a eficiência da acoplagem do ARR na superfície da NS a partir da reação funcionalizante desenvolvida. Nota-se, no Quadro 3, que a amostra NSFA resultou em uma perda de massa 2,8 vezes superior nessa faixa de temperatura que a NS não funcionalizada, mostrando a presença do APTES no material. Além disso, o aumento de 0,79 g de perda massa da NSFArr10 quando comparada a NSFA é fator representativo da quantidade de ARR existente no material. Estes dados ratificam os resultados obtidos de DLS e Potencial Zeta que sugerem a presença de uma quantidade de agente funcionalizante (APTES+ARR) adsorvida na superfície da NS após a funcionalização, indicando o sucesso deste processo.

Quadro 3 – Perda de massa das nanossílicas entre 350°C e 550°C

Idade	Perda de Massa
	350°C a 550°C
NS	0,72
NSFA	2,01
NSFArr10	2,86

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos para a resistência a compressão de todas as argamassas analisadas nas idades de 2, 7 e 28 dias podem ser observados no Quadro 4. Nota-se o aumento sistemático dos valores de resistências da argamassas com NSFArr10 em relação à referência após 7 dias de hidratação.

Quadro 4 – Resultado da resistência à compressão das argamassas (MPa)

Idade	Argamassas			
	REF	NS	NSFA	NSFArr10
2 dias	34,7	38,5	36,7	34,1
7 dias	48,3	51,7	52,6	55,4
28 dias	50,4	56,2	62,4	65,7

Aos 2 dias de hidratação, a argamassa M-NS apresentou maior desempenho mecânico que as demais argamassas. A segunda funcionalização da NSFA, com ARR, teve efeitos negativos na resistência nesta idade, com uma diferença de 7,6% da argamassa M-NSFA para M-NSFArr10. Aos 7 dias, a M-NSFArr10 obteve ganho mais significativo, obtendo valor semelhante a M-NS, e superior a M-REF e M-NSFA. Por fim, aos 28 dias de hidratação, a M-NSFArr10 apresentou o maior valor de resistência entre os exemplares analisados, sendo superior em 30% em relação a M-REF, 17% a M-NS e 5,3% a argamassa M-NSFA.

Estes resultados podem ser atribuídos a três aspectos principais. Primeiro, a NS apresenta elevada área superficial, funcionando como pontos de nucleação que aumentam a taxa de reação e a quantidade de produtos de hidratação formados nas idades iniciais de hidratação, acelerando a produção de hidratos e aumentando a resistência nessas idades. Porém, essa intensa hidratação inicial permite a rápida formação de C-S-H na superfície do clínquer, fator que pode prejudicar o completo ganho de resistência em idades mais avançadas. Com a modificação da superfície NS com moléculas de APTES/ARR, origina-se um efeito de envenenamento dos sítios de nucleação ao liberar íons que impedem o crescimento de hidratos neste local, mitigando o efeito acelerador inicial característico da NS.

Todavia, a funcionalização faz com que as partículas se dispersem melhor no fluido cimentício dos poros, isso gera mais locais de nucleação de C-S-H ao decorrer da hidratação e favorece a reação pozolânica da NS, produzindo uma argamassa hidratada de forma mais homogênea do que a argamassa com NS pura. Logo, apesar da argamassa com NSFArr10 apresentar resistência inferior do que a com NS nas primeiras idades, essa diferença é recupera aos 7 dias de hidratação e aos 28 dias a NSFArr10 apresenta os maiores valores de resistência à compressão.

4.2.2 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Através da Figura 5 é possível observar que a argamassa M-NS resultou em maior retração que a argamassa M-REF. Isso ocorre devido à alta reatividade da NS, que acelera as reações de hidratação e contribui para o refinamento da estrutura porosa. A argamassa M-NSFA foi a que resultou em maior retração autógena entre todas as argamassas pesquisadas. A principal hipótese para esse comportamento é que apesar do retardo das reações de hidratação, quando a reação é iniciada o seu desenvolvimento é bastante intenso. Isso pode ser comprovado na pesquisa de Martins (2022), que

observou que quanto maior o teor de APTES, maior foi o retardo das reações de hidratação e maior foi a retração.

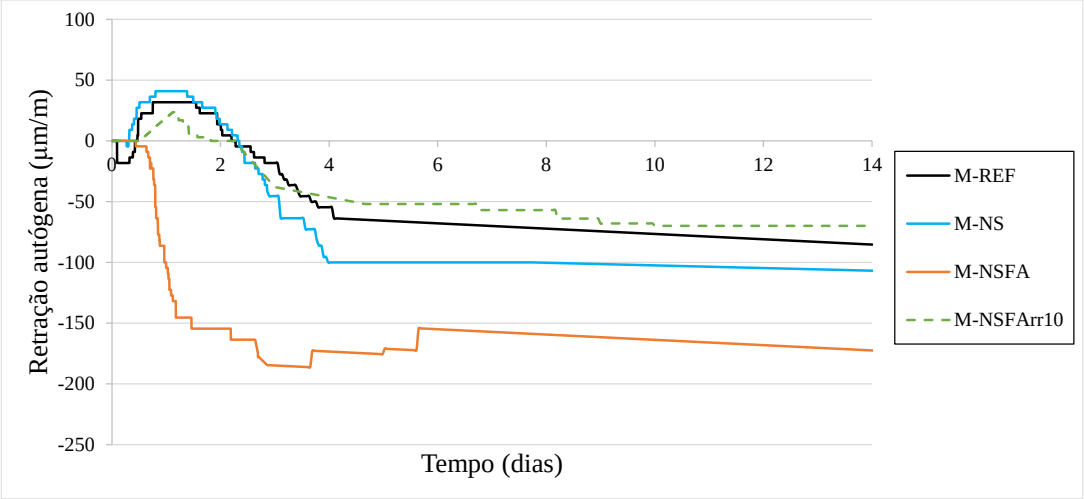


Figura 5 – Retração autógena das argamassas até os 14 dias de hidratação.

A utilização de NSFArr10 mitigou a retração autógena da argamassa em relação a M-NSFA. Dessa forma, a NSFArr10 pode otimizar as propriedades destes materiais em relação a NSFA, conforme constatado em estudos anteriores. Gu *et al.* (2017b) estudou a aplicação da NS funcionalizada com o mesmo teor de APTES que a NSFArr10, pode-se concluir que ambos os métodos de Funcionalização foram eficazes para mitigar a retração autógena em compósitos cimentícios e que a NSFArr10 apresentaria um melhor "custo-benefício" para mitigar a retração autógena.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo analisar o efeito da funcionalização da nanossílica (NS) com aditivo redutor de retração (ARR) na retração autógena e no desempenho mecânico de compósitos cimentícios. Dessa forma, é possível realizar as seguintes conclusões:

- A funcionalização da NS com APTES/ARR foi realizada com sucesso, sendo comprovada pelo aumento do diâmetro hidrodinâmico e pelo menor módulo do potencial Zeta após o processo. A termogravimetria mostrou que a adsorção do ARR na superfície pode ter sido inferior ao APTES, quando comparada a perda de massa da NSFA com a NSFArr10. Ainda sim, os resultados corroboraram com os dados do DLS, explicitando o sucesso da Funcionalização.
- A funcionalização da NS afeta negativamente o desempenho mecânico reduzindo a resistência a compressão nas idades inicias das argamassas devido ao retardo do período de indução na hidratação do material. Porém, com o avançar da hidratação, as argamassas com NSFA e NSFArr10 não só recuperaram este prejuízo, como apresentaram os maiores valores entre os exemplares analisados.
- A NSFA potencializou a ocorrência da retração autógena em comparação com a argamassa com NS. A adição de ARR na funcionalização possibilitou a mitigação deste comportamento não somente em comparação com a utilização da NS, como também em relação a argamassa contendo apenas cimento Portland.

Por fim, este artigo buscou investigar a eficiência da funcionalização da NS com ARR e seu efeito na retração e resistência à compressão quanto aplicada em compostos cimentícios. Desta forma, conclui-se que a aplicação da NSFArr10 em argamassas à base de cimentos Portland pode apresentar resultados mecânicos satisfatórios, mitigando a retração autógena e melhorando seu comportamento mecânico. Porém, apesar de promissor, para a aplicação da NSFArr10, ainda se recomenda pesquisas adicionais para melhor conhecimento e desenvolvimento desse material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2019.

BARBHUIYA, G. H.; MOIZ, M. A; HASAN, S D; ZAHEER, M. M. Effects of the nanosilica addition on cement concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, Part. 4, p. 560–566. 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143

BONATO, Marcelle. Photocatalytic mortars and concretes with addition of coconut and sisal fibers to reduce environmental impacts of pollutant gases. Cerâmica, v 6, p. 356, 2014. https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400012

CHEN, H.; XU, Y.; ZHANG, D.; HUANG, L.; ZHU, Y.; HUANG, L. The Influence of Nano SiO2 and Recycled Polypropylene Plastic Content on Physical, Mechanical, and Shrinkage Properties of Mortar. **Advances in Civil Engineering**, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2019/6960216

COLLODETTI, Giovana. **Desenvolvimento De Híbrido Sílica / Siloxano para uso como aditivo em pastas de cimento.** 2013. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

DE PAULA, Andreia. **Efeito da redução do teor de APTES na funcionalização da nanossilica nas propriedades** mecânicas **e na microestrutura dos materiais cimentícios.** 2023. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, 2023.

DU, Hongjian; DU, Suhuan; LIU, Xuemei. Durability performances of concrete with nano- silica. **Construction and** Building **Materials**, v. 73, p. 705–712, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014.

FRAGA, Yuri; MARTINS, Gabriel L.O.; RÊGO, J. H.S. Influence of functionalized nanosilica with different functional groups in the properties of cementitious composites: A review. **Research, Society and Development**, v. 2021, p. 1–11, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17349.

GU, Y.; RAN, Q.; SHE, W.; LIU, J. Modifying Cement Hydration with NS@PCE Core-Shell Nanoparticles. **Advances in** Materials **Science and Engineering**, n. 1, p. 1–13, 2017a. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2017/3823621.

GU, Yue *et al.* Effects and mechanisms of surface-treatment of cementitious materials with nanoSiO2@PCE core-shell nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 12–22, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.082.

LIU, Xia; HOU, Pengkun; CHEN, Heng. Effects of nanosilica on the hydration and hardening properties of slag cement. Construction **and Building Materials**, v. 282, p. 122705, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122705.

MARTINS, G. L. O.; FRAGA, Y. S. B.; VASCONCELLOS, J. S.; DA S. RÊGO, J. H. Synthesis and characterization of functionalized nanosilica for cementitious composites: 157review. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 22, n. 11, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11051-020-05063-7.

MONASTERIO, Manuel *et al.* Effect of addition of silica- and amine functionalized silica- nanoparticles on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 450, p. 109–118, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2015.02.066.

NAJIGIVI, Alireza *et al.* Investigating the effects of using different types of SiO2 nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 54, n. 1, p. 52–58, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.035.

RASHAD, Alaa M. A comprehensive overview about the effect of nano-SiO2 on some properties of traditional cementitious materials and alkali-activated fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 437–464, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.101.

RECHES, Yonathan. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 483–495, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214.

REN, Jingge; LAI, Yuanming; GAO, Jianqiang. Exploring the influence of SiO 2 and TiO 2 nanoparticles on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 277–285, 2018.

RIBEIRO, R. R.; SOUSA, M. I. C.; RÊGO, J. H. da S.; LAMEIRAS, R. de M. Innovative lowcost system for early age E-modulus monitoring of cement pastes: validation and application to nanosilica-added and limestone-calcined clay cements. Materials and Structures, v. 55, n. 13, 2022. https://doi.org/10.1617/s11527-021-01849-w

SANTOS, D. W. A. **Efeito de agente redutor de retração no comportamento reológico de pastas de concretos de ultra-alto desempeno**. 2018. 167 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SENFF, L.; LABRINCHA JA, FERREIRA VM, HOTZA D, REPETTE WL. Efeito da nanosílica na reologia e propriedades frescas de pastas e argamassas cimentícias. **Const Build Mater**. 2009;23(7):2487–491.10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005.

SOUSA, Ionara Pereira da Silva. Obtenção **de nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias**. . [S.l: s.n.], 2017.

TAWFIK, T.A.; METWALLY, K.A.; EL-BESHLAWY, S.A.; AL SAFFAR, D. M.; TAYEH, B. A.; HASSAN, H. S.. Exploitation of the nanowaste ceramic incorporated with nano silica to improve concrete properties, **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**. 2020. ISSN 1018-3639. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.06.007.

VASCONCELLOS, Julliana Simas *et al.* Effect **of amine functionalized nanosilica on the cement hydration and on the physical-mechanical properties of Portland cement pastes.** 2020.

YANG, J; DENG, S., XU, H.; ZHAO, Y.; NIE, C.; NE, Y. **Investigation and Practical Application of Silica Nanoparticles Composite Underwater Repairing Materials.** p. 1–10, 2021.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS BETUMINOSOS FOTOCATALÍTICOS PULVERIZADOS COM TiO_2: UMA ABORDAGEM DO BERÇO AO PORTÃO.

Élida Melo Margalho[a]; Igor Samuel Peixoto Gomes [b]; Iran Gomes da Rocha Segundo[b]; Verônica Castelo Branco[c]; Joel Ricardo Martins Oliveira[a]; Joaquim Alexandre S.A. Oliveira Carneiro[b]; Elisabete Fraga de Freitas[a]

[a] Departamento de Engenharia Civil, Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas, ARISE, Universidade do Minho, Campus Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, eng.elidamelo@gmail.com (É.M.M); joliveira@civil.uminho.pt (J.R.M.O); efreitas@civil.uminho (E.F.F).

[b] Centro de Física das Universidades do Minho e Porto (CF-UM-UP), Universidade do Minho, Rua Pegada ,4800-058, Guimarães, Portugal, igorspgomes@hotmail.com (I.S.P.G); iran@fisica.uminho.pt (I.G.R.S.); carneiro@fisica.uminho.pt (J.A.S.A.O.C.).

[c] Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, veronica@det.ufc.br (V.C.B).

RESUMO

A poluição atmosférica é um problema que afeta os centros urbanos. Uma abordagem inovadora para mitigar este problema é a utilização de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) em pavimentos betuminosos. A aplicação do TiO_2 confere ao pavimento capacidades fotocatalíticas, permitindo a degradação de poluentes atmosféricos na presença de luz solar. O método de revestimento por pulverização é considerado o mais eficiente para essa funcionalização. No entanto, os possíveis impactes ambientais dessa técnica são desconhecidos. Para cobrir esta lacuna, este estudo avaliou os impactes ambientais do uso do revestimento por pulverização, através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Foram considerados diferentes solventes (etanol, água e acetona) no processo de pulverização, com uma resina epóxi para fixação do TiO_2, e também o uso de uma emulsão betuminosa contendo TiO_2. Os resultados mostram que as funcionalizações aumentam o impacte ambiental do pavimento betuminoso. Considerando um indicador de pontuação única, o revestimento pulverizado com TiO_2 em acetona teve o maior impacte, com aumento de 12,11%, seguido da pulverização de TiO_2 em álcool, com 10,55%. Por outro lado, a pulverização de TiO_2 em água e a pulverização da emulsão betuminosa com TiO_2 apresentaram um impacte menor, ambos com um aumento de 5,34%.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Pavimentos Betuminosos Nanomodificados, Fotocatálise, Nanopartículas de TiO_2, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O controlo da poluição atmosférica representa um desafio crescente para a sociedade, especialmente nas áreas urbanas, onde a atividade humana é responsável pelo considerável aumento na emissão de poluentes como os óxidos de azoto (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) (EEA 2022b). Estes compostos, ao serem libertados para a atmosfera causam impactes significativos para o ambiente, podendo desencadear eventos prejudiciais em diferentes escalas, como formação de chuvas ácidas, intensificação do efeito estufa, e problemas de saúde pública (Dey e Mehta 2020). A indústria automobilística carrega uma parcela de responsabilidade neste cenário, uma vez que a produção de NO_x nos motores de combustão contribui expressivamente para ultrapassar os limites definidos nas normas de qualidade do ar nas áreas urbana (EEA 2022a). Apesar dos esforços para controlar as emissões individuais dos veículos, promovendo o uso de veículos elétricos e aplicando regulamentos mais rigorosos aos veículos a gasóleo, é ainda necessário explorar soluções inovadoras para combater a poluição atmosférica (Fan *et al.* 2018).

Diante desta problemática, a utilização de nanopartículas semicondutoras de dióxido de titânio (TiO_2) em pavimentos betuminosos tem recebido atenção nos últimos anos, uma vez que estas superfícies podem degradar os poluentes atmosféricos através de um processo fotocatalítico. Na fotocatálise, o TiO_2 atua como catalisador ativado pela luz solar e, por meio de reações químicas com água e ar, degrada poluentes. A incorporação desta nova capacidade ao pavimento pode ser alcançada por meio de diferentes técnicas de funcionalização, entre as quais, o revestimento por pulverização é apontado como a mais eficiente, demandando menores quantidades de nanopartículas. Nessa abordagem, uma solução contendo TiO_2 é aspergida sobre a superfície do pavimento, utilizando uma variedade de solventes, como álcool, acetona, e água, além da utilização de emulsões. Normalmente, o solvente escolhido possui elevada taxa de evaporação, o que garante que, no final do processo, apenas as nanopartículas de TiO_2 fiquem depositadas na superfície. Outros materiais como resinas epóxis, podem também ser aspergidos sobre o pavimento, antes da aplicação da solução de TiO_2, para que as nanopartículas tenham maior fixação sobre a superfície e, assim, a durabilidade do material aplicado seja garantida diante do processo de abrasão constante devido ao rolamento dos pneus (Rocha Segundo *et al.* 2021).

Na literatura, encontram-se numerosas investigações relacionadas com o estudo das técnicas de funcionalização de pavimentos fotocatalíticos. A maioria desses estudos, ao investigar o uso do revestimento por pulverização, concentra-se na eficiência desta técnica na degradação de poluentes. Por exemplo, Yan *et al.* (2022) analisaram o desempenho da purificação do ar de amostras de misturas betuminosas pulverizadas com uma solução aquosa contendo dióxido de titânio. No estudo de Rocha Segundo *et al.* (2022), foi avaliada a eficiência fotocatalítica de misturas betuminosas com utilização de resina epóxi e diferentes solventes. Os resultados mostraram que a adição de álcool como solvente proporcionou a melhor funcionalização, enquanto o uso de maiores quantidades de resina epóxi demonstraram reduzir a eficiência fotocatalítica. Bocci *et al.* (2016), por sua vez, pulverizaram uma emulsão betuminosa catiónica à base de água contendo TiO_2, a frio sobre um pavimento betuminoso. Os autores acompanharam a eficiência da despoluição do ar e a durabilidade do revestimento ao longo do tempo, medindo a degradação do NO através de testes de degradação de gás. No entanto, é importante destacar que o benefício exclusivamente relacionado à melhoria da qualidade do ar não garante uma avaliação ambiental completa da tecnologia. Neste sentido, os impactes ambientais associados à funcionalização do pavimento permanecem pouco discutidos (Hassan 2010).

No domínio dos pavimentos fotocatalíticos, uma oportunidade de investigação frequentemente mencionada em revisões da literatura é a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Ayar *et al.*

2024; Rocha Segundo *et al.* 2023). Esta metodologia pode ser útil para preencher as lacunas anteriormente referidas e proporcionar uma avaliação ambiental da tecnologia, considerando as fases associadas ao seu ciclo de vida. A ACV é normalizada pela norma ISO14040 (2006), que estabelece os princípios para a quantificação dos impactes ambientais de um produto ou serviço. Adicionalmente, esta pode ser complementada pela norma europeia EN 15804:2012+A2(2019), frequentemente usada para elaboração de Declarações Ambientais de Produtos (DAP), especialmente aplicável para a avaliação ambiental dos produtos de engenharia civil. Assim, no sentido de promover uma discussão ainda pouco desenvolvida na literatura de pavimentos fotocatalíticos, o objetivo deste trabalho é realizar uma ACV e quantificar os potenciais impactes ambientais relacionados com o uso do revestimento por pulverização. Para isto, diferentes tipos de revestimentos fotocatalíticos serão avaliados. O limite do sistema selecionado foi "do berço ao portão" com módulos adicionais, ou seja, até à fase de construção do pavimento, onde é realizado o processo de funcionalização.

2 METODOLOGIA

Para conduzir a ACV, foram seguidas as diretrizes estabelecidas pelas normas ISO14040 e EN 15804:2012+A2. Com base na norma ISO1440 foram delineados os princípios fundamentais para a realização da análise, compreendendo quatro etapas: i) definição do objetivo e âmbito, ii) elaboração do inventário do ciclo de vida, iii) avaliação dos impactes, e iv) interpretação dos resultados. Por sua vez, seguindo a norma EN 15804:2012+A2 foram especificados a fronteira do sistema e o método de avaliação a ser adotado para a análise.

2.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ÂMBITO

A metodologia de ACV proposta, tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental de diferentes materiais utilizados na técnica de revestimento por pulverização, a fim de incorporar capacidades fotocatalíticas ao pavimento betuminoso. Esta análise envolve a modelação de um trecho de pavimento convencional e do mesmo pavimento funcionalizado com TiO_2, para fins comparativos. No processo de funcionalização, serão avaliados quatro tipos de revestimento por pulverização: i) solução de TiO_2 dispersa em etanol, ii) solução de TiO_2 dispersa em acetona, iii) solução de TiO_2 em meio aquoso, e iv) uma emulsão betuminosa contendo TiO_2. Para as três primeiras soluções, será considerada a aplicação de uma resina epóxi diluída em acetato de butilo, no sentido de promover a fixação das partículas sobre a superfície do pavimento. A fronteira do sistema seguiu uma abordagem "do berço ao portão" com módulos adicionais (Figura 1 e 2), definida de acordo com a norma europeia EN 15804:2012+A2:2019. Assim, as fases de modelação incluem: A1 – extração e processamento de matérias-primas, A2 – transporte para a produção, A3 -produção, A4 - transporte para o local de construção, e A5 - construção do pavimento. A unidade funcional (UF) é definida por 1 km de uma estrada com duas vias de tráfego (7,0 m) cujo pavimento tem uma camada de desgaste com 4 cm de espessura. O processo de funcionalização ocorre durante a Fase A5, após a construção do pavimento convencional. A ACV foi efetuada utilizando o *software Simapro* e os dados da base de dados *Ecoinvent*. A informação em falta, como a quantidade de material utilizado para produzir a mistura betuminosa e preparar os revestimentos fotocatalíticos a serem pulverizados, foram supridas por dados laboratoriais. Outros dados relevantes para a modelação foram obtidos da literatura secundária e são explicados e referenciados na Secção 2.2.

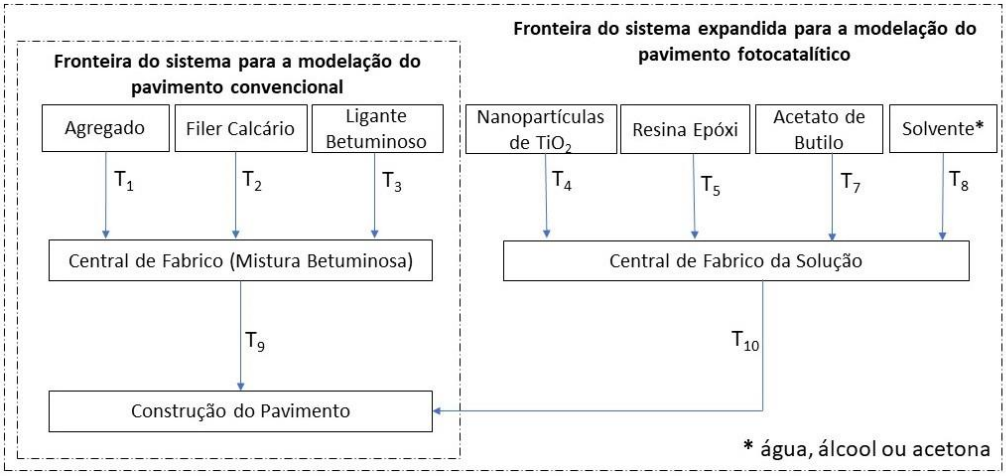


Figura 1 – Fronteira do sistema para as soluções de TiO_2 em água, álcool ou acetona

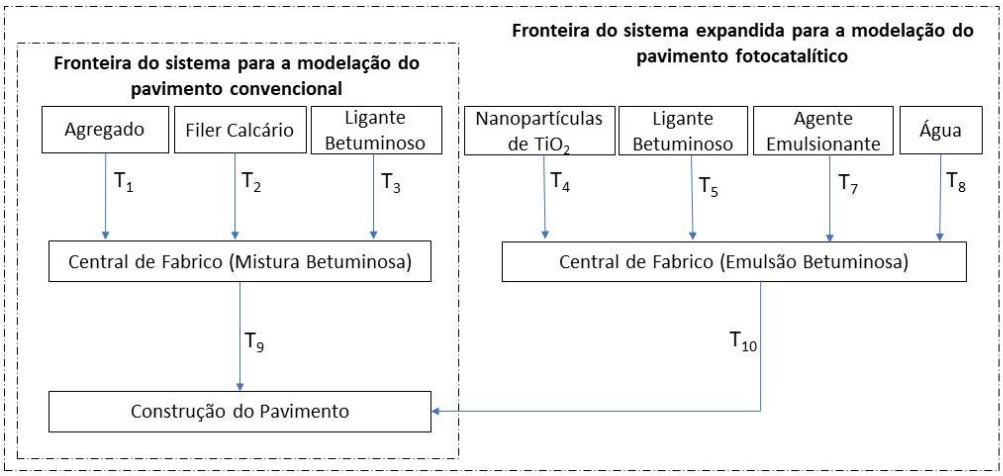


Figura 2 – Fronteira do sistema para emulsão betuminosa contendo TiO_2

2.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

2.2.1 Extração e processamento de matérias-primas (A1)

Esta fase da ACV refere-se à modelação dos componentes do inventário relativos às matérias-primas utilizadas na produção da mistura betuminosa e às matérias-primas utilizadas na produção dos revestimentos fotocatalíticos. Relativamente à mistura betuminosa, utilizou-se a formulação de uma mistura AC10, composta por 5,5% de ligante betuminoso, 4% de filer calcário, 31% de agregado de 0/4 mm e 65% de agregado de 4/10 mm. Todos os processos relacionados com a extração e transformação destes materiais estão disponíveis na base de dados *Ecoinvent*. No entanto, em relação ao ligante betuminoso, embora existam informações na base dados, optou-se por criar um novo processo utilizando informações da Eurobitume (2021), a Associação Europeia de Produtores de Betume. Para a produção dos revestimentos fotocatalíticos, as nanopartículas de TiO_2 foram modeladas utilizando dados do processo de síntese por pirólise de chama do estudo de Wu, Zhou e Hicks (2019), uma vez que não existe informação sobre esta produção na base de dados *Ecoinvent*. Além disso, a modelação da emulsão foi realizada com base num processo disponível, que representa uma emulsão a frio, conforme realizado por Bocci *et al.* (2016), e que já inclui algumas matérias-primas consideradas na fronteira do sistema, nomeadamente o ligante betuminoso, a água, o agente emulsionante, bem como os transportes associados a estes materiais (Ver Figura 2). No entanto, algumas adaptações foram

necessárias: em primeiro lugar, a inclusão das nanopartículas de TiO_2 juntamente como o seu transporte; e em segundo lugar, a modificação do ligante betuminoso considerando os dados da Eurobitume. Quanto aos demais materiais, como etanol, resina epóxi, acetato de butilo, acetona e água, foram utilizados processos já disponíveis na base de dados da *Ecoinvent*. Os pormenores relativos à quantidade de material e aos processos selecionados considerando a unidade funcional (UF) são apresentados no Quadro 1. O modelo do sistema "*Cut-off U*" foi utilizado para todos os processos.

Quadro 1 – Inventário de matérias-primas utilizadas para o pavimento convencional e fotocatalítico.

Matéria prima	Quantidade (t)	Processo
Agregados	602,02	"*Gravel, crushed {RoW}[1]| production*"
Filer calcário	25,08	"*Limestone, crushed, washed {RoW}| production*"
Ligante betuminoso	36,50	Eurobitume (2021)
Nanopartículas de TiO_2	0,014	Criado com base em *Wu, Zhou e Hicks* (2019)
Resina Epóxi	0,022	*"Epoxy resin, liquid {RER}[2]| production"*
Acetato de Butilo	0,09	*"Butyl acetate {RER}| production"*
Etanol	2,77	*"Ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation {RoW}| ethanol production from sugar beet molasses"*
Água destilada	3,49	*"Water, deionised {Europe without Switzerland} | water production, deionised"*
Acetona	2,74	*"Acetone (dimethylcetone)/EU-27[4]"*
Emulsão Betuminosa	0,35	*Modificado com base em "Bitumen adhesive compound, cold {RER}| production"*

{RoW}[1]: dados do resto do mundo; {RER}[2]: dados da europa; {*Europe without Switzerland*} [3]: dados da Europa sem a Suíça; EU-27[4]: dados do grupo de 27 países da Europa.

2.2.2 Transporte para a produção e construção (A2/A4)

Relativamente ao transporte, duas fases são delineadas: a fase A2- transporte para a produção, que abrange o transporte de todas as matérias-primas para o local de produção, seja para a produção da mistura betuminosa ou dos revestimentos fotocatalíticos; e a fase A4 - transporte para o local de construção, relacionada com o transporte da mistura betuminosa para o local de construção do pavimento e das soluções e emulsão fotocatalíticas a serem pulverizadas para a funcionalização. No transporte das matérias-primas, os pontos de origem são claramente identificados (Quadro 2) e foram determinados por meio de pesquisas de mercado em Portugal e junto de empresas que fornecem os materiais. Esses pontos de partida foram utilizados como base para calcular as distâncias percorridas. Entretanto, no caso das soluções contendo TiO_2, ainda não se conhece um local de produção específico, consequentemente, as distâncias relativas ao transporte das soluções de TiO_2 foram estabelecidas de maneira arbitrária em 30 km. O pavimento a ser construído foi definido com destino final em Guimarães, Portugal.

Quadro 2 – Distâncias assumidas para a modelação.

Fase	Material	Origem	Destino	Distância (km)
A2 - transporte para a produção	Agregados	Secil Britas S. A	Central de fabrico (mistura betuminosa)	73
	Filer calcário	Secil Britas S. A	Central de fabrico (mistura betuminosa)	73
	Ligante betuminoso	CEPSA - Portuguesa Petróleos, Ltda	Central de fabrico (mistura betuminosa)	65
	Nanopartículas de TiO_2	Quimidroga S. A	Central de fabrico da solução	591
	Nanopartículas de TiO_2 (emulsão)	Quimidroga S. A	Central de fabrico (emulsão betuminosa)	639
	Resina Epóxi	PMA- Resina epóxi	Central de fabrico da solução	283
	Acetato de Butilo	Sigma-Aldrich Química S.A.	Central de fabrico da solução	554
	Etanol	AGA-Álcool e Géneros Alimentares, S.A.	Central de fabrico da solução	356
	Acetona	Sigma-Aldrich Química S.A.	Central de fabrico da solução	554
A4 - transporte para o local de construção	Mistura betuminosa	Central de fabrico	Construção do Pavimento	12
	Solução de Resina Epóxi	Central de fabrico da solução	Construção do Pavimento	30
	Solução de TiO_2 em Álcool	Central de fabrico da solução	Construção do Pavimento	30
	Solução de TiO_2 em Água	Central de fabrico da solução	Construção do Pavimento	30
	Solução de TiO_2 em Acetona	Central de fabrico da solução	Construção do Pavimento	30
	Emulsão betuminosa com TiO_2	Central de fabrico	Construção do Pavimento	12

Todos os as distâncias de transportes foram modeladas utilizando o processo: "*Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER}| transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U".*

2.2.3 Produção (A3)

A fase de produção refere-se ao processo de produção da mistura betuminosa e ao processo de produção dos revestimentos fotocatalíticos. Na produção da mistura, considerou-se a utilização de uma central de mistura betuminosa convencional, operada com fuelóleo pesado. A energia necessária

para aquecer a mistura foi calculada em 247,96 MJ por tonelada, seguindo o método proposto por Santos *et al.* (2018) e modelada pelo processo "*Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland}| heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW | Cut-off, U*". Por outro lado, o consumo de eletricidade para operar a central de mistura betuminosa foi estimado em 6,1 kWh por tonelada, enquanto o tempo de operação da pá carregadora dentro da central foi de 0,0050 horas por tonelada, conforme dados fornecidos por Moins *et al.* (2023). Quanto à preparação dos revestimentos fotocatalíticos, a energia elétrica média requerida para homogeneizar as soluções de TiO_2 foi estimada em 0,006 kWh por litro de solução, calculada através do método descrito por Piccinno *et al.* (2016). O processo escolhido para eletricidade foi "*Electricity, medium voltage {PT}| market for | Cut-off, U*". Os revestimentos fotocatalíticos foram modelados considerando 4 g de TiO_2 por litro de solvente, exceto para a emulsão betuminosa, que incluiu as nanopartículas com concentração em massa de 5%, de acordo com Cao *et al.* (2019). Para o material de fixação, foi utilizada uma mistura de 0,25 gramas de resina epóxi diluída em acetato de butilo numa proporção de (1:3) em massa, conforme Segundo *et al.*(2022).

2.2.4 Construção do pavimento (A5)

Na fase de construção do pavimento, considerou-se na modelação a utilização de uma pavimentadora, um cilindro de pneus e um cilindro de rolos. Para a funcionalização do pavimento, foi considerado um camião de rega de emulsão betuminosa, que por sua vez é semelhante ao equipamento adotado para a pulverização da resina e das soluções de TiO_2. A produção das máquinas não foi considerada dentro dos limites. Para cada tipo de máquina foram utilizadas referências comerciais, e com base na potência, velocidade de funcionamento e largura máxima, foram definidas as horas de operação de cada máquina. Todas as máquinas associadas ao processo estão identificadas no Quadro 3, incluindo a pá carregadora utilizada no processo de movimentação de material na central betuminosa. Com potência acima de 70 kW, as máquinas foram modeladas utilizando o processo "*Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO}| machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | Cut-off, U*".

Quadro 3 – Parâmetros das máquinas e horas de funcionamento

Tipo de Máquina	Funcionamento (h)	Referência comercial
Pavimentadora	0,24	CR662RM BOMAG
Compactador: cilindro de pneus	3,51	CW16 11-WHEEL - Caterpillar
Compactador: cilindro de rolo	5,56	CB10 - Caterpillar
Pá carregadora	3,32	Volvo L50H
Camião de rega (resina + solução de TiO_2)	4,44	CCMG XLS603
Camião de rega (emulsão com TiO_2)	2,22	CCMG XLS603

2.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL

A avaliação dos impactes ambientais foi realizada através do método de avaliação delineado na norma EN 15804:2012+A2, que inclui as seguintes categorias de impactes: i) Alterações Climáticas (AC), ii) Depleção da Camada de Ozono (DCO), iii) Acidificação (ACD), iv) Eutrofização de Ecossistemas de Água Doce (EE-AD), v) Eutrofização de Ecossistemas Marinhos (EE-M), vi) Eutrofização de Ecossistemas da Terra (EE- T), vii) Formação Fotoquímica de Ozono (FFO), viii) Depleção dos Recursos Minerais e Metálicos (DR-MM), ix) Depleção dos Recursos Fósseis (DR-F) x) Uso de Água (UA), xi) Emissão de Matéria Particulada (EMP), xii) Radiação Ionizante, Saúde Humana (RIH), xiii) Ecotoxicidade (Água

Doce) (EC), xiv) Toxicidade Humana, Efeitos Cancerígenos (THC), xv) Toxicidade Humana, Efeitos Não Cancerígenos (THNC), xvi) Impactes Relacionados com o Uso do Solo/Qualidade do Solo (IUQ).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diferença entre os impactes da construção do pavimento betuminoso convencional e do pavimento fotocatalítico, considerando os diferentes revestimentos por pulverização, são mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados da avaliação de impacte do ciclo de vida dos pavimentos

Categoria de Impacte	Unidade	Pavimento convencional	Funcionalização (revestimentos por pulverização)			
			TiO_2 em etanol	TiO_2 em acetona	TiO_2 em água	Emulsão contendo TiO_2
AC	kg CO_2 eq.	3,43E+04	4,04E+04	4,16E+04	3,68E+04	3,65E+04
DCO	Kg CFC11 eq.	5,72E-03	6,29E-03	6,04E-03	6,02E-03	5,93E-03
ACD	mol H+ eq.	2,40E+02	2,77E+02	2,62E+02	2,51E+02	2,50E+02
EE-AD	kg P eq.	3,92E+00	5,04E+00	4,60E+00	4,60E+00	4,65E+00
EE-M	kg N eq.	3,92E+01	5,00E+01	4,45E+01	4,22E+01	4,19E+01
EE-T	mol N eq.	4,25E+02	5,47E+02	4,77E+02	4,51E+02	4,47E+02
FFO	kg NMVOC eq.	1,20E+02	1,34E+02	1,39E+02	1,29E+02	1,41E+02
DR-MM	kg Sb eq.	4,51E-02	6,23E-02	4,60E-02	4,56E-02	4,57E-02
DR-F	MJ	2,03E+06	2,12E+06	2,24E+06	2,08E+06	2,09E+06
UA	m3	1,05E+04	1,50E+04	1,27E+04	1,22E+04	1,20E+04
EMP	Incidência de doença	2,06E-03	2,33E-03	2,25E-03	2,15E-03	2,14E-03
RIH	kBq U235 eq.	1,38E+04	1,42E+04	1,43E+04	1,41E+04	1,42E+04
EC	CTUe	7,09E+05	8,05E+05	8,11E+05	7,38E+05	7,28E+05
THC	CTUh	1,19E-05	1,35E-05	1,43E-05	1,31E-05	1,31E-05
THNC	CTUh	2,63E-04	2,75E-04	3,01E-04	2,79E-04	2,78E-04
IUQ	Adim.	3,13E+05	3,53E+05	1,49E+05	3,17E+05	3,18E+05

Os resultados mostram variações de impacte em todas as categorias analisadas. Em comparação com o pavimento betuminoso convencional, as funcionalizações exibem, na sua maioria, um aumento do

impacte, com uma única exceção relacionada com a categoria de impacte do uso do solo/qualidade do solo (IUQ), em que o revestimento com a solução de TiO_2 dispersa em acetona compensou e reduziu o impacte de 3,13E+05 para 1,49E+05. Para uma análise visual, estes resultados foram normalizados, sendo cada um dividido pelo máximo impacte encontrado na mesma categoria. Essa normalização os posiciona numa escala entre 0 e 1 para facilitar a comparação das variações, conforme mostra a Figura 3.

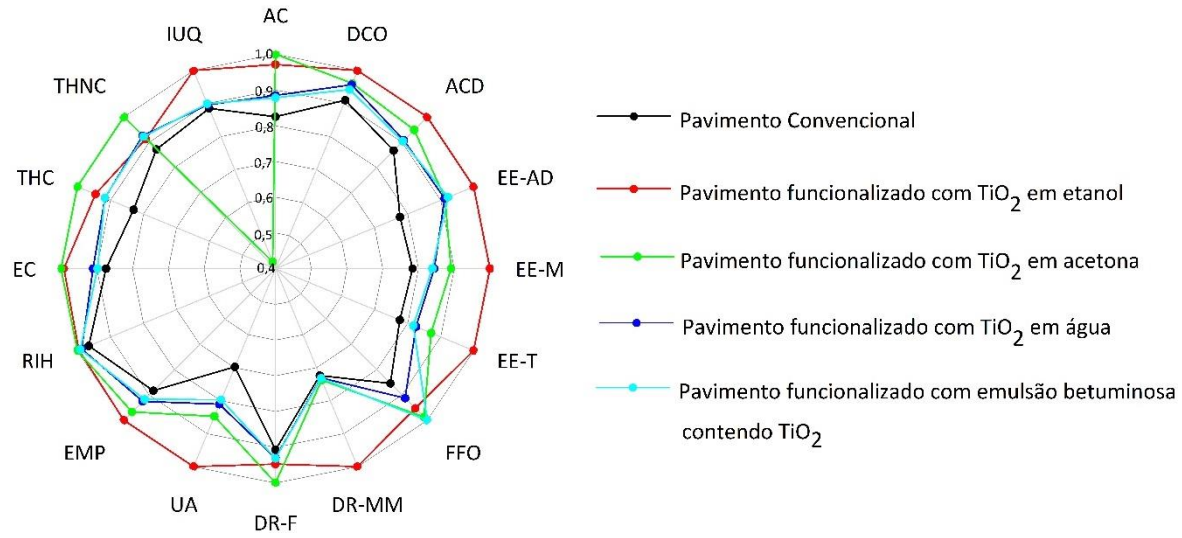


Figura 3 – Variação de impacte ambiental

Observa-se que o revestimento com TiO_2 disperso em água e a emulsão apresentam impactes muito semelhantes na maioria das categorias, com exceção da Formação Fotoquímica de Ozono (FFO), em que a emulsão betuminosa com TiO_2 apresentou um impacte ligeiramente superior, com uma diferença de 9,30% em relação ao revestimento com TiO_2 disperso em água. Além disso, ambos demonstram ser os revestimentos com as menores variações de impacte quando comparados aos pavimentos betuminosos convencionais. Por outro lado, os revestimentos com TiO_2 disperso em etanol e acetona mostram variações significativas entre as categorias, alternando frequentemente entre os revestimentos com os impactes mais elevados. Por exemplo, a utilização do revestimento com acetona demonstrou o impacte mais elevado em seis categorias: Alterações Climáticas (AC), Depleção dos Recursos Fósseis (DR-F), Radiação Ionizante, Saúde Humana (RIH), Ecotoxicidade (Água Doce) (EC), Toxicidade Humana, Efeitos Cancerígenos (THC), Toxicidade Humana, Efeitos Não Cancerígenos (THNC). Por sua vez, a utilização do revestimento com etanol apresentou o maior impacte em nove categorias: Depleção da Camada de Ozono (DCO), Acidificação (ACD), Eutrofização de Ecossistemas de Água Doce (EE-AD), Marinhos (EE-M), e da Terra (EE- T), Depleção dos Recursos Minerais e Metálicos (DR-MM), Uso da Água (UA), Emissão de Matéria Particulada (EMP) e Impactes Relacionados com o Uso do Solo/Qualidade do Solo (IUQ).

Dados esses resultados, a Figura 4 apresenta o impacte ambiental dos pavimentos em forma de pontuação única, obtido através do *Software Simapro*, o qual emprega os valores de normalização e pesos das categorias de impacte fornecidos pela Comissão Europeia, nomeadamente *Environmental Footprint* (EF 3.0). Essa abordagem permite o agrupamento das 16 categorias de impacte ambiental, para chegar a um único indicador de pontuação (Pt).

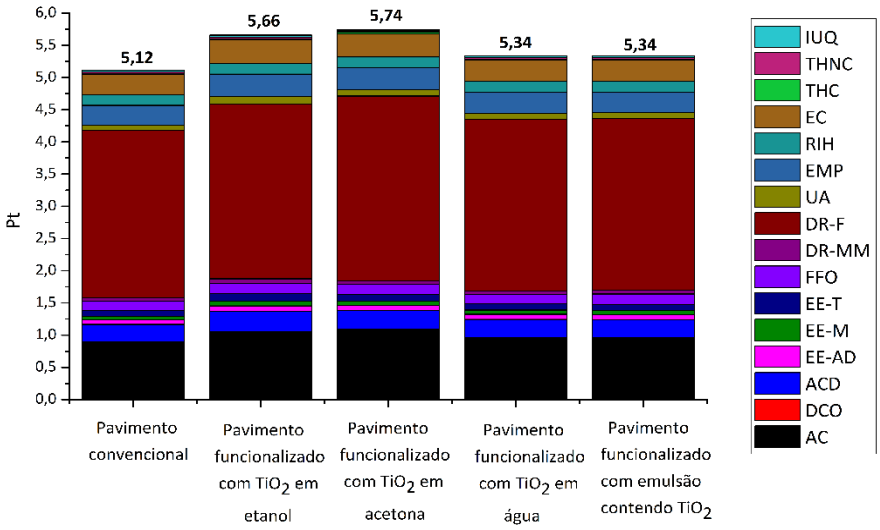


Figura 4 – Comparação direta entres os pavimentos por meio de uma análise de impacte ambiental com pontuação única.

Baseado nos resultados de pontuação única (Pt), a solução de TiO_2 dispersa em acetona originou a maior pontuação entre os revestimentos fotocatalíticos, com um acréscimo de 12,11% em comparação com o pavimento convencional, seguida pela solução de TiO_2 dispersa em álcool, com um aumento de 10,55%. Por outro lado, tanto a solução de TiO_2 dispersa em água quanto a emulsão betuminosa com TiO_2 apresentaram a mesma pontuação de 5,34, refletindo uma variação de 4,30%. Neste contexto, a escolha da água como solvente destaca-se como uma opção mais sustentável nesta análise. Do mesmo modo, a utilização da emulsão betuminosa demonstra ser uma opção sustentável, uma vez que dispensa a necessidade de solvente devido à incorporação direta das nanopartículas, e também dispensa o uso do material de fixação devido à sua capacidade de atuar como agente de dispersão e imobilização das nanopartículas de TiO_2. Um aspeto a salientar é o facto do maior impacte ambiental estar vinculado à categoria de Depleção dos Recursos Fósseis (DR-F) e ter uma grande contribuição dos processos associados ao pavimento betuminoso convencional.

Estes resultados apontam para um aumento de impacte com o processo de funcionalização do pavimento em comparação ao pavimento convencional, conforme evidenciado pelas variações de impacte entre as categorias de impacte (Figura 3) e também pelo acréscimo na análise de impacte com pontuação única (Figura 4). No entanto, é possível que esses acréscimos de impacte sejam compensados durante a fase de uso do pavimento (não considerada neste estudo), onde os benefícios para a qualidade do ar podem superar os impactes adicionais resultantes do processo de funcionalização.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar os impactes ambientais de diferentes revestimentos fotocatalíticos usados no processo de funcionalização de um pavimento betuminoso com nanopartículas de TiO_2. O estudo considerou quatro revestimentos por pulverização: i) solução de TiO_2 dispersa em álcool, ii) solução de TiO_2 dispersa em acetona, iii) solução de TiO_2 dispersa em água, e iv) uma emulsão betuminosa contendo TiO_2. Para as três primeiras soluções, foi utilizada uma resina epóxi como material de fixação. A ACV foi baseada numa abordagem "do berço ao portão" (incluindo a construção do pavimento) e seguiu as normas ISO 14040 e EN 15804:2012+A2:2019. Com base na análise efetuada, os principais contributos e conclusões são:

- O estudo avança numa área que ainda precisa de ser explorada, fornecendo um inventário detalhado do ciclo de vida e uma análise abrangente dos impactes ambientais associados à funcionalização de pavimentos fotocatalíticos.
- O revestimento fotocatalítico com TiO_2 disperso em água e a emulsão betuminosa contendo TiO_2 mostram-se comparativamente similares na maior parte das categorias impacte, e obtiveram na análise de pontuação única um aumento de 4,30% de impacte, destacando-os como a opção mais sustentável.
- Demonstrou-se que tanto os revestimentos com acetona quanto com etanol originam os impactes mais elevados, porém em categorias de impactes diferentes. Considerando uma medida de pontuação única, a adoção destes solventes, em conjunto com uma resina epóxi como material de fixação, resulta num aumento do impacte no pavimento em 12,11% para o revestimento com acetona e 10,55% para o revestimento com etanol.

O estudo aponta para a necessidade de explorar outras questões relevantes em investigações futuras. Por exemplo, pode-se avaliar diferentes agentes de imobilização (fixação), uma vez que o trabalho se centrou exclusivamente na resina epóxi. Do mesmo modo, o modelo deve ser alargado de modo a adotar uma abordagem "do berço ao túmulo", uma vez que se espera que a funcionalização tenha o potencial de proporcionar benefícios significativos em termos de qualidade do ar, e que possam compensar os impactes ambientais negativos inicialmente observados no processo de funcionalização. Seria também relevante avaliar outros tipos de funcionalização e diferentes tipos de semicondutores.

5 AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito dos projectos NanoAir PTDC/FISMAC/6606/2020 (doi.org/10.54499/PTDC/FIS-MAC/6606/2020), UIDB/04650/2020, UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020. Além disso, foi financiada pela FUNCAP: MLC-0191-00144.01.00/22 e CNPq: 404978/2021-5 - Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021.0. Este estudo também conta com financiamento nacional da FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato de bolsa 2023.02795.BD (doi.org/10.54499/2023.02795.BD), atribuído ao primeiro autor. Iran Rocha Segundo gostaria de agradecer à FCT pelo financiamento com a referência 2022.00763.CEECIND (doi.org/10.54499/2022.00763.CEECIND/CP1718/CT0006).

REFERÊNCIAS

Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Azadgoleh, M.A., Mohammadi, M.M., Abdipour, S.V. (2024). Toward Sustainable Roads: A Critical Review on Nano-TiO_2 Application in Asphalt Pavement. Innovative Infrastructure Solutions, 9(5):148. https://doi: 10.1007/s41062-024-01450-4

Bocci, E., Riderelli, L., Fava, G., Bocci, M. (2016). Durability of NO Oxidation Effectiveness of Pavement Surfaces Treated with Photocatalytic Titanium Dioxide. Arabian Journal for Science and Engineering, 41(12):4827–33. https//doi: 10.1007/s13369-016-2168-5

Dey, S., Mehta, N.S. (2020). Automobile Pollution Control Using Catalysis. Resources, Environment and Sustainability 2. https//doi: 10.1016/j.resenv.2020.100006.

EN 15804:2012+A2. (2019). Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products.

Eurobitume. (2021). THE EUROBITUME LIFE-CYCLE INVENTORY FOR BITUMEN.

EEA. (2022a). Emissions from Road Traffic and Domestic Heating behind Breaches of EU Air Quality Standards across Europe. https://www.eea.europa.eu/highlights/emissions-from-road-traffic-and

EEA. (2022b). Sources and Emissions of Air Pollutants in Europe. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air

Fan, W., Chan, K.Y, Zhang, C., Zhang, K., Ning, Z., Leung, M.K.H. (2018). Solar Photocatalytic Asphalt for Removal of Vehicular NOx: A Feasibility Study. Applied Energy 225:535–41. https//doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.134

Hassan, M.M. (2010). Quantification of the Environmental Benefits of Ultrafine/ Nanotitanium Dioxide Photocatalyst Coatings for Concrete Pavement Using Hybrid Life-Cycle Assessment. *Journal of Infrastructure System,* 16(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000016

ISO 14040. (2006). Environmental Management - Life Cycle Assessment- Principles and Framework

Moins, B., Beck, C., Hernando, D., Van den bergh, W., Audenaert, A. (2023). An Investigation on the Use of Lean Asphalt as an Alternative Base Material in Asphalt Pavements by Means of Laboratory Testing, Life Cycle Assessment, and Life Cycle Cost Analysis. Resources, Conservation and Recycling, 194. https://doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106992

Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., Som, C. (2016). From Laboratory to Industrial Scale: A Scale-up Framework for Chemical Processes in Life Cycle Assessment Studies. Journal of Cleaner Production, 135:1085–97. https://doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.164

Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V.,Lo Presti, D., Dauvergne, M. (2018). Life Cycle Assessment of Low Temperature Asphalt Mixtures for Road Pavement Surfaces: A Comparative Analysis. Resources, Conservation and Recycling, 138:283–97. https://doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.012.

Rocha Segundo, I., Freitas,E., Castelo Branco,V., Landi S., Costa,M.F., Carneiro, J.O. (2021). Review and Analysis of Advances in Functionalized, Smart, and Multifunctional Asphalt Mixtures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151:111552. https://doi: 10.1016/j.rser.2021.111552.

Rocha Segundo, I., Margalho, E. M., Lima Jr., O., Pinheiro, C., Freitas, E., Carneiro, J.O. (2023). Smart Asphalt Mixtures: A Bibliometric Analysis of the Research Trends. Coatings, 13(8):1396. https//doi: 10.3390/coatings13081396

Rocha Segundo, I., Zahabizadeh, B., Landi, S., Lima Jr., O., Afonso, C., Borinelli, J., Freitas, E., Cunha, V., Teixeira, V., Costa, M.F, Carneiro, J.O. (2022). Functionalization of Smart Recycled Asphalt Mixtures: A Sustainability Scientific and Pedagogical Approach. Sustainability, 14(1):573. https//doi: 10.3390/su14010573

Wu, F., Zhou Z., Hicks, A.L. (2019). Life Cycle Impact of Titanium Dioxide Nanoparticle Synthesis through Physical, Chemical, and Biological Routes. Environmental Science & Technology, 53(8):4078–87. https//doi: 10.1021/acs.est.8b06800

Yan, S., Wang, Y., Chi F., Luo, X., Zhang, T., Xi, C. (2022). Study on Air-Purifying Performance of Semi-Flexible Asphalt Samples Coated with Titanium Dioxide Using Different Methods. Journal of Renewable Materials, 10(5):1321–35. https//doi: 10.32604/jrm.2022.017545

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA ASPERSÃO SUPERFICIAL DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (TIO_2) APLICADO EM PASTA DE CAL PARA REVESTIMENTO

Ana Paula Bombassaro Grespan[a]; Fernanda Lamego Guerra[b]; Caroline Giordani[c]; Angela Borges Masuero[d]; Denise Carpena Coitinho dal Molin[e]

Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Osvaldo Aranha, 99 90035-190, Porto Alegre, Brasil.

[a]grespananapaula@gmai.com

[b] f.lamegoguerra@gmail.com

[c]giordani.caroline@gmail.com

[d]angela.masuero@ufrgs.br

[e]dmolin@ufrgs.br

RESUMO

A pasta de cal é utilizada na composição de argamassas verificadas em diversas edificações históricas, principalmente até o início do século XX nas edificações brasileiras. Este trabalho tem como objetivo a avaliação da efetividade do fotocatalisador TiO_2 disperso em dois meios líquidos: água deionizada e solução de silicato de potássio (endurecedor de superfície). As dispersões foram aplicadas sobre amostras revestidas com pasta de cal hidratada, com concentração de 3% de TiO_2 P25, dispersas em agitador mecânico e aplicadas por aspersão superficial com pistola pressurizada. Após a secagem, foi realizado o manchamento com o corante Rodamina B (RhB). Dois lotes de amostras foram expostos em duas etapas independentes, o primeiro lote em uma câmara de intemperismo à incidência de radiação de 0,35 W/m², e o segundo no microclima urbano de Porto Alegre/RS. Para as duas formas de exposição foi verificada a variação de cor da superfície com espectrofotômetro portátil. Nas amostras expostas ao ambiente natural verificou-se também a durabilidade do efeito autolimpante após novo manchamento. Com os resultados obtidos, verificou-se a efetividade do TiO_2 em ambas as suspensões, bem como a durabilidade da sua capacidade autolimpante durante o período de exposição no ambiente urbano. As amostras com a dispersão à base de silicato de potássio apresentaram maior redução inicial do manchamento comparadas às demais.

Palavras-chave: Autolimpeza, Silicato de Potássio, Fotocatálise.

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos de fachada contribuem para a proteção das edificações frente aos agentes de degradação, cuja incidência, em conjunto com a presença de microrganismos e o acúmulo de sujidade e de partículas poluentes, pode resultar no aparecimento de manifestações patológicas, como manchamentos (Socoloski *et al.* 2023). Essas manifestações patológicas são recorrentes especialmente em zonas urbanas e geram prejuízos estéticos aos revestimentos, podendo ainda degradá-los física e quimicamente. Nesse contexto, a utilização do dióxido de titânio (TiO_2) mostra-se relevante ao minimizar e combater o surgimento de manchamentos devido às suas propriedades autolimpantes. Para a fotocatálise, o TiO_2 necessita de luz solar, água e oxigênio atmosférico, podendo então degradar depósitos superficiais, atribuindo aos revestimentos, comportamento superhidrofílico (La russa *et al*. 2014; Fujishima *et al.* 2008). A ação fotocatalítica do TiO_2 contribui para a conservação das fachadas, auxiliando na durabilidade e aumento da vida útil do sistema, ações favoráveis para a sustentabilidade (Bersch *et al.* 2023; Diamanti *et al.* 2013; Munafò, Goffredo, Quagliarini 2015). Com a fotocatálise, poluentes atmosféricos prejudiciais à qualidade do ar são transformados em produtos de menor toxicidade, outro aspecto interessante por promover a melhoria da qualidade do ar (Pei *et a.l* 2021; Feltrin *et al.* 2013).

Diferentes métodos de aplicação do fotocatalisador em revestimentos de fachada vêm sendo testados de forma a garantir a sua efetividade e durabilidade. Enquanto alguns estudos verificaram a autolimpeza em substratos cimentícios com a incorporação do fotocatalisador na argamassa ou pasta no estado fresco (Bersch *et al.* 2023; Casarin 2023; Treviso 2016; Austria 2015; Diamanti *et al.* 2013), no presente trabalho, buscou-se avaliar a aplicação do TiO_2 por aspersão superficial, conforme em Guerra e*t al.* (2023). Para tal, foi avaliada a dispersão das partículas em água deionizada e em uma solução de silicato de potássio, base mineral para a composição de tintas de silicato. Este material age como um endurecedor da superfície e garante a aderência de partículas sólidas, como pigmentos, por exemplo, sem a formação de película, permitindo as trocas de umidade em forma de vapor e garantindo estanqueidade da água em seu estado líquido. O silicato pode penetrar no substrato de argamassa e curar à temperatura ambiente por um processo de ligação irreversível, formando uma camada dura e lisa de revestimento (Krishnan 2013).

Desta forma, este estudo busca avaliar a efetividade autolimpante do TiO_2 aplicado como aspersão superficial, disperso em dois meios líquidos (água deionizada e endurecedor de superfície à base de silicato de potássio), aplicados em substrato de pasta de cal. A amostras foram avaliadas em dois diferentes meios de exposição: em câmara de intemperismo e em microclima natural urbano.

2 MÉTODO

O trabalho consistiu na realização de quatro etapas principais: 1) confecção das amostras; 2) aplicação da supensão de TiO_2; 3) manchamento das amostras com RhB; 4) exposição das amostras e realização das medições de variação de cor ao longo do tempo (câmara de intemperismo e ambiente natural).

Para a realização da pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cal hidratada CH I peneirada (para melhor dispersão) em malha de abertura 75 µm (massa específica 2,50 g/cm³ e massa unitária 0,461 g/cm³), dióxido de titânio nanométrico peneirado em malha de abertura 150 µm (AEROXIDE® TiO_2 P25, com massa específica de 4,18 g/cm³, densidade compactada de 130 g/l e área específica superficial de 35-65 m²/g), água deionizada (condutividade entre 8,7 e 8,9 µS), solução composta por nanopartículas de silicato de potássio em base de água, e corante rodamina RhB (0,5 g/l de água).

2.1 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS

Para o preparo do substrato foi confeccionada uma pasta de cal hidratada, a partir da submersão de $Ca(OH)_2$ em água por um período de sete dias para maturação e completa hidratação, de modo a melhorar as condições de plasticidade na aplicação. A pasta de cal foi aplicada em lâminas de vidro retangulares de 26 x 76 mm através da submersão da superfície na mistura (Figura 1). Repetiu-se o processo duas vezes para cada amostra a fim de obter uma aplicação homogênea. Após a cura de 7 dias, as amostras foram lixadas, removendo pequenas imperfeições da superfície. Em seguida, foi realizada uma primeira leitura das coordenadas de cor com a utilização de um espectrofotômetro portátil (modelo Konica Minolta CM 2500d), para a qual foi confeccionado um gabarito para a medição sempre nos mesmos pontos das amostras. Após a medição, foram reservadas em local climatizado.

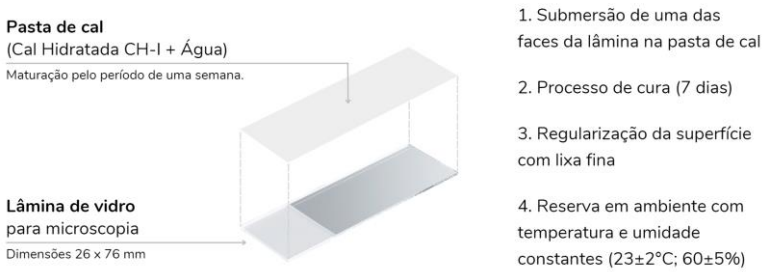


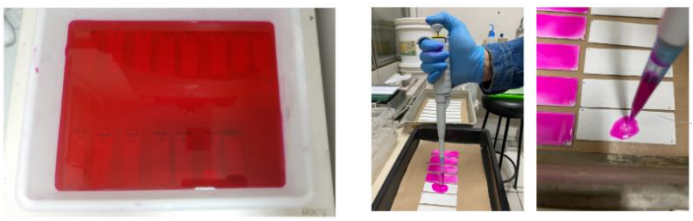
Figura 1 – Confecção das amostras

2.2 APLICAÇÃO DO TiO_2 POR ASPERSÃO SUPERFICIAL

A aplicação do fotocatalisador foi realizada com o auxílio de uma pistola elétrica de pintura, em velocidade e pressão constantes, com altura fixa de 55 cm em relação às amostras. Para a preparação das suspensões foram utilizados os meios líquidos água deionizada e solução de silicato de potássio. Em ambos foi acrescentado o teor de 3% do fotocatalisador e realizada a dispersão com um agitador mecânico por um intervalo de 30 minutos em velocidade constante. Durante a mistura, verificou-se uma maior facilidade de dispersão do fotocatalisador na mistura com silicato, visto que este apresenta uma tensão superficial menor do que a da água. Após a secagem da aspersão sobre as amostras foi realizada a segunda leitura com o espectrofotômetro, quatro dias após a aplicação para ambos os meios de dispersão.

2.3 MANCHAMENTO DAS AMOSTRAS COM RHB

Foram adotados dois métodos de manchamento com o corante RhB, solubilizado em água na concentração de 0,5 g/l. Para o ensaio em câmara de intemperismo, as amostras permaneceram submersas na solução por um período de 24 horas (Figura 2a).



(a) (b)

Figura 2 – Manchamento das amostras com o corante RhB: a) por submersão (exposição na câmara de intemperismo); b) com pipeta automática (exposição ao ambiente natural)

Para as amostras a serem dispostas no microclima urbano de Porto alegre, adotou-se o manchamento através da aplicação da solução com uso de uma pipeta automática com volume de 100 µl na superfície de cada amostra (Figura 2b). Verificou-se que a aplicação com pipeta automática garantiu melhor homogeneidade no manchamento após a secagem das amostras.

Após o período de manchamento, para ambos os métodos, as amostras permaneceram em ambiente climatizado e recobertas para proteção contra a luz ambiente até a secagem completa, para após ser realizada a medição de cor com espectrofotômetro.

2.4 EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS E REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE VARIAÇÃO DE COR

A Figura 3 mostra esquematicamente a distribuição das amostras e as configurações adotadas para o estudo.

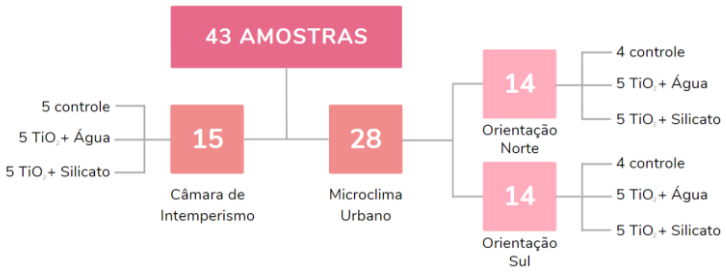


Figura 3 – Distribuição das amostras para análise

Conforme a Figura 4, três grupos de 5 amostras (controle; TiO_2 em água deionizada; e TiO_2 em silicato de potássio) foram expostas ao intemperismo artificial em uma câmara , modelo Atlas SUNTEST XXL+ (Figura 4). Realizou-se três ciclos de simulação à exposição da radiação solar, correspondendo aos tempos de 30, 60 e 120 minutos. Os seguintes parâmetros foram configurados: Irradiância (E = 0,35 W/m²); *Chamber Air Temperature* (CHT = 43°C); *Black Standart Temperature* (BST = 63°C); Umidade Relativa (UR = 50%).

(a) (b)

Figura 4 – Exposição das amostras em câmara de intemperismo: a) amostras expostas; b) posicionamento das amostras na câmara de intemperismo

Para a exposição ao ambiente urbano, foram consideradas as orientações norte e sul, correspondendo a lotes de quatros amostras “controle” e duplicatas de cinco amostras para os dois tipos de suspensão do fotocatalisador para cada uma das orientações, totalizando 28 amostras. O local selecionado para a exposição ao microclima urbano foi o terraço de um prédio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre/Brasil, coordenadas (-30,0326649, -51,2215340), no Hemisfério Sul. A disposição das amostras permitiu verificar a eficiência do fotocatalisador para as diferentes orientações.

Foi confeccionado um suporte de base acrílica para a fixação das amostras em posição perpendicular ao piso. O suporte foi fixado a blocos de concreto para evitar seu deslocamento (Figura 5).

(a) (b) (c)

Figura 5 – Exposição das amostras em suporte no ambiente natural: a) posicionamento das amostras no terraço; b) amostras expostas à orientação Sul; c) amostras expostas à orientação Norte

O período de exposição ao ambiente natural ocorreu nos meses de julho e agosto de 2023. Para este período foram obtidos os dados climáticos horários quanto à radiação global (kJ/m²), precipitação total (mm), temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) para a cidade de Porto Alegre, conforme o Instituto Nacional de Metereologia (INMET).

2.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE COR

A realização das medições de coordenadas de cor e verificação da variação colorimétrica ao longo do tempo foi realizado com espectrofotômetro e obtenção de imagens fotográficas. O espectrofotômetro permite a determinação de coordenadas cromáticas com base na Comissão Internacional de Iluminação ou Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), sendo utilizado em diversos trabalhos (Austria 2015; Gherardi *et al.* 2014; Goffredo *et al.* 2016; Pozo-Antonio e Dionísio 2017; Treviso 2016; Vázquez-Nion *et al*. 2018).

Com base neste sistema, é possível expressar o espaço de cor tridimensionalmente, em coordenadas L*a*b*, onde: L* corresponde à luminosidade; a* corresponde às coordenadas entre as cores vermelho/verde, sendo "+a" indicação de vermelho e "-a", indicação do verde; b* corresponde às coordenadas entre as cores amarelo/azul, sendo "+b" indicação de amarelo e "-b", indicação do azul. A Figura 6 mostra os eixos das coordenadas de cor, o equipamento utilizado, bem como a fórmula adotada para a determinação da variação de cor ΔE ao longo do tempo. Os resultados apresentados são referentes ao ΔE médio, calculado a partir dos valores obtidos para todos os pontos de medição de cada conjunto de amostras.

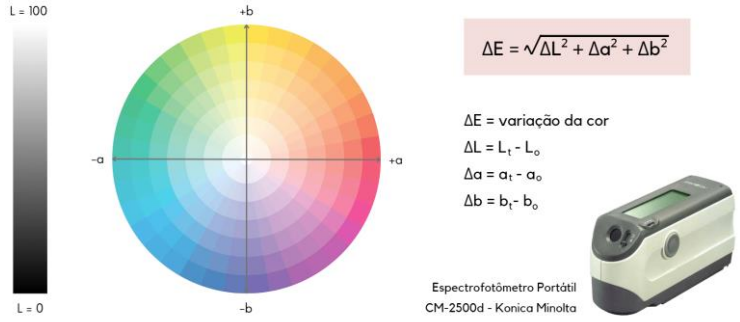


Figura 6 – Parâmetros registrados pelo espectrofotômetro e fórmula para determinação da variação de cor

De forma a garantir as leituras com o equipamento sempre no mesmo ponto de medição para posterior comparação das alterações ao longo do tempo foi confeccionado um gabarito utilizado em todas as medições (Figura 7).

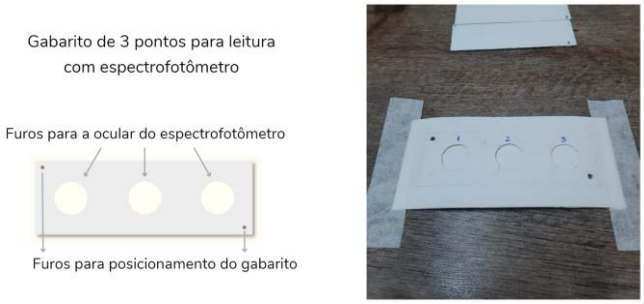


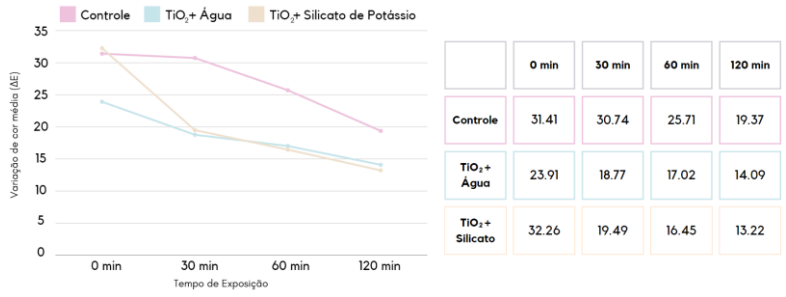
Figura 7 – Gabarito para medição

Para as amostras expostas no microclima exterior, optou-se pela repetição do manchamento com o corante RhB nas mesmas amostras expostas inicialmente, logo após a verificação da sua autolimpeza. Este procedimento permitiu observar se após o novo manchamento, a autolimpeza ocorreria com a mesma efetividade para as duas dispersões propostas (água deionizada e silicato de potássio), mesmo após a exposição ao intemperismo natural (sol e chuva, principalmente), permitindo verificar a durabilidade do fotocatalisador aplicado por aspersão nas superfícies testadas.

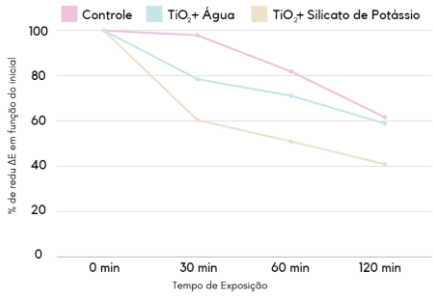
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AMOSTRAS EXPOSTAS EM CÂMARA DE INTEMPERISMO

A Figura 8 (a) mostra os resultados comparativos da variação de cor das amostras sem o fotocatalisador (controle), com TiO_2 em água deionizada e com TiO_2 em silicato de potássio. Para as análises realizadas em câmara de intemperismo só foi possível a realização de um único ciclo de manchamento nos quatro tempos propostos para realização das leituras (0, 30, 60 e 120 minutos). Na Figura 8 (b), observa-se a variação de cor média expressa em porcentagem, na qual a medição inicial corresponde ao valor de 100%.



	0 min	30 min	60 min	120 min
Controle	31.41	30.74	25.71	19.37
TiO_2+ Água	23.91	18.77	17.02	14.09
TiO_2+ Silicato	32.26	19.49	16.45	13.22



(a) (b)

Figura 8 – Variação de cor média (ΔE) das amostras dispostas na câmara de intemperismo*:* a) valores absolutos; b) valores percentuais (em relação ao ΔE inicial)

Com base na Figura 8 (a), após o primeiro tempo de ciclo da câmara (30 min.), na ausência do fotocatalisador (amostras controle), observa-se a redução da diferença de cor de 2,13% ($\Delta E_{inicial}$=31,41 ΔE_{30min}=30,74), salientando-se que esta variação é sempre calculada em função das coordenadas obtidas com as amostras antes do manchamento com RhB. Nas amostras com o fotocatalisador

disperso em água deionizada verificou-se a degradação mais intensa do corante, evidenciando a ocorrência da fotocatálise, principalmente após os primeiros 30 min. de ciclo, reduzindo a diferença de cor em 21,50% ($\Delta E_{inicial}$ =23,91 e ΔE_{30min}=18,77). As amostras com silicato de potássio mostraram uma degradação ainda mais efetiva após os 30 min., de 39,58% ($\Delta E_{inicial}$ =32,26 e ΔE_{30min}=19,49). As medições após o tempo final do ciclo (120 min.) resultaram na redução de 38,33% para as amostras controle, 41,07% para as amostras com TiO_2 em água e 59,02% para as amostras com TiO_2 em silicato de potássio, mostrando a efetividade da redução do manchamento, principalmente para as amostras tratadas com a suspensão à base de silicato de potássio.

3.2 AMOSTRAS EXPOSTAS AO MICROCLIMA URBANO

As amostras dispostas em ambiente externo para exposição ao intemperismo natural permaneceram nesta condição por um período de 47 dias, onde foram realizadas nove medições totais com o espectrofotômetro e de obtenção de imagem fotográfica.

A Figura 9 mostra as ocorrências de precipitação (mm) e da radiação global (kJ/m²) para todo o período de exposição ao ambiente natural na cidade de Porto Alegre. Para as precipitações, verificou-se uma média horária de 0,24 mm, com incidência máxima horária de 13 mm. Quanto à radiação global, verificou-se a média horária de 913,39 kJ/m², com máxima horária de 2.675,8 kJ/m².

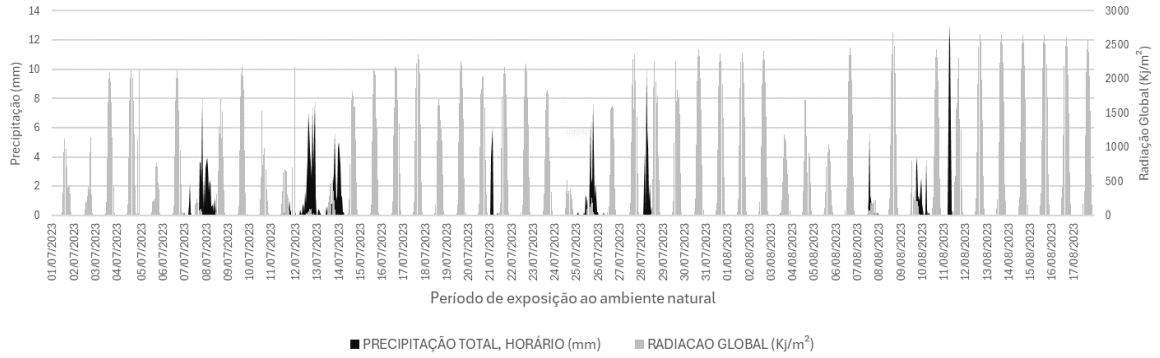


Figura 9 – Medição horária da precipitação (mm) e da radiação global (kJ/m²) para a cidade de Porto Alegre em julho e agosto de 2023

Quanto aos dados de temperatura do ar e umidade relativa (UR), a Figura 10 mostra os valores horários obtidos para o período. Para a temperatura do ar, verificou-se a média de 16,30°C, atingindo a mínima de 4,8°C e máxima de 32,3°C. Esta oscilação térmica é característica para o clima urbano da cidade em estudo. Quanto à UR, observou-se a média de 79,12%, com UR mínima de 28% e máxima de 97%.

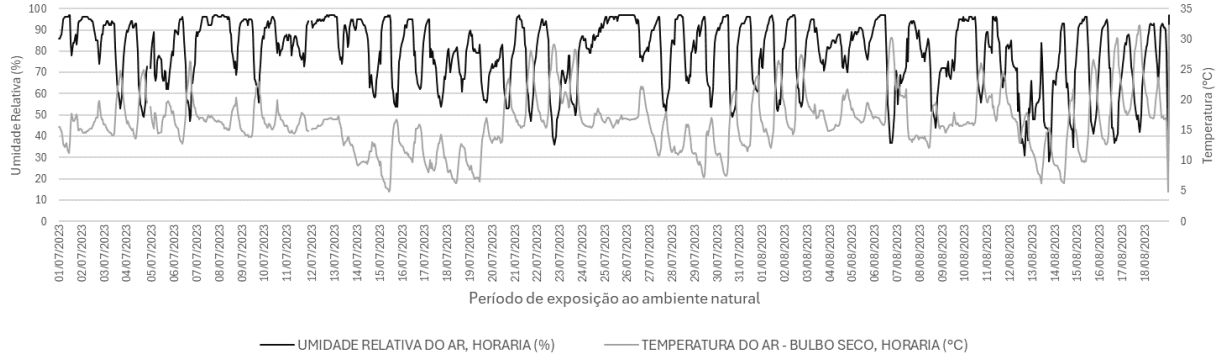


Figura 10 – Medição horária da temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%) para a cidade de Porto Alegre em julho e agosto de 2023

A primeira medição ocorreu cerca de 24 horas após a disposição das amostras ao ambiente exterior. Destaca-se que esta primeira leitura é a mais evidente para mostrar o potencial fotocatalítico do TiO_2, visto que o corante utilizado tende a degradar-se naturalmente com a luz no passar do tempo.

A Figura 11 mostra os resultados obtidos para todas as configurações de amostras, considerando a leitura inicial, a amostra após 24 horas e após seis dias, aproximadamente.

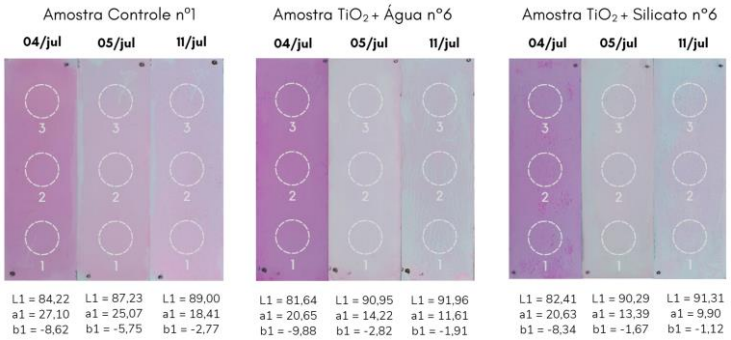
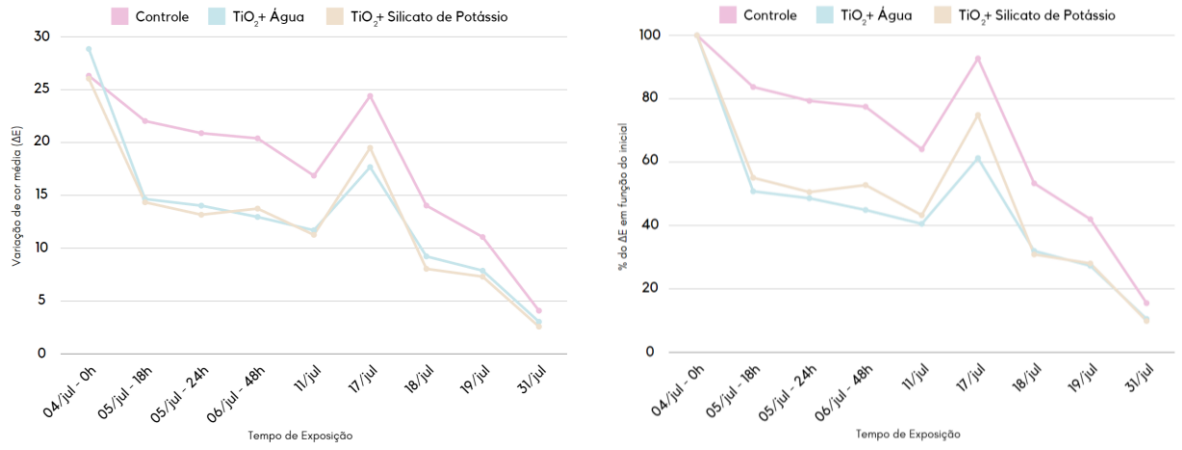


Figura 11 – Medições inicial, intermediária e final para as amostras controle, com TiO_2 disperso em água deionizada e TiO_2 disperso em solução de silicato de potássio expostas à orientação Norte

Com base na Figura 11, observa-se que, para a orientação Norte, onde ocorre a incidência solar na maior parte do dia, ocorreu a fotocatálise com a descoloração da RhB de forma mais perceptível nas amostras com o fotocatalisador, em comparação à controle, o que pode ser observado pela redução dos valores de a*, aumento nos valores de b*, e aumento da luminosidade L*. Ao final das medições, verificou-se que as amostras com o TiO_2 disperso em silicato de potássio apresentaram uma coloração azulada, podendo estar relacionada à coloração natural do produto.

A Figura 12 (a) mostra a variação de cor (ΔE) ao longo do tempo, para todas as configurações de amostras. Novamente, verifica-se a intensa ação fotocatalítica na medição após 24 h para amostras com TiO_2 em comparação às amostras controle. Ambas as dispersões, em água e com silicato de potássio, revelaram comportamentos semelhantes. Destaca-se que as oscilações das leituras resultam de períodos em que ocorreram chuvas, visto as amostras estarem expostas ao ambiente exterior. Na Figura 12 (b), os valores apresentados correspondem à relação entre as medições realizadas ao longo do tempo e o ΔE inicial, em porcentagem.



(a) (b)

Figura 12 – Variação de cor média (ΔE) ao longo do tempo das amostras expostas à orientação Norte: a) valores absolutos; b) valores percentuais (em relação ao ΔE inicial)

A Figura 13 mostra os resultados para as amostras expostas à orientação Sul. Conforme esperado, devido à baixa incidência de luz solar, em comparação à fachada Norte, verificou-se novamente a redução nos valores de a* e o aumento dos valores de b* e L*.

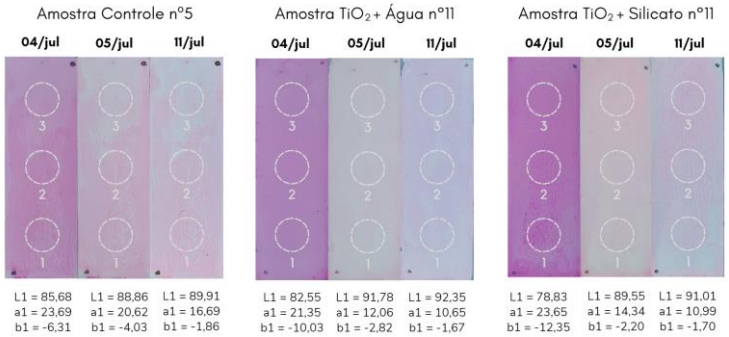
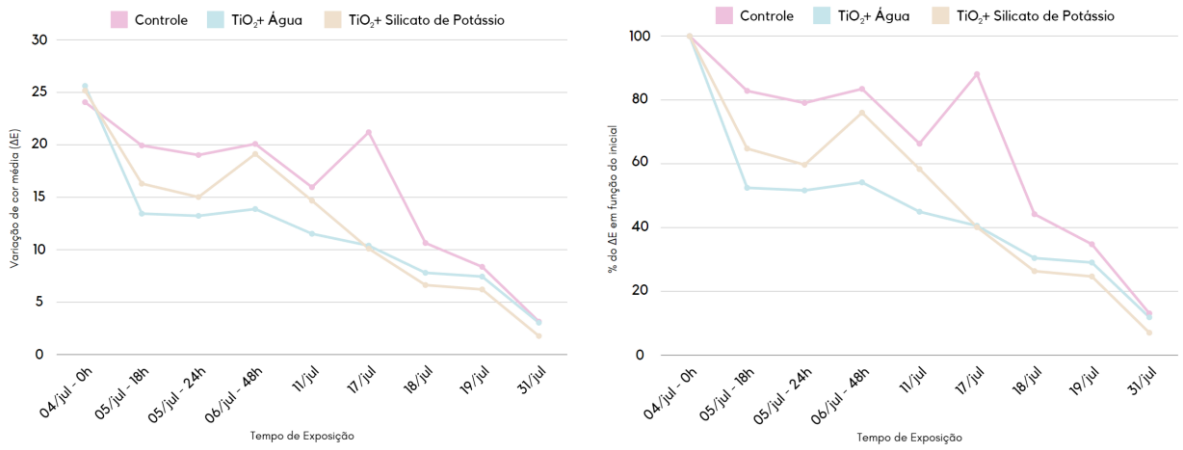


Figura 13 – Medições inicial, intermediária e final para as amostras controle, com TiO_2 disperso em água deionizada e TiO_2 disperso em solução de silicato de potássio expostas à orientação Sul

A Figura 14 (a) mostra a variação de cor (ΔE) ao longo do tempo para todas as configurações de amostras expostas à orientação Sul. Verifica-se que, mesmo na baixa incidência de radiação solar, as amostras com o fotocatalisador apresentaram redução do manchamento mais efetiva nas primeiras horas quando comparas às amostras controle. O comportamento para as diferentes dispersões foi semelhante. Na Figura 14 (b), observam-se os valores percentuais do ΔE em função da medição inicial (100%).



(a) (b)

Figura 14 – Variação de cor média (ΔE) ao longo do tempo das amostras expostas à orientação Sul: a) valores absolutos; b) valores percentuais (em relação ao ΔE inicial)

3.3 AMOSTRAS EXPOSTAS AO MICROCLIMA URBANO APÓS A REPETIÇÃO DO MANCHAMENTO

Em seguida que foram realizadas as medições finais das amostras expostas ao exterior para as orientações Norte e Sul, repetiu-se o procedimento de manchamento com a finalidade de verificar se ainda ocorreria a ação fotocatalítica mesmo após os 27 dias de exposição da superfície das amostras às condições naturais de intemperismo, tais como radiação solar e chuva. Desta forma foi possível avaliar se a simples aspersão do fotocatalisador seria suficiente para promover a limpeza após novo manchamento. A Figura 15 mostra os resultados obtidos para as amostras expostas à orientação Norte.

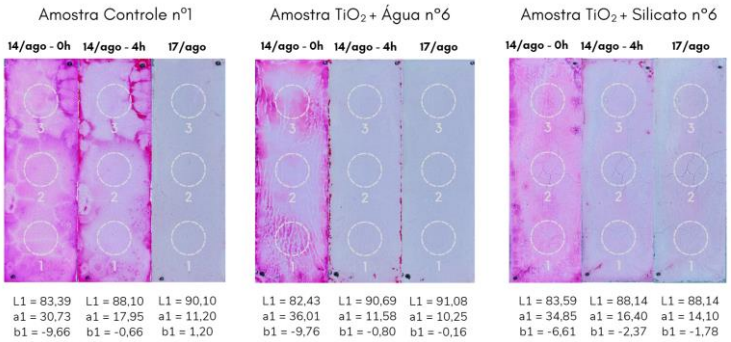
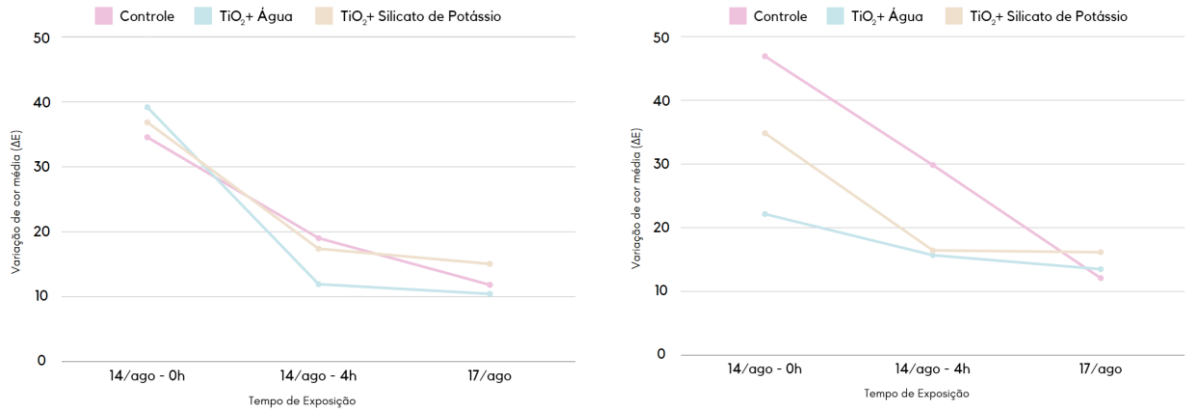


Figura 15 – Amostras expostas à orientação Norte após novo manchamento com corante RhB

É possível observar, com base na Figura 15, o efetivo efeito fotocatalítico das amostras com a aplicação do TiO_2 para os dois meios de dispersão, comparadas à amostra controle, após 4 horas de exposição, comprovando que, mesmo após novo manchamento o fotocatalisador segue agindo satisfatoriamente.

A Figura 16 (a e b) mostram os resultados da variação de cor ao longo das medições para as amostras após novo manchamento com RhB para as orientações norte e sul, respectivamente. As leituras com espectrofotômetro revelaram uma maior efetividade na redução da diferença de cor para as amostras com aplicação da dispersão em água para as quatro primeiras horas de medição em comparação às demais para as amostras expostas à orientação norte (a). Para a orientação sul (b), a maior redução inicial da diferença de cor ocorreu nas amostras com dispersão em silicato de potássio em comparação às demais.



(a) (b)

Figura 16 – Variação de cor (ΔE) ao longo do tempo das amostras após novo manchamento com RhB: a) expostas à orientação Norte; b) expostas à orientação Sul

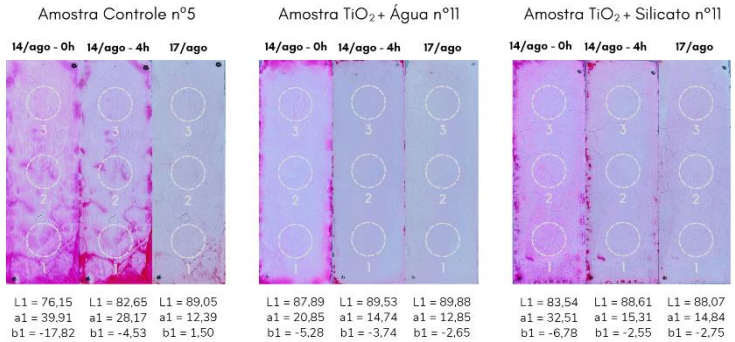


Figura 17 – Amostras expostas à orientação Sul após novo manchamento com corante RhB

A Figura 17 mostra os resultados da descoloração do corante para as amostras expostas à orientação Sul. Percebe-se novamente o clareamento mais efetivo das amostras com aplicação do fotocatalisador para os dois meios de dispersão.

4 CONCLUSÕES

Verificou-se, a partir dos dois meios em que foi realizada a mistura do TiO_2, uma maior facilidade de dispersão do fotocatalisador na mistura com silicato em comparação à água. Esta pode ser uma vantagem visto à tendência à aglomeração de partículas muito finas, como a do fotocatalisador utilizado neste estudo. Quanto maior a dispersão, melhor a possibilidade de exposição das partículas à fotoatividade.

Por meio dos dados obtidos com as leituras através do espectrofotômetro e da análise visual dos registros fotográficos das amostras nas duas formas de exposição, a primeira à radiação na câmara de intemperismo e a segunda no microclima urbano de Porto Alegre/RS, foi possível observar a efetividade da cobertura superficial fotocatalítica por aspersão com pistola pressurizada na autolimpeza das superfícies para ambas as formas de dispersão (em água e em silicato de postássio). A análise comparativa dos valores da variação de cor para cada tipo de amostra confirma a sua efetividade.

Nos gráficos referentes à exposição ao ambiente natural urbano, observa-se que a diferença de variação de cor (ΔE) entre as amostras com e sem TiO_2 é maior nas primeiras horas e varia conforme as condições climáticas. Outro aspecto observado é que o comportamento inicial das amostras posicionadas em ambas as orientações é semelhante.

Por meio dos resultados obtidos com as medições realizadas após a repetição do manchamento com a solução de RhB e a nova exposição no exterior, verificou-se que a diferença na variação de cor continuou acontecendo de maneira mais acentuada nas primeiras horas de exposição nas amostras com aspersão do fotocatalisador.

REFERÊNCIAS

Austria, G. (2015). Argamassa autolimpante para revestimento de fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO_2). 2015, 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPGEC/UFRGS. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/131071

Bersch, J. D., Flores-Colen, I., Masuero, A. B., Dal Molin, D. (2023). Photocatalytic TiO_2-Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. Buildings, 13(1): 186. https://doi.org/10.3390/buildings13010186

Casarin, R. P., Bersch, J. D., Maia, J., Masuero, A. B., Dal Molin, D. C. C. (2023). Assessment of Photocatalytic Nano-TiO_2 Mortars: Behavior When Exposed to Simulated Indoor Conditions of Glazed Buildings. Buildings, 13(9): 2250. https://doi.org/10.3390/buildings13092250

Diamanti, M.V., Del Curto, B., Ormellese, M., Pedeferri, M.P. (2013). Photocatalytic and self-cleaning activity of colored mortars containing TiO_2. Constr. Build. Mater, 46: 167–174. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.038

Feltrin, J., Sartor, M. N. Sartor, Noni, A. De, Bernardin, A. M., Hotza, D., Labrincha, J. A. (2013). Superfícies fotocatalíticas de titânia em substratos cerâmicos: Parte I: Síntese, estrutura e fotoatividade. Cerâmica, 59: 620–632. https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000400020

Fujishima, A., Zhang, X., Tryk, D. A. (2008). TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena. Surface Science Reports, 63(12): 515–582. https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001

Gherardi, F., Colombo, A., Goidanich, S., Simonutti, R., Toniolo, L. (2014). Innovative nano-TiO2 particles for self-cleaning treatments of historic architecture and sculptures. 7 th international conference on water repellent treatement and protective surface technology for building materials. Anais.... https://doi.org/10.12900/RBM14.20.6-0041

Goffredo, G. B., Accoroni, S., Totti, C., Romagnoli, T., Valentini, L., Munafò, P. (2016). Titanium dioxide based nanotreatments to inhibit microalgal fouling on building stones surfaces. Building and environment, 112(1): 209–22. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.034

Guerra, F. L., Giordani, C., Zucchetti, L., Ribas, R. Masuero, A., Dal Molin, D. C. C., Bento, F. M. (2023). The Effectiveness of Spraying $nTiO_2$ on Coating Mortars in Historical Buildings Aimed at Reducing Fungal Growth. Buildings, 13: 2751. https://doi.org/10.3390/buildings13112751

Krishnan, P., Zhang, M.H., Yu, L., Feng, H. (2013). Photocatalytic Degradation of Particulate Pollutants and Self-Cleaning Performance of TiO_2-Containing Silicate Coating and Mortar. Constr. Build. Mater, 44: 309–316. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.009

La Russa, M. F., Macchia, A., Ruffolo, S. A.; De Leo, F., Barberio, M., Barone, P., Crisci, G., Urzì, C. (2014) Testing the antibacterial activity of doped TiO_2 for preventing biodeterioration of cultural heritage building materials. International Biodeterioration and Biodegradation, 96: 87–96. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.10.002

Munafò, P., Goffredo, G.B., Quagliarini, E. (2015). TiO_2-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: An overview. Constr. Build. Mater., 84: 201–218. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.083

Pei, C., Zhu, J.H., Xing, F. (2021). Photocatalytic property of cement mortars coated with graphene/TiO_2 nanocomposites synthesized via sol-gel assisted electrospray method. J. Clean. Prod., 279: 123590. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123590

Pozo-Antonio, J. S., Dionísio, A. (2017). Physical-mechanical properties of mortars with addition of TiO_2 nanoparticles. Construction and building materials, 148: 261–272. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.040

Socoloski, R. F., Bersch, J. D., Guerra, M., Masuero, A. B. (2023). The influence of temperature and rain moisture in mortar facades obtained through hygrothermal simulation. Construction And Building Materials, 370: 130587. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130587

Treviso, J. P. (2016). Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo TiO_2 expostas ao microclima urbano. 2016, 204p. Dissertação (mestrado em engenharia civil). PPGEC/UFRGS. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/142697

Vázquez-Nion, D., Silva, B., Prieto, B. (2018). Influence of the properties of granitic rocks on their bioreceptivity to subaerial phototrophic biofilms. Science of the total environment, 610–611: 44–54. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.015

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE PAREDES EXTERIORES EM ESTRUTURAS DE AÇO LEVE

Leonardo Torres [a]; Carlos Couto [a]; Paulo Vila Real [a]; Paulo Piloto [b]

[a] RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal, ccouto@ua.pt

[b] LAETA-INEGI, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

RESUMO

Este estudo centra-se no comportamento ao fogo de paredes exteriores em estruturas de Light Steel Frame (LSF). Estudos anteriores abordaram principalmente o comportamento ao fogo de configurações de paredes internas, no entanto, o número crescente de incêndios que afetam as paredes externas, mostra que o seu comportamento também deve ser compreendido.

Por conseguinte, este trabalho investiga o comportamento ao fogo destes elementos, apresentando um estudo numérico de seis tipologias diferentes, normalmente encontradas na construção de LSF, analisando a evolução da temperatura ao longo do tempo, na parede e nos perfis de aço. Os resultados mostram que a evolução da temperatura é mais lenta quando o fogo incide na face exterior da parede mas, nestes casos, a temperatura crítica recomendada de 350 °C é atingida mais cedo nos perfis em aço. Finalmente, este trabalho mostra que são necessários mais estudos para descrever a resistência ao fogo de paredes exteriores, em particular quando estes elementos têm uma função de suporte de carga.

Palavras-chave: Light steel framing; paredes exteriores; simulação numérica; resistência ao fogo; comportamento ao fogo

1 INTRODUÇÃO

O comportamento ao fogo de painéis de parede em Light Steel Framing (LSF) tem sido estudado por diferentes autores, e a utilização de produtos de aço enformado a frio no sector da construção expandiu-se para novos mercados em todo o mundo. Os perfis de aço enformados a frio podem ser montados em várias combinações para fornecer sistemas estruturais de suporte de carga para edifícios de até cinco pisos ou mais, ou utilizados como sistemas suplementares, juntamente com os sistemas estruturais mais tradicionais de aço ou betão.

O comportamento ao fogo é afetado pela resistência dos perfis de aço enformados a frio que aquecem rapidamente e com o aumento da temperatura do aço, há uma degradação das propriedades mecânicas e, consequentemente, uma redução da rigidez e da resistência mecânica (Laím, Rodrigues, and Da Silva 2014; Craveiro et al. 2016). Para diminuir a transferência de calor e melhorar a sua resistência ao fogo, as estruturas LSF são normalmente protegidas por placas de gesso ou outros materiais que formam os painéis de parede em LSF (Magaraboosha nam, Ariyanayagam, and Mahendran 2020).

Dois dos materiais mais comuns e versáteis utilizados nesta tecnologia e, consequentemente, no fabrico de painéis de parede em LSF, são o gesso cartonado e o OSB "Oriented Strand Board". Estes materiais, são utilizados em quase todos os ambientes em diferentes formas e tipologias, respeitando as necessidades técnicas do projeto. O OSB pode ser utilizado no Sistema LSF, em pisos, lajes e paredes externas ou internas com funções estruturais, possuindo diferentes espessuras e classificações de acordo com o tipo de utilização nos manuais dos fabricantes e requisitos da norma - EN 300 (CEN 2006). O OSB, quando exposto ao fogo, é combustível, aumentando por sua vez a temperatura nos perfis LSF. Este comportamento complexo é difícil de simular (Piloto, Khetta, and Gavilán 2018) porque a combustão introduz energia adicional na simulação ou no ensaio de paredes com OSB. Pelo que devem ser realizados mais ensaios experimentais e simulações no futuro. Os painéis de parede Light Steel Framing (LSF) são objeto de uma classificação de resistência ao fogo segundo critérios de estanquidade (E), isolamento (I) e resistência mecânica (R) na Europa EN 13501-2 (CEN 2016), e em outras regiões do globo.

Dentre os referidos estudos, levados a efeito nas últimas três décadas, destacam-se aqueles cujo foco consiste na modificação das características das paredes, no aumento da espessura e do número de camadas de placas de gesso, ou na adoção de placas cimentícias (Gnanachelvam, Ariyanayagam, and Mahendran 2020). Nalguns estudos, o isolamento interno melhorou o critério de isolamento da resistência ao fogo (I) dos painéis de parede de LSF (Feng, Wang, and Davies 2003), enquanto noutros estudos (Alfawakhiri 2001), os autores verificaram que os conjuntos de parede sem isolamento da cavidade proporcionavam maior resistência ao fogo do que os conjuntos com isolamento na cavidade. De um modo geral, estes estudos avaliaram os efeitos destes parâmetros através de ensaios ao fogo em grande escala (Gunalan 2011) ou simulações numéricas (Kesawan and Mahendran 2018) expostos à curva de incêndio da norma ISO 834.

Por último, a tendência mundial aponta para um aumento da utilização dos sistemas LSF, uma vez que constituem uma solução sustentável para o mercado da construção, em linha com as políticas adotadas na Europa e pela ONU. No entanto, dadas as exigências funcionais únicas dos edifícios localizados no Sul da Europa, em termos de comportamento térmico e acústico, quando comparados com os do Norte e Centro da Europa, da América do Norte ou da Austrália/Nova Zelândia, regiões que lideram a investigação e desenvolvimento da tecnologia LSF (Soares et al. 2017), a generalização direta desta tecnologia a outras localizações geográficas pode não ser a melhor solução e requer uma investigação mais aprofundada (Roque et al. 2020). Isto é especialmente relevante no contexto da

resistência ao fogo, uma vez que o impacto de diferentes configurações de paredes de LSF permanece desconhecido. Por outro lado, uma vez que os estudos anteriores se centraram no comportamento ao fogo das paredes interiores, o comportamento ao fogo das paredes exteriores ainda não foi completamente explorado (Torres et al. 2023), apesar de ser um cenário relevante devido ao aumento contínuo dos incêndios urbanos e florestais que afetam as paredes exteriores dos edifícios, como se observou nos recentes incêndios florestais em Portugal.

2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAREDES EXTERIORES

2.1 MODELO NUMÉRICO

Foi desenvolvido um modelo de elementos finitos usando o ANSYS (2018) para calcular a variação da temperatura nas LSF constituídas por diferentes materiais e camadas. Utilizaram-se análises bidimensionais (2D) com os elementos finitos PLANE55 e SURF151 disponíveis na biblioteca do ANSYS. O PLANE55 é um elemento com quatro nós e um grau de liberdade (temperatura) que utiliza funções de interpolação lineares e integração de Gauss completa, enquanto o SURF151 possui 3 nós, cada com um grau de liberdade, sendo sobreposto a uma aresta do PLANE55 para representar a interface de radiação da cavidade com o material de gesso e de aço, calculando as trocas de calor por radiação nesta região. Este elemento utiliza funções de interpolação lineares e dois pontos de integração.A malha de elementos finitos foi escolhida após uma análise de sensibilidade. O pormenor da malha de elementos finitos é fornecido na Figura 1.

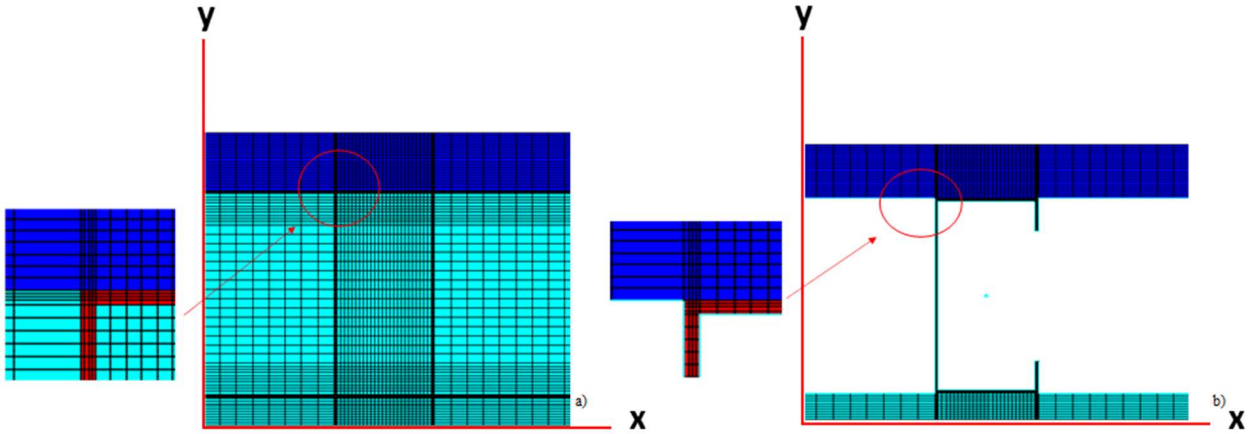


Figura 1: Exemplos de malhas de elementos finitos extraídas da região dos perfis das amostras a) com material na cavidade e b) sem material na cavidade.

As condições de fronteira são definidas neste estudo considerando um lado da parede exposto ao fogo, a temperatura é definida de acordo com a norma de fogo ISO 834, ou a curva de fogo exterior definida na EN 1991-1-2 (CEN 2002) sendo imposta num nó adicional e assumindo o fluxo de calor por radiação e convecção para o lado exposto da parede. As propriedades térmicas dos materiais são dependentes da temperatura conforme Figura 2.

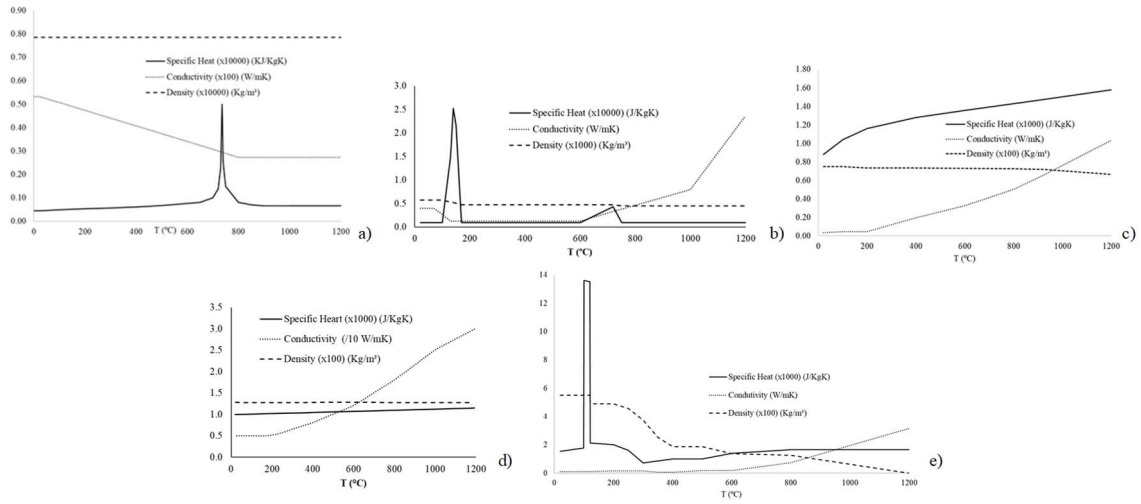


Figura 2: Propriedades térmicas do aço (a); *gypsum board* (b); *rockwool* (c); superwool (d); OSB (e).

As condições de fronteira (ver Figura 3) foram impostas assumindo a transferência de calor por radiação (emissividade do fogo $\varepsilon_f = 1$) 1) e convecção (α_c =25 W/m²K) no lado exposto. A transferência de calor por convecção (α_c =9W/m²K) foi aplicada no lado não exposto, para incluir o efeito da radiação EN 1991-1-2 (CEN 2002). As análises foram efectuadas com base em dois modelos diferentes: o primeiro modelo considera a condução de calor através dos sólidos e assume um contacto perfeito entre os materiais de isolamento utilizados na região da cavidade; o segundo modelo considera o fluxo de calor por condução entre as partes sólidas e a radiação com a temperatura da região da cavidade (são utilizados dois nós para cada região da cavidade).

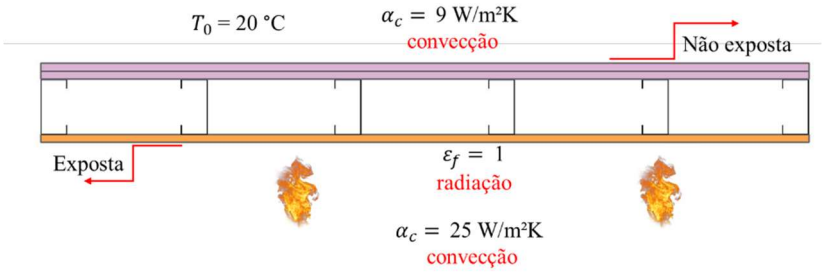


Figura 3: Condição de contorno da modelação numérica.

As opções relacionadas com a solução de radiação foram foram definidos, o valor da constante de Stefan Boltzmann, o valor da diferença entre a escala normal de temperatura e a escala absoluta e a definição do ambiente de radiação No início das simulações, a temperatura do lado não exposto foi definida como igual à temperatura normal (T_0= 20 °C).

A análise transiente não linear foi realizada no ANSYS com uma solução incremental e iterativa,, definindo-se uma variação máxima do intervalo de tempo igual a 60 segundos e mínima de 1 segundo, com a opção de ajustar automaticamente o intervalo de tempo durante o processo de solução incremental ativada. A convergência da solução considera a análise do fluxo de calor, com um valor de tolerância de 0.001 e um valor de referência de 10^{-6} (W). Em Torres et al. (2023) são fornecidos mais detalhes sobre o modelo numérico.

2.2 *TIPOLOGIAS DE PAREDES EXTERIORES*

O modelo numérico descrito anteriormente foi utilizado para realizar um estudo de 6 (seis) tipologias de paredes LSF exteriores não estruturais, com uma escala real de 3×3m considerando a análise de uma secção transversal 2D. As tipologias 1-3 correspondem a paredes exteriores de LSF à escala real, com uma camada de OSB de 12 mm de espessura na face exterior e uma camada composta por duas camadas de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura na face interior. A cavidade possui uma profundidade de 90 mm e a parede de LSF composta por seis perfis LSF, espaçados a cada 600 mm. Estes elementos possuem uma secção de aço enformado a frio (CFS) em forma de C90x43x15x1.5. Para a tipologia 1, não foi considerado qualquer material de isolamento na cavidade, enquanto as tipologias 2 e 3 possuem lã minera (*rockwool)* e fibra cerâmica (*superwool)*, respetivamente, como material de isolamento. As tipologias 4-6 são idênticas às anteriores, mas com uma altura da secção transversal de 150 mm (C150x43x15x1.5). Para estas tipologias, a profundidade da cavidade correspondente foi fixada em 150 mm e, da mesma forma, a tipologia 4 não possui material de isolamento na cavidade, enquanto as tipologias 5 e 6 possuem respetivamente, material de isolamento, *rockwool* e a *superwool*.

Para as análises numéricas, foi utilizada a curva de incêndio padrão ISO 834 para investigar a resistência ao fogo destas tipologias de parede, resultando nas amostras A1 a A6. Depois, para uma comparação direta e mais fácil sobre a influência do lado de exposição ao fogo, foi considerada a mesma curva de aquecimento para as mesmas tipologias, mas considerando o aquecimento do lado exterior, resultando nas amostras A7 a A12. Por fim, estas últimas amostras foram também simuladas utilizando a curva de incêndio exterior EN 1991-1-2 (CEN 2002), de forma a considerar um cenário menos severo que corresponde a incêndios que ocorrem no perímetro de um edifício mas que incidem nestas paredes pelo lado exterior, resultando nas amostras A13 a A18.

3 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos através de uma simulação numérica com uma duração total de até 300 minutos em todas as amostras, recolhendo a temperatura de cada nó de acordo com a sua localização nas amostras. Para cada simulação numérica, a evolução da temperatura é apresentada para o aço (banzo aquecido (HF), alma (WEB), banzo não aquecido (CF)), para as placas de gesso e para as placas de OSB, que estiverem na posição, lado do fogo (FS), para a cavidade (CAV), e para a interface entre as camadas duplas de gesso (PB1-PB2) (ver exemplo Figura 3), em que as temperaturas médias foram recolhidas através dos nós presentes nas regiões que compõem os seis perfis LSF. Os resultados permitem comparar a resistência ao fogo dos isolamentos de cada tipologia apresentada, bem como o seu comportamento em três níveis de temperatura para cada nó analisado. Os níveis de temperatura foram definidos como aqueles correspondentes a uma temperatura crítica, T(cri) = 350 °C, a temperatura máxima na superfície não exposta T(max) = 180 + 20 °C, e a temperatura média da superfície não exposta T(ave) = 140 + 20 °C. As T(max) e T(ave) utilizam os critérios definidos em EN 1363-1 (CEN 2020) para a resistência ao fogo em termos de isolamento (I), enquanto a temperatura do aço de 350 °C corresponde à temperatura crítica recomendada na EN 1993-1-2 (CEN 2005) para perfis da classe 4, se não forem feitos cálculos adicionais.

3.1 RESULTADOS DO FOGO INTERIOR COM A NORMA ISO 834

Os resultados da resistência ao fogo, relativos ao critério de isolamento (I), com base na superfície não exposta das paredes exteriores são apresentados na Tabela 1 considerando a curva de incêndio

padrão ISO 834 e o aquecimento pelo interior. Na Figura 4, representa-se a evolução da temperatura em duas amostras (A1 e A2) para esta situação.

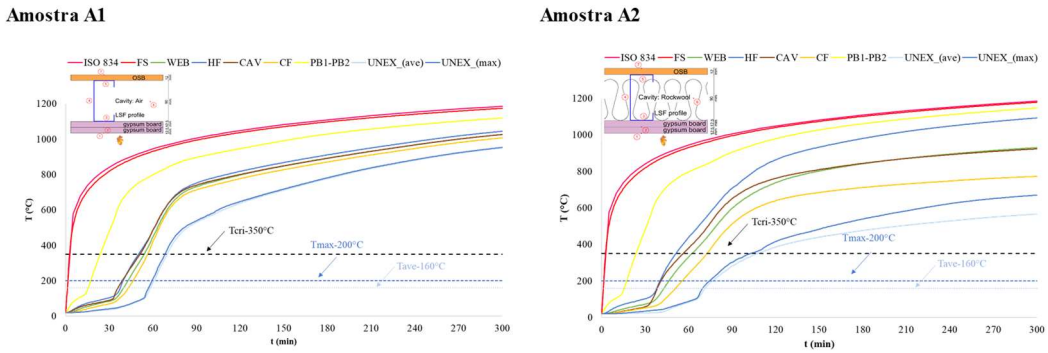


Figura 4: Exemplo de resultados da evolução da temperatura com o tempo durante as simulações numéricas das amostras A1 e A2.

Nas amostras A1, A2, A3, para uma altura de secção enformada a frio de 90 mm e profundidade da cavidade, a resistência máxima ao fogo (I) na superfície não exposta ocorreu para a amostra A3 (*superwool*), atingindo a temperatura máxima T(max) aos 102 min, o que representa um aumento de 27 min em comparação com a amostra A2 (*rockwool*) e 42 min mais elevada do que a amostra A1 (ar, sem material de isolamento). Relativamente à temperatura média T(ave), o valor mais elevado foi encontrado para a amostra A3 (superwool), com 156 min. As outras amostras atingiram a temperatura média, 72 min para a amostra A2 e 58 min para a amostra A1. A amostra A3 demorou mais a atingir a temperatura crítica de 350 °C no perfil LSF nas três regiões medidas (HF, WEB e CF): correspondendo a um aumento de 5,8% e 10%, no banzo aquecido (HF); a um aumento de 17,5% e 37 %, na alma (WEB); e a um aumento de 38,4% e 80,4%, no banzo não aquecido (CF), respetivamente. Para o perfil e profundidade de cavidade de 150 mm, representados pelas amostras A4, A5 e A6, a resistência ao fogo (I) mais elevada foi atingida na amostra A6 (*superwool*), para uma temperatura máxima T(max) de 140 min, com uma diferença de 48 min superior à da amostra A5 (*rockwool*) e 80 min superior à da amostra A4 (ar, sem material de isolamento), respetivamente. Relativamente à temperatura média T(ave), o valor mais elevado foi encontrado para a amostra A6 (*superwool*), com 276 min. As outras amostras atingiram a temperatura média, 87 minutos para a amostra A5 e 69 minutos para a amostra A4. A amostra A6 demorou mais tempo a atingir a temperatura crítica de 350°C nas três regiões (HF, WEB e CF): correspondendo a um aumento de 7,8%, no banzo aquecido (HF); a um aumento de 31,4% e 57,1%, na alma (WEB); a um aumento de 69,7% e 160,3%, no banzo não aquecido (CF), respetivamente.

Em resumo, a resistência ao fogo variou entre 58 min (amostra A1) e 140 min (amostra A6), enquanto a temperatura crítica no perfil de aço foi atingida entre 50 min (amostra A1) e 55 min (amostra A6), no banzo aquecido (HF) e entre 56 min e 151 min no banzo não aquecido (CF). A presença do material de isolamento, como esperado, aumentou a resistência ao fogo das paredes. O facto de a profundidade da cavidade ter aumentado de 90 mm (amostras A1-A3) para 150 mm (amostras A4-A6) resultou num aumento da espessura do material de isolamento que, por sua vez, resultou num aumento da resistência ao fogo por isolamento (comparar as amostras A3 e A6, por exemplo). Por outro lado, a presença do material de isolamento produziu um maior gradiente térmico no perfil de aço, como demonstrado pelo tempo necessário para atingir a temperatura crítica em HF, WEB e CF nas diferentes amostras. Por exemplo, na amostra A4, a temperatura crítica em HF é atingida após 51 min e na CF após 58 min, enquanto que para a amostra A6 os tempos correspondentes são 55 min e 151 min, respetivamente.

3.2 RESULTADOS DO FOGO EXTERIOR COM A NORMA ISO 834

Para os cenários em que o fogo é considerado a partir do exterior, utilizando a mesma curva de aquecimento (ISO 834), os resultados são apresentados no Tabela 2 para as amostras A7-A12. Na Figura 5, mostra-se a evolução da temperatura nas amostras A7 e A8.

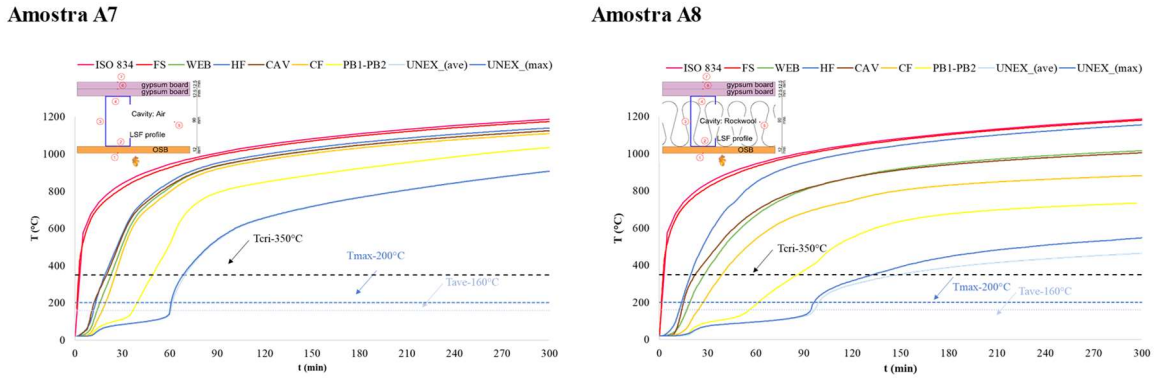


Figura 5: Exemplo de resultados da evolução da temperatura com o tempo durante as simulações numéricas das amostras A7 e A8.

Nas amostras A7, A8 e A9, que correspondem à altura de perfil e profundidade de cavidade de 90 mm, a maior resistência ao fogo (I), com base na superfície não exposta, ocorreu para a amostra A9 (*superwool*), atingindo a temperatura máxima T(max) aos 137 min, correspondendo a um aumento da resistência ao fogo para o isolamento em 41 min em relação à amostra A8 (*rockwool*) e 76 min em relação à amostra A7 (ar, sem material de isolamento). Relativamente à temperatura média T(ave), o valor mais elevado foi encontrado para a amostra A9 (ar, sem material de isolamento), com 235 min. As outras amostras atingiram a temperatura média, 97 min para a amostra A8 e 60 min para a amostra A7. A amostra A9 levou um tempo maior para atingir a temperatura crítica no perfil LSF de 350 °C nas três regiões medidas (HF, WEB e CF): correspondendo a um aumento de 5% e 10,5%, no banzo aquecido (HF); a um aumento de 28,6% e 56,5%, na alma (WEB); e a um aumento de 71,8% e 168%, no banzo não aquecido (CF), respetivamente. Relativamente às amostras A10, A11 e A12, que representam uma altura de perfil e uma profundidade de cavidade de 150 mm, a maior resistência ao fogo (I) na superfície não exposta ocorreu para a amostra A12 (*superwool*), atingindo a temperatura máxima T(max) aos 207 min, o que representa um aumento de 81 min em comparação com a amostra A11 (*rockwool*) e 146 min acima da amostra A10 (ar) (ver Tabela 1). No que respeita à temperatura média T(ave), o valor mais elevado foi encontrado na amostra A12 (*superwool*), com mais de 300 minutos. As outras amostras atingiram a temperatura média, 128 min para a amostra A11 e 61 min para a amostra A10 (ver Tabela 1). A amostra A12 demorou mais tempo a atingir a temperatura crítica de 350°C nas três regiões (HF, WEB e CF): correspondendo a um aumento de 10 % e 15,8%, no banzo aquecido (HF); a um aumento de 53,1% e 104,2%, na alma (WEB); a um aumento de 108,8% e 340,7%, no banzo não aquecido (CF), respetivamente (ver Tabela 1).

Comparando com os resultados obtidos para a exposição interior ao fogo (ver secção anterior), observam-se resultados semelhantes para o caso da superfície não exposta e sem qualquer material na cavidade, onde se atinge uma resistência ao fogo de 60 min na amostra A7 e 61 min na amostra A10, mas as temperaturas críticas no perfil de aço são atingidas mais cedo, ou seja, 19 min para ambas as amostras A7 e A10. Além disso, quando o material de isolamento é considerado na cavidade, a resistência ao fogo (I) aumenta consideravelmente, mas as temperaturas críticas atingidas nos perfis de aço rondam em média os 20 minutos entre as amostras A7-A12, o que é

muito inferior em comparação com os casos em que o fogo está a aquecer a parede a partir do interior e não depende da altura do perfil CFS e, naturalmente, da profundidade da cavidade e do material de isolamento correspondente (comparar amostras A7-A9 e A10-A12). Estes resultados sugerem uma possível inadequação da consideração da mesma metodologia para classificar a resistência ao fogo de paredes exteriores de LSF expostas a incêndios pelo exterior. De facto, embora os resultados mostrem que a mesma resistência ao fogo do isolamento (critério I) pode ser definida, porque as temperaturas críticas no aço são atingidas muito mais cedo, uma análise mais aprofundada da função de suporte de carga (critério R, resistência mecânica) deve ser considerada.

3.3 RESULTADOS DO FOGO EXTERIOR COM A CURVA DE INCÊNDIO DE ELEMENTOS EXTERIORES

Nesta secção apresentam-se os resultados considerando a curva de incêndio exterior, que representa um cenário de incêndio a partir do exterior de um edifício que se propagou para o interior, e que está a afetar a camada exterior das paredes exteriores (amostras A13-A18). A Figura 6 apresenta a evolução da temperatura com o tempo nas amostras A13 e A14.

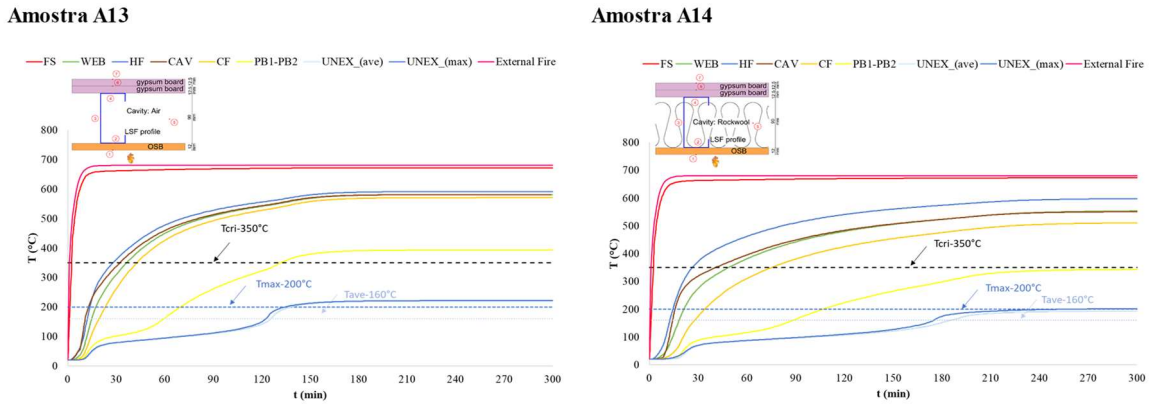


Figura 6: Exemplo de resultados da evolução da temperatura com o tempo durante as simulações numéricas das amostras A13 e A14.

Para esta situação, os resultados mostram um aumento da resistência ao fogo em comparação com a obtida a partir de um incêndio que aquece a camada interior das paredes (A1-A6), bem como um aumento da resistência em comparação com as amostras submetidas às curvas ISO 834 a partir do lado exterior (A7-A12), porque este incêndio representa um cenário de incêndio menos grave (Pancheti, Mahendran, and Steau 2022). A temperatura máxima T(max) e a temperatura média T(ave) na superfície não exposta excederam o tempo de simulação (5 horas) para as amostras: A15 (*superwool* com perfil de 90 mm); A17 (rockwool) com perfil de 150 mm) e A18 (superwool com perfil de 150 mm). Outras amostras obtiveram resultados abaixo do valor limite da simulação numérica, sendo elas: A13 (sem isolamento e com perfil de 90 mm) T(max) = 135 min e T(ave) = 126 min; A14 (*rockwool* com perfil de 90 mm) T(max) = 260 min e T(ave) = 186 min e A16 (ar com perfil de 150 mm) T(max) = 136 min e T(ave) = 127 min.

Relativamente à temperatura crítica atingida no perfil de aço nas amostras aquecidas a partir do lado exterior, A7-A12 com a curva ISO 834 e A13-A18 com a curva de fogo exterior, observam-se as mesmas conclusões, demorando mais tempo a atingir estas temperaturas em todas as amostras nas três regiões. Para o banzo aquecido (HF), a diferença mínima é obtida entre as amostras A11 (20 min) e A17 (25 min), representando um aumento de 25%, enquanto a diferença máxima ocorre entre A9 (21 min) e A15 (33 min), onde se regista um aumento de 57%; para a alma (WEB), estas diferenças

tornam-se de 63% e 133% para as amostras A10 (24 min) e A16 (39 min) e A12 (49 min) e A18 (114 min), respetivamente; e para o banzo não aquecido (CF), as diferenças tornam-se de 70% entre A10 (27 min) e A16 (46 min) e superiores a 152% entre A12 (119 min) e A18 (> 300 min). Estas diferenças, que vão de 25% a mais de 152%, evidenciam a necessidade de uma metodologia coerente para o cálculo da resistência ao fogo das paredes exteriores em LSF, nomeadamente se se pretender determinar o critério de resistência mecânica ao fogo (critério R).

Tabela 1: Resultados numéricos das amostras à temperatura da superfície não exposta e à temperatura crítica nos perfis LSF.

Temperatura máxima e média			Temperatura crítica no perfil LSF			
Amostra	T(max) (min)	T(ave) (min)	Amostra	HF (min)	WEB (min)	CF (min)
A1	60	58	**A1**	50	54	56
A2	75	72	**A2**	52	63	73
A3	102	156	**A3**	55	74	101
A4	60	59	**A4**	51	56	58
A5	92	87	**A5**	51	67	89
A6	140	276	**A6**	55	88	151

Tabela 2: Resultados numéricos da comparação das amostras entre a curva ISO 834 × curva de elementos exteriores à temperatura da superfície não exposta e a temperatura crítica nos perfis LSF.

Temperatura máxima e média			Temperatura crítica no perfil LSF			
Amostra	T(max) (min)	T(ave) (min)	Amostra	HF (min)	WEB (min)	CF (min)
A7	61	60	**A7**	19	23	25
A8	96	97	**A8**	20	28	39
A9	137	235	**A9**	21	36	67
A10	61	61	**A10**	19	24	27
A11	126	128	**A11**	20	32	57
A12	207	>300	**A12**	22	49	119
A13	135	126	**A13**	28	37	43
A14	260	186	**A14**	27	50	76
A15	>300	>300	**A15**	33	75	169
A16	136	127	**A16**	29	39	46
A17	>300	>300	**A17**	25	55	125
A18	>300	>300	**A18**	32	114	>300

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise numérica detalhada da resistência ao fogo de 6 tipos de paredes exteriores submetidas a diferentes cenários de incêndio, utilizando o método dos elementos finitos (2D) para determinar a resistência ao fogo segundo o critério de isolamento (I). Foram consideradas configurações típicas de paredes exteriores com e sem materiais de isolamento e com

duas dimensões de cavidade, nomeadamente 90 e 150 mm, que correspondem às dimensões práticas das secções de aço enformadas a frio. A camada exterior da parede foi considerada com placas de OSB, enquanto que a camada interior foi assumida como sendo feita com placas de gesso. Para o isolamento da região da cavidade, foram considerados dois materiais (*rockwool* e *superwool*).

Com base nos resultados obtidos, mostra-se que a resistência ao fogo (I) variou entre 58 minutos para as paredes LSF sem isolamento e uma cavidade com 90 mm de profundidade e 140 minutos para a parede com uma cavidade de 150 mm com material de isolamento (*superwool*), considerando a curva de incêndio padrão ISO 834. Em termos de material de isolamento, os resultados mostraram, de um modo geral, uma maior resistência ao fogo obtida para as amostras com isolamento de *superwool* na cavidade, em comparação com as outras amostras com isolamento *rockwool* ou sem isolamento. Para além disso, foi observada uma maior resistência ao fogo nas amostras com uma cavidade de 150 mm, em resultado da presença de uma camada de isolamento mais espessa.

Relativamente à consideração da face exposta ao fogo, foi demonstrado que a evolução da temperatura é mais lenta nas paredes LSF quando expostas ao fogo do lado exterior. De facto, comparando o comportamento da mesma tipologia para uma simulação de incêndio padrão, as diferenças podem ser superiores a 60 min para a resistência ao fogo obtida entre um incêndio do lado interior ou do lado exterior. Por outro lado, as temperaturas atingidas num incêndio real, do lado exterior, devem ser menos severas e, nestas circunstâncias, demonstrou-se que a utilização de uma curva de incêndio menos severa (curva de incêndio exterior) pode conduzir a uma resistência ao fogo ainda mais elevada. Este estudo mostra que a temperatura crítica recomendada de 350 °C é atingida muito mais cedo nos perfis LSF quando o aquecimento é considerado a partir do lado exterior. Isto levanta algumas preocupações de que a resistência ao fogo possa ser condicionada, uma vez que os perfis metálicos têm um papel fundamental na capacidade destas paredes, para além do facto de se esperar que também tenham uma função de suporte de carga. Note-se que esta comparação simples e direta entre uma possível exposição ao fogo a partir do exterior utilizando a curva ISO 834 e a curva de fogo de elementos exteriores constitui um exercício meramente académico, uma vez que não representa condições de aquecimento realistas, contudo, consideram-se relevantes pois permitem retirar conclusões interessantes enquanto não se desenvolvem procedimentos mais realistas. Face ao exposto, não é recomendável que a determinação da resistência ao fogo de paredes LSF exteriores seja calculada utilizando a curva ISO 834 e o aquecimento a partir do interior do edifício.

Finalmente, este trabalho salienta a necessidade de se realizarem mais estudos, nomeadamente ensaios experimentais, para validar e confirmar estes resultados. Além disso, estudos numéricos e experimentais podem ser feitos para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento ao fogo de paredes externas LSF construídas com outros materiais comummente utilizados neste tipo de tipologias de paredes externas. Prevê-se ainda no futuro investigar a resistência ao fogo destas paredes quando sujeitas a incêndios pelo lado externo, considerando curvas de incêndio mais realistas como as resultantes de incêndios florestais ou de fachada, colmatando assim uma lacuna identificada na literatura.

REFERÊNCIAS

Alfawakhiri, Farid. (2001). Behaviour of Cold-Formed-Steel-Framed Walls and Floors in Standard Fire Resistance Tests. Carleton Universyty, Ottawa, Ontario, Canada.

ANSYS®. (2018). Academic Research Mechanical, Release 18.2.

CEN, EN 13501-2: Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services, CEN. Brussels:

CEN, 2016.
CEN. (2002). EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire.
CEN. (2005). EN 1993-1-2: Eurocode 3 – Design of Steel Structures - Part 1–2: General Rules - Structural Fire Design.
CEN. (2006). *EN 300: Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, Classification and Specifications*.
CEN. (2020). EN 1363-1: Fire Resistance Tests - Part 1: General Requirements.
Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., Aldina Santiago, and Laím, L. (2016). Review of the High Temperature Mechanical and Thermal Properties of the Steels Used in Cold Formed Steel Structures - The Case of the S280 Gd+Z Steel. *Thin-Walled Structures* 98: 154–68. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.06.002.
Feng, M., Y. C. Wang, and J. M. Davies. (2003). Thermal Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel Panel Systems in Fire. *Fire Safety Journal* 38 (4): 365–94. https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00090-5.
Gnanachelvam, S., Ariyanayagam, A. and Mahendran, M. (2020). Fire Resistance of LSF Wall Systems Lined with Different Wallboards Including Bio-PCM Mat. *Journal of Building Engineering* 32 (June 2019): 101628. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101628.
Gunalan, S. (2011). Structural Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Wall Systems Under Fire Conditions, PhD Thesis, Brisbane (Austrália). Queeslend University of Techology.
Kesawan, S., and Mahendran, M. (2018). A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls. *Fire Technology* 54 (1): 3–35. https://doi.org/10.1007/s10694-017-0669-8.
Laím, L., Rodrigues, J. P. C., and Silva, L. S. (2014). Experimental Analysis on Cold-Formed Steel Beams Subjected to Fire. *Thin-Walled Structures* 74: 104–17. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.09.006.
Magaraboosha nam, H., Ariyanayagam, A. And Mahendran, M. (2020). Fire Resistance of Non-Load Bearing LSF Walls with Varying Cavity Depth. *Thin-Walled Structures* 150 (February): 106675. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106675.
Pancheti, J., Mahendran, M. and Edward, S. (2022). Fire Resistance of External LSF Walls with Corrugated Steel Cladding. *Journal of Constructional Steel Research* 188 (August 2021): 107008. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107008.
Piloto, P., khetta, M. S., and Gavilán, A. B. R. (2018). Loadbearing Capacity of LSF Walls under Fire Exposure 4 (3): 104–24. https://doi.org/10.20319/mijst.2018.43.104124
Roque, E., Oliveira, R., Almeida, R. M.S.F., Vicente, R. And Figueiredo, A. (2020). Lightweight and Prefabricated Construction as a Path to Energy Efficient Buildings: Thermal Design and Execution Challenges. *International Journal of Environment and Sustainable Development* 19 (1): 1–32. https://doi.org/10.1504/IJESD.2020.105465.
N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 78, 2017, Pages 194-209, ISSN 1364-0321.
Torres, L., Couto, C., Vila Real, P., and Piloto, P. (2023). Numerical Study of the Fire Behaviour of External Walls in Light Steel Framing. *Fire Safety Journal* 141 (July): 103946. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103946.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UM PAVIMENTO RADIANTE COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Filipe Rebelo[a]*; António Figueiredo[a]; Ricardo M.S.F. Almeida[b,c]; Romeu Vicente[a]; Victor M. Ferreira[a]

[a]RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal, *Corresponding author: filiperebelo@ua.pt

[b]Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal

[C]CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

RESUMO

O desempenho térmico e energético dos pavimentos radiantes depende da transferência de calor do meio que envolve o sistema de tubagem, que geralmente é uma argamassa. A incorporação de materiais com propriedades de armazenamento de calor latente, como os materiais de mudança de fase (PCM), pode contribuir para a melhoria da eficiência energética e conforto térmico dos edifícios. Incorporar PCM na argamassa dos sistemas de pavimento radiante permite aumentar a capacidade de armazenamento de energia térmica e colmatar a diferença entre períodos de necessidade energética e períodos de disponibilidade de energias renováveis. No entanto, estas argamassas apresentam desafios relacionados com as suas propriedades termofísicas, tais como elevado calor específico e reduzida condutividade térmica. Com o objetivo de avaliar o impacto que a incorporação de PCM microencapsulado tem no desempenho térmico e energético de sistemas de pavimento radiante hidráulico, foi construído um *setup* experimental constituído por dois pilotos, um representativo de uma solução de referência e outro com PCM. Aplicou-se uma argamassa inovadora com PCM microencapsulado num dos pilotos, e procedeu-se ao teste do sistema sob diferentes estratégias de aquecimento intermitente com controlo por: i) relógio; ii) temperatura superficial do pavimento. O aquecimento intermitente com controlo por relógio revelou-se vantajoso para o sistema de pavimento radiante com PCM, quando a estratégia de aquecimento é planeada para combinar energia solar renovável (operação diurna) e tarifa reduzida de eletricidade (operação noturna). Quando a temperatura superficial do pavimento é o parâmetro de controlo da fonte de calor, as propriedades termofísicas da argamassa com PCM condicionaram o desempenho do sistema, apontando para uma inadequação das condições de operação. Para melhor eficiência, o controlo poderá ser efetuado por outros sensores, embebidos na argamassa ou de temperatura ambiente.

Palavras-chave: Sistemas de Pavimento Radiante, Armazenamento de Energia Térmica, Materiais de Mudança de Fase (PCM), Eficiência Energética

1 INTRODUÇÃO

Apesar dos esforços internacionais para limitar o aumento do aquecimento global em 2°C, em 2023 as emissões de carbono atingiram níveis máximos, mantendo-se uma preocupante tendência de crescimento (Friedlingstein et al., 2023; Le Quéré et al., 2021). O impacto ambiental do sector dos edifícios corresponde a um terço do consumo global de energia e um quarto das emissões de CO_2. Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) são os que mais energia consomem, o que demonstra que o conforto térmico no interior dos edifícios é, ainda, a principal razão para o seu elevado consumo de energia (González-Torres et al., 2022).

Ao longo dos últimos anos, os sistemas de pavimento radiante têm vindo a destacar-se face aos restantes sistemas de climatização em edifícios (Rhee et al., 2017). Paralelamente, a mais recente literatura indica que a incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) em sistemas de pavimento radiante inovadores tem elevado potencial para a melhoria da eficiência global do sistema, podendo desempenhar um papel determinante para a descarbonização e sustentabilidade do ambiente construído (Rebelo et al., 2023). Quando incorporados em sistemas de pavimento radiante, a capacidade de armazenamento de calor latente dos PCMs resulta no aumento da inércia térmica de todo o sistema, potencialmente colmatando o desfasamento entre as necessidades energéticas e a disponibilidade de energia renovável, transferindo-se o consumo da eletricidade para climatização dos períodos de ponta para as horas de vazio, ou com disponibilidade de energia renovável (Babaharra et al., 2022; Jin et al., 2022). Cumulativamente, as flutuações da temperatura superficial do pavimento (e respetivos valores máximos) são atenuados, permitindo ao sistema de pavimento radiante manter temperaturas dentro do intervalo de conforto durante mais tempo (Babaharra et al., 2022). Zheng et al. (2024) estudaram numericamente o desempenho de um sistema de pavimento radiante auxiliado por bomba de calor. Os resultados de simulação revelaram uma diminuição do consumo de energia para aquecimento de 35.7%. Em Qi et al. (2023) os autores avaliam a hipótese de substituir a água, enquanto fluído de transferência de calor num sistema de pavimento radiante, por uma solução aquosa com PCM microencapsulado. Utilizando um sistema de pavimento radiante com PCM, Chen et al. (2023) alcançaram melhores taxas de conforto térmico interior a um custo diário de eletricidade mais reduzido, comparativamente a um sistema de pavimento radiante sem PCM. Os autores apontam a condutividade térmica do meio de transferência de calor como fundamental para o desempenho do sistema. Cavazzuti & Bottarelli (2023) avaliaram a combinação de um sistema de energias renováveis que contempla diferentes fontes (ar, solar e geotermia) com um sistema de pavimento radiante com incorporação de PCM. Os autores alcançaram 16% de economia em energia primária, e destacam a importância dos algoritmos de controlo do sistema para um desempenho melhorado.

O meio de transferência de calor que envolve o sistema de tubos (hidráulico) num pavimento radiante é geralmente, no caso de construção mássica, uma argamassa fluída. As propriedades térmicas dessa argamassa são preponderantes para o correto desempenho do sistema. Conforme o demonstra a literatura, o papel do calor específico e da condutividade térmica é fundamental (Chen et al., 2023; Rebelo et al., 2024). Quando PCM microencapsulado é incorporado em argamassa, a microestrutura da mistura resultante é afetada, alterando-se as suas propriedades termofísicas (Berardi & Gallardo, 2019). Li et al. (2024) reportam uma redução de 9% da condutividade térmica por cada 1% de incorporação de PCM microencapsulado. Em Alsaadawi et al. (2022) e Bassim Frahat et al. (2023) é também reportada a perda de condutividade térmica devido à incorporação de PCM microencapsulado em argamassas. Outros autores que referem a mesma redução da condutividade térmica mencionam ainda o aumento do calor específico das argamassas devido à incorporação de PCM (Gbekou et al., 2022; Li et al., 2023). Em Rebelo et al. (2024) desenvolveu-se uma argamassa com incorporação de PCM microencapsulado para aplicação em sistemas de pavimento radiante. Para uma

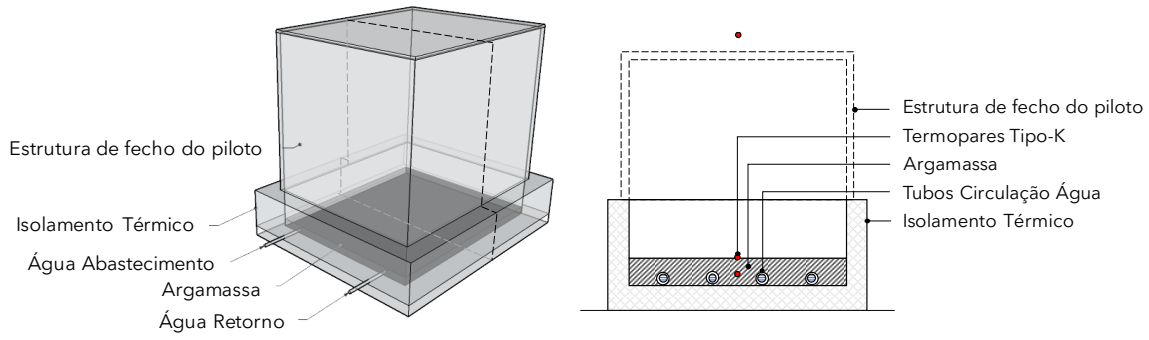
incorporação de 20% de PCM (em peso seco), a mistura resultante apresentou uma redução de 53.5% da condutividade térmica e um aumento do calor específico em 110%. Consequentemente, quando aplicada num piloto experimental, o sistema de pavimento radiante apresentou taxas de aquecimento e arrefecimento reduzidas, comparativamente ao piloto de referência sem PCM. Tal comportamento térmico poderá ser um desafio para o desempenho global do sistema de pavimento radiante com PCM.

A utilização de argamassas com incorporação de PCM microencapsulado em sistemas de pavimento radiante é ainda escassa na literatura, devido aos desafios associados à perda de condutividade térmica e elevado calor específico. Adicionalmente, a grande maioria dos estudos encontrados na literatura acerca do tema é de natureza numérica (Rebelo et al., 2023). Os poucos trabalhos experimentais existentes são de pequena escala, geralmente limitados a instalações reduzidas em ambiente laboratorial (Cesari et al., 2024; Li et al., 2024), o que pode comprometer a representatividade do comportamento térmico observado. Este estudo pretende avaliar o impacto que a incorporação de PCM microencapsulado na argamassa tem no desempenho térmico e energético de um pavimento radiante submetido a diferentes cenários de aquecimento.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

2.1 SETUP EXPERIMENTAL E MATERIAIS

O *setup* experimental é constituído por dois pilotos semelhantes, equipados com sistemas de pavimento radiante hidráulico (RFS), representativos de soluções correntes. Os pilotos experimentais contêm lajes com 1.20m x 1.50m de dimensões horizontais, garantindo a representatividade de escala. O sistema hidráulico está instalado diretamente sobre uma camada de isolamento térmico, com espaçamento de 200 mm entre tubos e uma configuração em serpentina. Por sua vez, os tubos de circulação da água estão completamente embebidos na argamassa. Para minimizar o fluxo térmico periférico e impedir qualquer influência térmica entre pilotos experimentais, 160mm de isolamento térmico constituem as condições de fronteira. Cada piloto experimental inclui uma estrutura de fecho com dimensões 1.20m (largura) x 1.50m (comprimento) x 1.80m (altura), conforme observado na Figura 1. Foram embebidos termopares tipo-K nas argamassas dos sistemas de pavimento radiante, na posição central entre tubos, e aplicados à superfície de cada pavimento na mesma direção vertical. A variável em estudo é a composição da argamassa utilizada em cada piloto experimental.



(a) (b)

Figura 1 – Piloto experimental: (a) representação tridimensional sem escala; (b) vista de secção e localização dos sensores de temperatura.

O meio de transferência de calor que envolve o sistema de tubos de cada piloto experimental é constituído por uma argamassa. Uma composição de referência (Ref.) foi aplicada num dos pilotos, e uma argamassa inovadora com incorporação de PCM microencapsulado foi aplicada no outro. As soluções de argamassa foram desenvolvidas e caracterizadas em Rebelo et al. (2024). As composições utilizadas serão designadas por M_{Ref} - argamassa de referência, e M_{PCM} - argamassa com PCM.

O PCM incorporado é a solução microencapsulada Micronal DS5001X (BASF), com temperatura de mudança de fase (sólido-líquido) de 27.55°C e 97.85J·g^{-1} de capacidade de armazenamento de calor latente, conforme ensaio DSC efetuado em amostras de PCM puro sujeitas a ciclos de aquecimento/arrefecimento de 10°C a 50°C, a uma taxa de 1°C·min^{-1}. As propriedades termofísicas das argamassas estão sumariadas no **Error! Reference source not found.** e estão detalhadas em Rebelo et al. (2024).

Quadro 1 – Propriedades termofísicas das argamassas

Composição	Densidade (kg·m^{-3})	Condutividade Térmica (W·m^{-1}·K^{-1})	Calor Específico (J·kg^{-1}·°C^{-1})
M_{Ref}	2029	0.71	582
*M_{PCM}	1495	0.33	1222

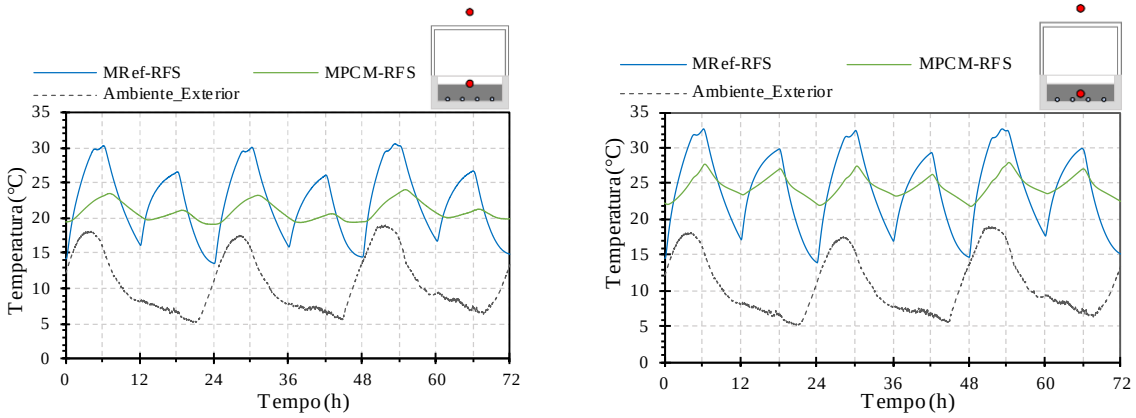
**corresponde à composição M20P3 em Rebelo et al. (2024).*

2.2 ESTRATÉGIAS DE AQUECIMENTO

O *setup* experimental foi submetido a diferentes estratégias de aquecimento intermitente. Em cada estratégia, o controlo da fonte de calor foi efetuado através de: *i)* relógio, e *ii)* temperatura superficial do pavimento. A estratégia de aquecimento com controlo por relógio pretendeu simular a operação do sistema de pavimento radiante combinando a disponibilidade de energia solar renovável (aquecimento diurno) com períodos de horas em vazio (aquecimento noturno). Desse modo, a fonte de calor atuou continuamente durante dois períodos de 6h, das 11h às 17h e das 23h às 05h, sendo desligada nos restantes períodos. O cenário em que foi a temperatura superficial dos pavimentos a controlar a operação da fonte de calor utilizou um intervalo de temperatura definido entre {20°C; 27°C} com o significado de {T_{min}; T_{max}}. Quando a temperatura superficial do pavimento atinge a temperatura mínima definida, a fonte de calor é acionada permitindo ao sistema de pavimento radiante aumentar a sua temperatura até atingir o valor máximo estabelecido à superfície, desligando consequentemente a fonte de calor para aquele piloto em específico. A temperatura de abastecimento da água foi de 45°C, e o caudal foi limitado a 2l·min^{-1}, controlado individualmente com caudalímetros aplicados em cada piloto experimental.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

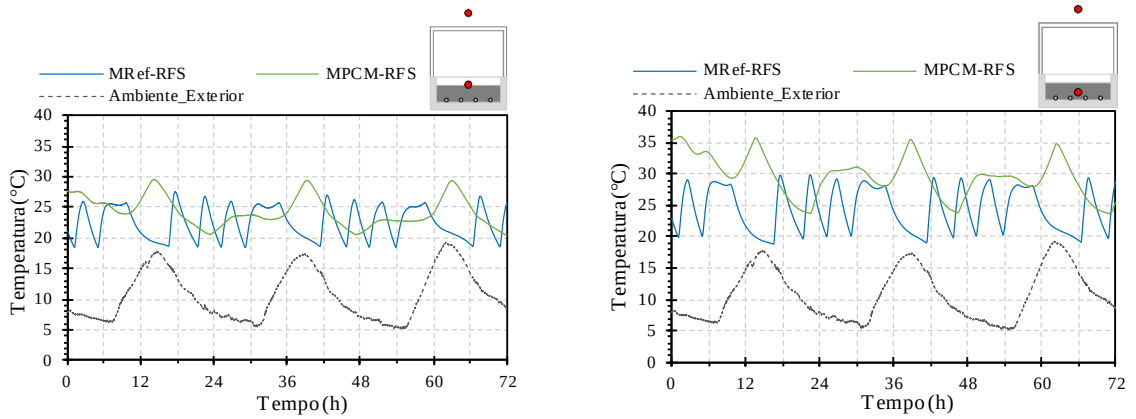
Nesta secção são apresentados os resultados obtidos relativamente aos sistemas de pavimento radiante (RFS) dos pilotos com M_{Ref} e M_{PCM} e procede-se à sua discussão. Os resultados de comportamento térmico são referentes ao sensor localizado na posição central de cada pavimento radiante, à superfície e embebido na argamassa respetiva, entre tubos. Os resultados apresentados nas figuras seguintes são: série azul – M_{Ref}-RFS; série verde – M_{PCM}-RFS; série cinza tracejado – temperatura ambiente exterior. Os resultados de comportamento térmico referentes à estratégia de aquecimento com controlo por relógio são apresentados na Figura 2, e os referentes à estratégia de aquecimento com controlo por temperatura superficial do pavimento na Figura 3.



(a) (b)

Figura 2 – Comportamento térmico dos pilotos experimentais submetidos à estratégia de aquecimento intermitente com controlo por relógio: (a) sensores na superfície do pavimento; (b) sensores embebidos na argamassa.

A Figura 2 revela que as propriedades térmicas da composição M_{PCM} resultam vantajosas quando a estratégia de aquecimento adotada beneficia da operação do sistema em períodos com disponibilidade de energia solar renovável e em horas de vazio. O potencial do PCM para armazenamento de energia térmica combinado com a reduzida condutividade térmica da argamassa presente em M_{PCM}-RFS, resultou na menor flutuação térmica (ΔT) superficial, apresentando um valor médio de 4.37°C. Pelo contrário, M_{Ref}-RFS exibiu um ΔT superficial médio de 16.16°C. A temperatura superficial dos pavimentos atingiu valores máximos de 24.07°C e 30.62°C para os pilotos com M_{PCM}-RFS e M_{Ref}-RFS, respetivamente. Relativamente aos valores mínimos das temperaturas superficiais, o piloto experimental que contém o sistema de pavimento radiante com a composição M_{PCM} registou o valor de 19.13°C, enquanto o piloto com M_{Ref}-RFS registou o valor de 13.55°C. As temperaturas registadas pelo sensor embebido no interior da argamassa, de acordo com a Figura 2 (b), exibiram valores máximos e mínimos capazes de mobilizar o processo de mudança de fase do PCM incorporado, duas vezes a cada ciclo de 24h. A temperatura máxima registada no sensor embebido na argamassa do piloto com M_{PCM}-RFS foi de 27.96°C, com um ΔT médio de 5.77°C. Quanto ao piloto com M_{Ref}-RFS, este exibiu um ΔT com valor médio de 18.41°C, atingindo a temperatura máxima de 32.67°C.



(a) (b)

Figura 3 – Comportamento térmico dos pilotos experimentais submetidos à estratégia de aquecimento intermitente com controlo por temperatura superficial: (a) sensores na superfície do pavimento; (b) sensores embebidos na argamassa.

É através do comportamento térmico resultante da estratégia de aquecimento intermitente com controlo por temperatura superficial que as diferentes propriedades térmicas de M_{Ref} e M_{PCM} se tornam evidentes. Conforme ilustrado na Figura 3, a maior condutividade térmica e o menor calor específico de M_{Ref} implicam a necessidade de ligar e desligar constantemente a fonte de calor. Deste modo, para manter a temperatura superficial do pavimento dentro do intervalo estabelecido, observou-se uma maior intermitência de operação comparativamente ao piloto com M_{PCM}. Este por seu lado exibe um comportamento térmico mais estável, em resultado da combinação da reduzida condutividade térmica e elevado calor específico, com a capacidade de armazenamento de calor latente do PCM incorporado na argamassa M_{PCM}. Consequentemente, os períodos de operação da fonte de calor são superiores relativamente a M_{Ref}-RFS. Apesar de as temperaturas superficiais do pavimento estarem limitadas ao intervalo estabelecido, os valores máximos registados foram de 27.57°C para M_{Ref}-RFS e 29.53°C para M_{PCM}-RFS. No entanto, as temperaturas registadas pelo sensor embebido no interior da argamassa em M_{Ref}-RFS devolveram um máximo de 29.89°C, com uma diferença máxima entre o sensor embebido e o de superfície de 2.55°C. Por seu lado, em M_{PCM}-RFS registaram-se temperaturas no interior da argamassa adequadas para promover a mudança de fase do PCM incorporado, devolvendo valores máximos e mínimos de 36.01°C e 23.63°C. O valor máximo da diferença entre o sensor embebido e o sensor localizado à superfície do pavimento é de 6.48°C. Os resultados obtidos relativamente ao tempo de operação apresentam-se na Figura 4, e correspondem à estratégia de aquecimento com controlo por temperatura superficial do pavimento.

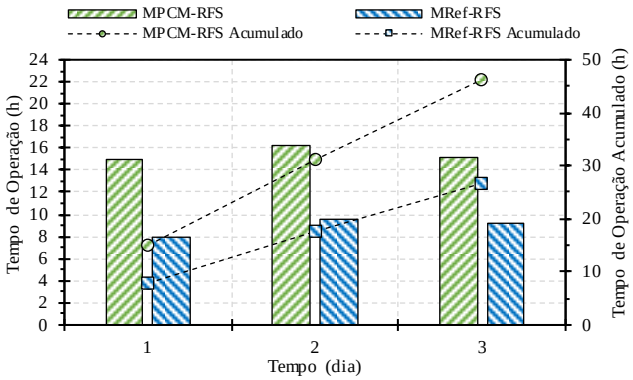


Figura 4 – Tempo de operação: estratégia de aquecimento com controlo através de temperatura superficial do pavimento.

Conforme observado na Figura 4, o desempenho energético dos sistemas de pavimento radiante estudados pode ser inferido através do tempo de operação de cada piloto experimental. Nas condições deste estudo, o piloto com M_{PCM}-RFS necessitou de mais energia para manter a temperatura superficial do pavimento no intervalo de temperatura imposto, uma vez que é aquele que apresenta maiores períodos de operação. As propriedades termofísicas da composição M_{PCM} revelaram-se um desafio quando o controlo da fonte de calor é exercido através de um intervalo predefinido da temperatura superficial do pavimento. O tempo de operação acumulado de M_{PCM}-RFS é de 46.33h, enquanto que M_{Ref}-RFS funcionou durante um total de 26.67h. Pese embora a maior intermitência de operação, a resposta térmica mais rápida da composição de referência M_{Ref} resultou em períodos de operação diários 39.6% a 49.7% inferiores aos registados para o piloto com M_{PCM}-RFS. As propriedades termofísicas de M_{PCM} condicionaram o desempenho energético do sistema de pavimento radiante estudado, apontando para uma inadequação da estratégia de controlo de operação por intervalo de temperatura superficial. Para uma melhoria da eficiência do sistema de pavimento radiante estudado com M_{PCM}, o controlo da fonte de calor poderá ser efetuado através de outros sensores (ou o valor

médio das temperaturas registadas por vários sensores), sejam embebidos na argamassa ou de temperatura ambiente, conforme ilustrado na Figura 3 (b).

4 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstra a importância da estratégia de operação em sistemas de pavimento radiante que incorporam PCM como forma de armazenamento de energia térmica. No que diz respeito à estratégia de aquecimento intermitente com controlo por relógio/temporizador, em que a operação do sistema é definida para tirar vantagem de fontes de energia renovável (solar) combinada com períodos de operação em horas de vazio, as propriedades termofísicas da argamassa com incorporação de PCM (M_{PCM}) resultaram vantajosas, diminuindo a amplitude das flutuações térmicas e mobilizando a mudança de fase do PCM incorporado, duas vezes em 24h. Por outro lado, as propriedades térmicas da composição M_{PCM} revelaram-se mais desafiantes ao desempenho do sistema de pavimento radiante estudado quando a fonte de calor é controlada por um intervalo de temperatura superficial do pavimento. Apesar da maior intermitência de operação, a resposta térmica mais rápida da composição de referência M_{Ref} resultou em períodos de operação diários (e totais acumulados) inferiores aos observados para o piloto experimental com a composição M_{PCM}. Para melhorar a eficiência do sistema de pavimento radiante com M_{PCM}, o controlo da fonte de calor poderá ser efetuado através de outros sensores, embebidos na argamassa ou de temperatura ambiente, ou através do valor médio das temperaturas registadas por vários sensores.

Agradecimentos: Filipe Rebelo agradece o apoio financeiro concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da Bolsa de Doutoramento Ref. 2021.06944.BD. Este trabalho foi também apoiado pela FCT no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECI-CON/3436/2020 *Super Energy Efficient Radiant Floor Systems – SEERFloor*. Este trabalho foi também apoiado pelo Projeto "Agenda ILLIANCE" [C644919832-00000035 | Projeto n°46], financiado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência no âmbito do *Next Generation EU* da União Europeia. Os autores agradecem às empresas Saint-Gobain Portugal e Habivenda Lda. pelos materiais e suporte.

REFERÊNCIAS

Alsaadawi, M. M., Amin, M., & Tahwia, A. M. (2022). Thermal, mechanical and microstructural properties of sustainable concrete incorporating Phase change materials. *Construction and Building Materials*, *356*, 129300. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129300

Babaharra, O., Choukairy, K., Hamdaoui, S., Khallaki, K., & Hayani Mounir, S. (2022). Thermal behavior evaluation of a radiant floor heating system incorporates a microencapsulated phase change material. *Construction and Building Materials*, *330*, 127293. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127293

Bassim Frahat, N., Amin, M., Mohamed Heniegal, A., & Mohamed Omar Ibrahim, O. (2023). Optimizing microencapsulated PCM ratios of sustainable cement mortar for energy savings in buildings. *Construction and Building Materials*, *391*, 131844. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131844

Berardi, U., & Gallardo, A. A. (2019). Properties of concretes enhanced with phase change materials for building applications. *Energy and Buildings*, *199*, 402–414. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.014

Cavazzuti, M., & Bottarelli, M. (2023). Performance analysis of a multi-source renewable energy system for temperature control in buildings of varied thermal transmittance and climate zone. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *187*, 113725. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113725

Cesari, S., Baccega, E., Emmi, G., & Bottarelli, M. (2024). Enhancement of a radiant floor with a checkerboard pattern of two PCMs for heating and cooling: Results of a real-scale monitoring campaign. *Applied Thermal Engineering*, *246*, 122887. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122887

Chen, W., Liu, Y., Liang, X., Luo, F., Liao, T., Wang, S., Gao, X., Zhang, Z., & Fang, Y. (2023). Experimental and numerical investigations on radiant floor heating system integrated with macro-encapsulated phase change material. *Energy*, 128375. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128375

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., … Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, *15*(12), 5301–5369. https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023

Gbekou, F. K., Benzarti, K., Boudenne, A., Eddhahak, A., & Duc, M. (2022). Mechanical and thermophysical properties of cement mortars including bio-based microencapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, *352*, 129056. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129056

González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, *8*, 626–637. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.11.280

Jin, X., Yang, J., Li, M., Huang, G., & Lai, A. C. (2022). Experimental and numerical study on the thermal energy storage performance of a novel phase-change material for radiant floor heating systems. *Building and Environment*, *223*, 109491. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109491

Le Quéré, C., Peters, G. P., Friedlingstein, P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Davis, S. J., Jackson, R. B., & Jones, M. W. (2021). Fossil CO2 emissions in the post-COVID-19 era. *Nature Climate Change*, *11*(3), 197–199. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01001-0

Li, G., Xu, G., & Tao, Z. (2023). Effect on the Thermal Properties of Building Mortars with Microencapsulated Phase Change Materials for Radiant Floors. *Buildings*, *13*(10), 2476. https://doi.org/10.3390/buildings13102476

Li, G., Xu, G., & Zhang, J. (2024). Experimental investigation of thermal and mechanical characteristics of slag cement mortars with PCM for radiant floors. *Case Studies in Construction Materials*, *20*, e02958. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02958

Qi, D., Xie, W., Zhao, C., Song, B., & Li, A. (2023). Evaluation of the integrated performance for floor heating using micro-encapsulated phase change material slurry. *Renewable Energy*, *217*, 119169. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119169

Rebelo, F., Figueiredo, A., Vicente, R., Almeida, R. M. S. F., & Ferreira, V. M. (2023). Innovation and progress in the incorporation of phase change materials into radiant floor systems. *Journal of Energy Storage*, *74*, 109495. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109495

Rebelo, F., Figueiredo, A., Vicente, R., Almeida, R. M. S. F., Paiva, H., & Ferreira, V. M. (2024). Development of innovative mortars incorporating phase change materials and by-products for high performance radiant floor systems. *Construction and Building Materials*, *420*, 135488. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135488

Rhee, K. N., Olesen, B. W., & Kim, K. W. (2017). Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Building and Environment*, *112*, 367–381. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.11.030

Zheng, X., Tang, Z., Wang, Y., & Liu, H. (2024). Performance of the air source heat pump assisted solar heating system combined with PCM floor. *Applied Thermal Engineering*, *239*, 122115. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122115

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E LUMÍNICO DE UM ENVIDRAÇADO FOTOCRÓMICO DE PEQUENA ESCALA

Henriqueta Teixeira[a]; M. Glória Gomes[a]; A. Moret Rodrigues[a]; Daniel Aelenei[b,c]; Isabel Ferreira[d]

[a]CERIS, DECivil, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt, maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt, moret.rodrigues@tecnico.ulisboa.pt

[b]UNINOVA-CTS, DEC, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal, aelenei@fct.unl.pt

[c]LASI, 4800-058 Guimarães, Portugal

[d]CENIMAT|I3N, DCM, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal, imf@fct.unl.pt

RESUMO

O fraco desempenho de envidraçados convencionais de edifícios, usualmente responsáveis por necessidades de climatização significativas e problemas de encadeamento, tem vindo a promover o desenvolvimento de envidraçados inovadores com melhor desempenho.

Os envidraçados fotocrómicos, considerados um tipo de envidraçados inteligentes, apresentam um comportamento dinâmico reagindo na presença/ausência de radiação UV que escurece/clareia o material fotocrómico incorporado no envidraçado.

O objetivo deste estudo é analisar o desempenho térmico e lumínico de um envidraçado fotocrómico, através de ensaios experimentais realizados sob condições ambientais reais de céu nublado e limpo. Utilizaram-se dois protótipos de pequena escala formados por uma caixa em que a face virada para o sol é: i) um vidro simples incolor (referência); ii) o mesmo vidro incolor com película fotocrómica aplicada. A influência da película fotocrómica no desempenho térmico interior foi avaliada medindo as temperaturas do meio interior e exterior e da superfície interior e exterior dos envidraçados. O desempenho lumínico foi analisado comparando a iluminância interior e exterior dos protótipos.

O envidraçado fotocrómico apresentou escurecimento com céu nublado e limpo. A película fotocrómica contribuiu para o aumento das temperaturas superficiais do vidro, mas a temperatura do meio interior foi reduzida até 14%. Os níveis de iluminância interior com o envidraçado fotocrómico foram reduzidos significativamente, obtendo-se valores de transmitância visível entre 0.2-0.4 para céu nublado e 0.1-0.5 para céu limpo.

Palavras-chave: envidraçado fotocrómico, desempenho térmico, desempenho lumínico, pequena escala

1 INTRODUÇÃO

Os envidraçados nas fachadas têm um impacto significativo no desempenho térmico e lumínico dos edifícios afetando, consequentemente, o seu desempenho energético (Hee et al., 2015). Estes envidraçados passivos ficam condicionados pelas condições atmosféricas necessitando de um ajuste de iluminação natural de modo a obter-se um conforto visual e/ou térmico interno. A incorporação de uma camada de revestimento de controlo solar durante o processo de fabrico do envidraçado, ou a aplicação de películas de controlo solar, à posteriori, em envidraçados existentes permitem melhorar o seu desempenho. Estes revestimentos e películas de controlo solar podem ser do tipo neutras, refletoras, duplamente refletoras, de baixa-emissividade ou espectralmente seletivas (Pereira et al., 2022). Apesar de promoverem uma melhoria de desempenho, o seu comportamento estático pode atuar como limitação dada a incapacidade de adaptação a condições ambientais ou ao controlo dos ocupantes.

O aumento do número de edifícios com grandes áreas de envidraçado nas fachadas, de acordo com as tendências da arquitetura atual, aliado à ambição de se promover edifícios sustentáveis com balanço energético nulo (Jaysawal et al., 2022), tem vindo a instigar a investigação e desenvolvimento de tecnologias inovadoras de envidraçados capazes de fornecer um melhor desempenho do que os envidraçados convencionais. Estas tecnologias inovadoras incluem os envidraçados inteligentes que são capazes de reagir a certos estímulos (temperatura, radiação solar ou tensão elétrica), alterando as suas propriedades térmicas e/ou óticas e, assim, de se adaptarem às condições do ambiente que os circunda, equilibrando múltiplos requisitos de desempenho (Rezaei et al., 2017). Este comportamento dinâmico procura reduzir as necessidades de arrefecimento na presença de níveis de radiação solar elevados, maximizar os ganhos solares durante os meses frios e gerir eficientemente a iluminação natural de forma a reduzir o consumo energético de iluminação artificial e promover condições de conforto térmico e visual (Boubekri & Boubekri, 2016).

Os envidraçados fotocrómicos (Cannavale, 2020) são envidraçados inteligentes passivos capazes de alterar de forma autónoma e reversível as suas propriedades óticas em resposta à intensidade de radiação solar, essencialmente no espectro ultravioleta, com o objetivo de controlar os ganhos térmicos solares e a transmissão de iluminação natural para promover condições de conforto e reduzir consumos energéticos. A alteração cromática ocorre devido à incorporação de um material fotocrómico que sofre uma alteração química que escurece o envidraçado quando é exposto a radiação solar, retornando ao estado transparente na ausência de exposição. Este tipo de envidraçado apresenta um processo de produção relativamente simples e não requer instalação elétrica, como é o caso dos envidraçados inteligentes ativos (Ke et al., 2019).

Apesar da investigação científica focada no desenvolvimento de materiais fotocrómicos passíveis de serem incorporados em envidraçados de edifícios ser já relativamente considerável, o número de estudos que avaliam o desempenho de envidraçados fotocrómicos instalados em edifícios é escasso. Segundo um estudo de simulação dinâmica realizado por Tällberg et al. (2019), um envidraçado fotocrómico pode reduzir até 12% o consumo energético total de um gabinete, comparativamente a um envidraçado incolor. A simulação numérica de um edifício de escritórios realizada por Cannavale et al. (2021) mostrou poupanças energéticas até 20% com um envidraçado fotocrómico, comparativamente a um envidraçado incolor. O mesmo estudo mostra um aumento até 20% de níveis de iluminância útil e uma redução até 37% de níveis de desconforto por encadeamento.

Os potenciais benefícios resultantes da aplicação de envidraçados fotocrómicos em edifícios, aliados à escassez do número de estudos sobre o seu desempenho, tornam relevante a investigação do impacto

deste tipo de envidraçado no desempenho energético e no conforto interior de edifícios. Assim, este trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento térmico e lumínico de uma película fotocrómica, aplicada num envidraçado incolor, exposta a radiação solar com céu nublado e limpo. Este estudo permitiu ainda avaliar o comportamento dinâmico desta película.

2 MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo encontra-se esquematizada na Figura 1. Foram utilizados dois protótipos de pequena escala para investigar experimentalmente o comportamento térmico e lumínico de um envidraçado com uma película fotocrómica, comparativamente a um envidraçado incolor. Os ensaios experimentais foram realizados sob condições de céu nublado e de céu limpo. Foram utilizados termopares, luxímetros e piranómetros, conectados a um datalogger, para efetuar as medições de temperatura, iluminância e radiação, respetivamente. O comportamento térmico foi avaliado através da análise da temperatura do ar exterior e interior em cada um dos protótipos, assim como das temperaturas superficiais interiores e exteriores de ambos os envidraçados. O comportamento lumínico foi analisado através dos níveis de iluminância exterior e interior em cada protótipo. As transmitâncias na região do visível e na gama do espectro solar de ambos os envidraçados foram determinadas a partir dos dados experimentais.

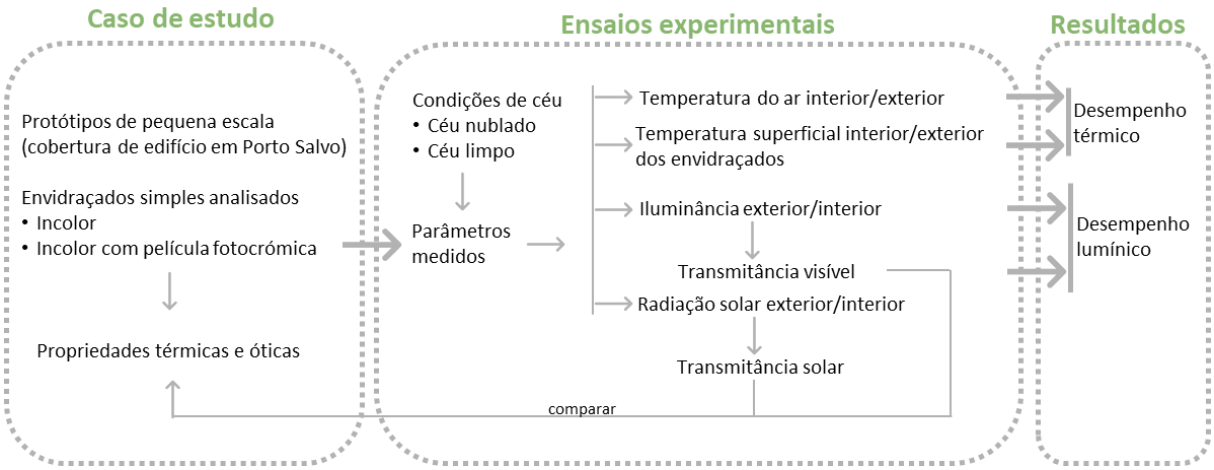
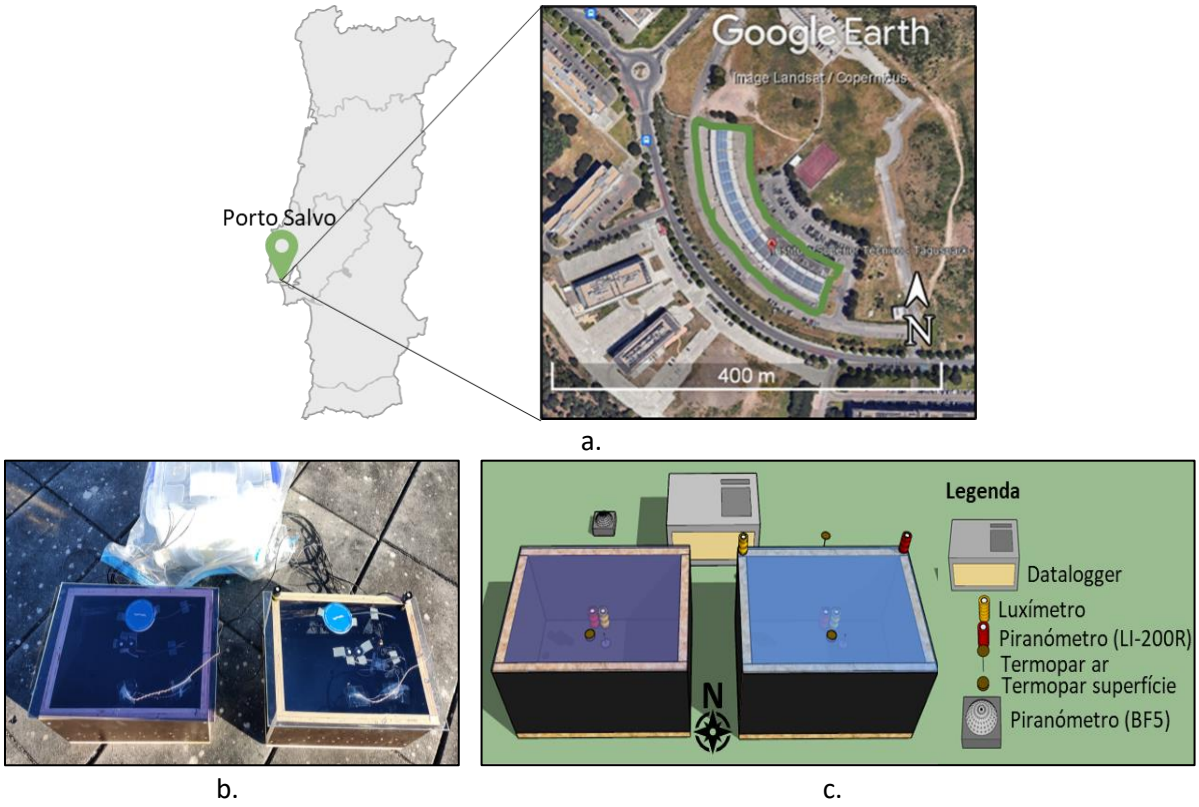


Figura 1 – Metodologia experimental adotada neste estudo

Os ensaios experimentais foram realizados na cobertura do edifício universitário do Instituto Superior Técnico no campus Taguspark, em Porto Salvo (Figura 2a). Foram utilizados dois protótipos de pequena escala (Figura 2b), com dimensões de 0.40m (comprimento) x 0.30m (largura) x 0.22m (altura), construídos com placas de contraplacado marítimo de 0.02m de espessura. A superfície horizontal superior de cada protótipo consistiu no envidraçado a ser analisado: envidraçado simples incolor, considerado como referência, e o mesmo envidraçado com uma película fotocrómica. Os protótipos possuem pequenas perfurações nas placas frontal e de tardoz para promover ventilação natural e evitar a ocorrência de temperaturas excessivamente altas no interior que pudessem danificar o equipamento. O interior dos protótipos em preto permitiu diminuir a reflexão de radiação solar pelas superfícies interiores, evitando uma sobrestimação das medições por parte dos piranómetros e dos luxímetros.

A Figura 2c mostra a identificação e posicionamento do equipamento experimental utilizado. A temperatura do ar exterior e interior, assim como a temperatura superficial exterior e interior de cada envidraçado, foram medidas com termopares tipo-T. A radiação solar exterior (global e difusa) e

interior (global) em cada protótipo, no plano horizontal, foi medida com piranómetros. A iluminância exterior e interior em cada protótipo foi medida com recurso a luxímetros. Os equipamentos foram conectados a um datalogger DL-2e que efetuou medições em intervalos de 1 minuto, registando o valor médio a cada 10 minutos. O modelo, exatidão e respetivo parâmetro medido por cada equipamento é apresentado no Quadro 1. Os parâmetros medidos no protótipo de referência são identificados como "REF", e os medidos no protótipo com a película como "FC".



a.

b. c.

Figura 2 – Ensaios experimentias: a. localização do edifício, b. protótipos (esquerda – envidraçado fotocrómico, direita – envidraçado incolor), b. identificação e posicionamento do equipamento experimental

Quadro 1 – Equipamento experimental utilizado nos ensaios e respetivos parâmetros medidos

Equipamento	Modelo	Exatidão	Parâmetro
Termopar	Tipo-T	±0.2°C a 100°C	Temperatura do ar interior (T_{int}) e exterior (T_{ext}), temperatura superficial interior ($T_{si,REF}$ e $T_{si,FC}$) e exterior ($T_{se,REF}$ e $T_{se,FC}$) do envidraçado
Piranómetro	BF5	±20W/m^2 ± 15%	Radiação solar exterior global ($I_{ext,global}$) e difusa ($I_{ext,difusa}$) em plano horizontal
Piranómetro	LI-200R	±3%	Radiação solar exterior (I_{ext}) e interior ($I_{int,REF}$ e $I_{int,FC}$) global em plano horizontal
Luxímetro	LI-210R	±5%	Iluminância exterior (E_{ext}) e interior ($E_{int,REF}$ e $E_{int,FC}$) em plano horizontal

A constituição dos envidraçados analisados, ambos simples com uma espessura de 6mm, encontra-se representada na Figura 3. A película fotocrómica aplicada na superfície interior do envidraçado é feita

de poliéster, utilizando tecnologia nanocerâmica, tem uma espessura de 55μm e escurece na presença de radiação solar para fornecer proteção solar de acordo com o fabricante.

As principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados analisados foram determinadas recorrendo aos programas Optics (*Optics | Windows and Daylighting*, n.d.) e Window (Curcija et al., 2018), sendo estas apresentadas no Quadro 2. Os espectros de transmitância e refletância (frontal e de tardoz) do envidraçado fotocrómico, obtidos em ensaios no espectrofotómetro realizados anteriormente pelos autores, foram utilizados como input nos programas para obter as propriedades deste envidraçado. O envidraçado fotocrómico apresenta níveis de transmitância solar e visível significativamente baixos, comparando com o envidraçado de referência. O fator solar também foi reduzido na presença da película fotocrómica. A transmissão de radiação ultravioleta através do envidraçado é reduzida na totalidade com o envidraçado fotocrómico.

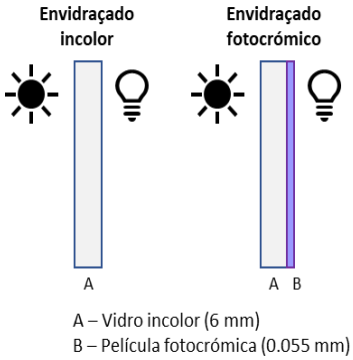


Figura 3 – Constituição dos envidraçados analisados: incolor (esquerda) e fotocrómico (direita)

Quadro 2 – Principais propriedades térmicas e óticas do envidraçado simples incolor sem e com película fotocrómica: coeficiente de transmissão térmica, U; fator solar, g; transmitância solar, τ_{sol}; transmitância visível, τ_{vis}; transmitância ultravioleta, τ_{UV}

Envidraçado	U **[W/m²K]**	g **[-]**	τ_{sol} **[%]**	τ_{vis} **[%]**	τ_{UV} **[%]**
Incolor	5.8	0.9	85	90	60
Fotocrómico (transparente-escurecido)	5.8	0.6-0.5	41-25	74-22	0

Os ensaios experimentais para investigar o comportamento térmico e lumínico da película fotocrómica foram realizados sob condições de céu nublado (10 de fevereiro) e de céu limpo (22 de fevereiro). O comportamento térmico foi analisado a partir dos valores de temperatura do ar interior/exterior e de temperatura superficial interior/exterior dos envidraçados medidos em ambos os dias. O comportamento lumínico foi analisado a partir das medições de iluminância interior/exterior em ambos os dias. As transmitâncias solar (τ_{sol}) e visível (τ_{vis}) de ambos os envidraçados foram determinadas com os dados experimentais através das expressões (1) e (2), respetivamente, e os valores obtidos foram comparados com os do Quadro 2.

$$\tau_{sol} = \frac{E_{ext}}{E_{int}}, \text{ onde } E_{ext} \text{ e } E_{int} \text{ correspondem à radiação solar exterior e interior} \quad (1)$$

$$\tau_{vis} = \frac{I_{ext}}{I_{int}}, \text{ onde } I_{ext} \text{ e } I_{int} \text{ correspondem à iluminância exterior e interior} \quad (2)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios experimentais referentes ao comportamento térmico e lumínico são apresentados respetivamente nas subsecções 3.1 e 3.2. O protótipo de referência, e respetivas medições associadas, são referidos como "REF" e o protótipo com o envidraçado fotocrómico, e respetivas medições associadas, como "FC".

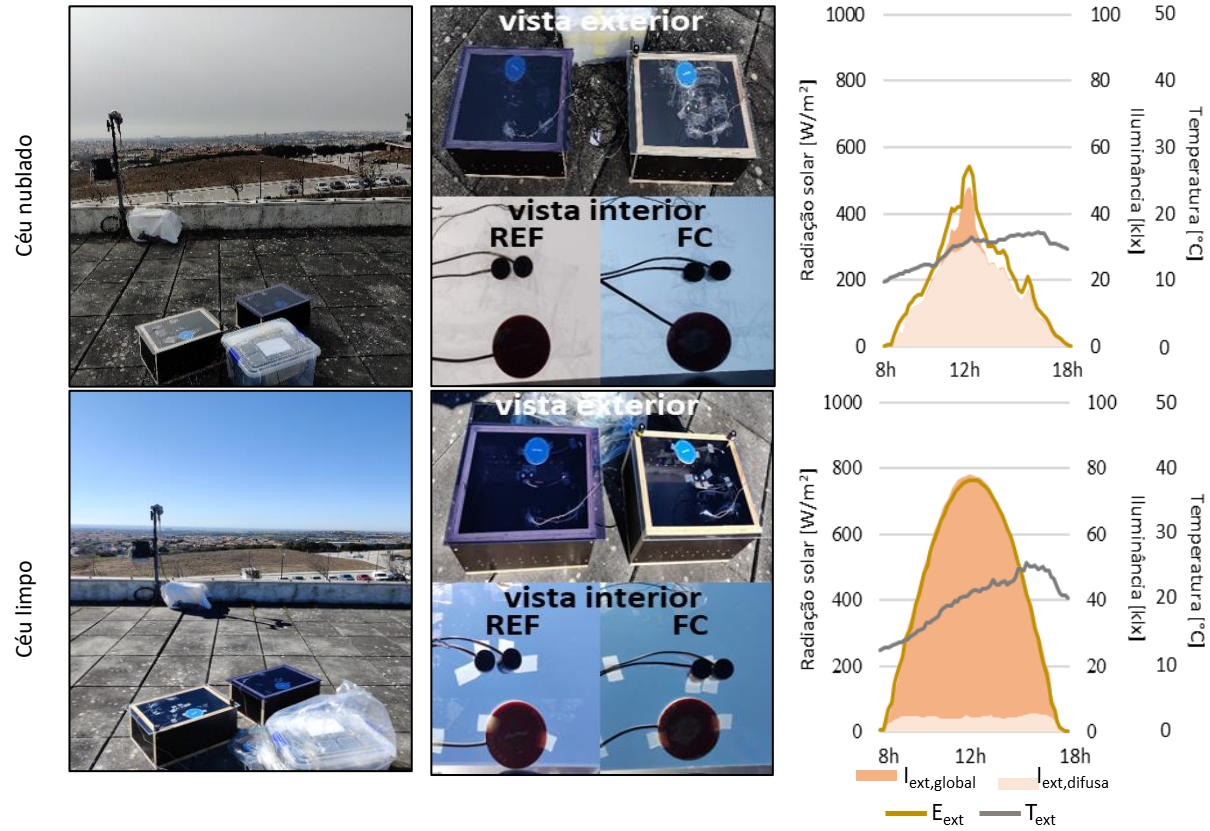
Os valores de radiação solar, iluminância e temperatura do ar exteriores medidos experimentalmente sob céu nublado e céu limpo encontram-se no Quadro 3. Como esperado, os valores de radiação solar global, tanto médio como máximo, registados sob céu limpo foram superiores ao valor máximo registado sob céu nublado. A discrepância entre medições de iluminância de ambos os dias é maior em termos de valor médio do que valor máximo. Foram registados níveis de temperatura mais elevados sob céu limpo, com valores médio e máximo superiores à temperatura máxima sob céu nublado.

Quadro 3 – Valores médios e máximos de radiação solar ($I_{ext,\ global}$ e $I_{ext,\ difusa}$), iluminância (E_{ext}) e temperatura do ar (T_{ext}) exteriores, medidos experimentalmente sob céu nublado e céu limpo

Condição de céu	**$I_{ext,global}$ [W/m²]**		**$I_{ext,difusa}$ [W/m²]**		**E_{ext} [klx]**		**T_{ext} [°C]**	
	$\bar{x}$	**M**	$\bar{x}$	**M**	$\bar{x}$	**M**	$\bar{x}$	**M**
Nublado	178.7	482.9	160.6	328.6	21.2	54.4	14.5	17.2
Limpo	505.1	781.3	44.5	54.6	49.0	76.4	20.1	25.5

Na Figura 4a apresentam-se registos fotográficos da condição do céu nos dois dias selecionados para os ensaios apresentados, e na Figura 4b as respetivas fotografias da vista exterior e interior dos protótipos. Para ambas as condições de céu, é possível observar o escurecimento do envidraçado fotocrómico, que adquire uma tonalidade escura. Nas fotografias da vista interior é bem visível a tonalidade mais azulada que o envidraçado fotocrómico apresenta.

A evolução temporal da radiação solar, iluminância e temperatura do ar registadas ao longo dos dois dias encontra-se representada graficamente na Figura 4c. No dia de céu nublado, ocorreu um pico de radiação solar direta aproximadamente ao meio-dia. No entanto, a radiação solar manteve-se maioritariamente difusa durante este período. Durante o dia de céu limpo, a radiação solar foi sempre maioritariamente direta, com níveis de radiação solar difusa constantemente abaixo de 50W/m^2. A temperatura do ar exterior aumentou ao longo do dia, atingindo temperaturas mais altas durante a tarde, em ambos os dias.



a. b. c.

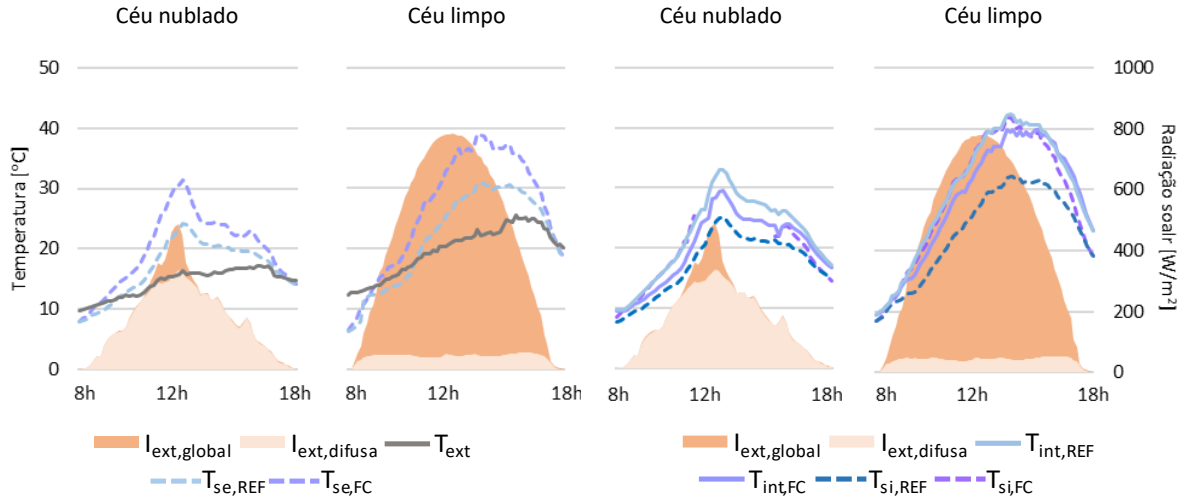
Figura 4 – a. Fotografias da condição de céu, b. Fotografias das vistas exterior e interior dos protótipos, c. Evolução temporal da radiação solar global ($I_{ext,global}$) e difusa ($I_{ext,difusa}$), iluminância (E_{ext}) e temperatura do ar (T_{ext}) exteriores registadas experimentalmente durante os ensaios

3.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO

A evolução temporal da temperatura do ar exterior e da temperatura superficial exterior dos envidraçados encontra-se na Figura 5a. A temperatura superficial dos envidraçados foi superior à temperatura do ar nos dois dias, exceto durante dois curtos períodos (um no início da manhã e outro no final da tarde) em que os níveis de radiação solar incidente nos protótipos eram baixos. Os picos de temperatura superficial de cada envidraçado foram coincidentes com a ocorrência dos valores mais altos de radiação solar, no dia de céu nublado. No entanto, analisando os resultados para o dia de céu limpo, os picos de temperatura superficial ocorreram na parte da tarde, após os valores de radiação mais elevados. Apesar da temperatura do ar exterior variar entre os dois dias, sendo mais elevada no dia de céu limpo, é possível observar nos resultados que o impacto do nível de radiação incidente nos protótipos é mais significativo do que o nível de temperatura exterior, para ambos os dias. Sob ambas condições de céu, a temperatura superficial do envidraçado fotocrómico foi sempre superior, atingindo valores máximos de 31.4°C (céu nublado) e de 39.0°C (céu limpo), comparativamente à temperatura superficial do envidraçado incolor com valores máximos de 24.2°C (céu nublado) e de 30.8°C (céu limpo). Esta discrepância de temperaturas superficiais dever-se-á à absortância da película fotocrómica (mais elevada do que o vidro incolor, Quadro 2) que contribuiu para o aumento de temperatura do vidro incolor utilizado como substrato.

A evolução temporal da temperatura do ar interior em cada protótipo e da temperatura superficial interior de cada envidraçado encontra-se na Figura 5b. A grandeza do impacto da radiação incidente nos protótipos é reconfirmada com estes resultados, com os valores de temperatura mais elevados a

serem associados a níveis de radiação mais altos (céu limpo). No caso do protótipo com o envidraçado incolor, a temperatura interior foi sempre significativamente superior à temperatura superficial do envidraçado, atingindo valores máximos de 33.1°C (céu nublado) e de 42.4°C (céu limpo). Em contraste, no caso do protótipo com o envidraçado fotocrómico, a temperatura interior foi inferior à temperatura superficial durante o período da manhã e superior durante a tarde, em ambos os dias. Este comportamento pode ser explicado pela absorção de radiação solar por parte da película, que contribui para o aumento da temperatura superficial e, consequentemente, para o aumento da temperatura interior após algumas horas de exposição devido à emissão de radiação para o interior. No entanto, a menor transmissão direta de radiação solar permitiu manter a temperatura interior do protótipo com película mais baixa do que a do protótipo de referência, sendo coincidente apenas num período da tarde, com maior duração com céu limpo. A diferença da temperatura interior entre protótipos foi mais notória com céu nublado, enquanto a diferença entre temperatura superficial foi mais significativa no dia de céu limpo.



a. b.

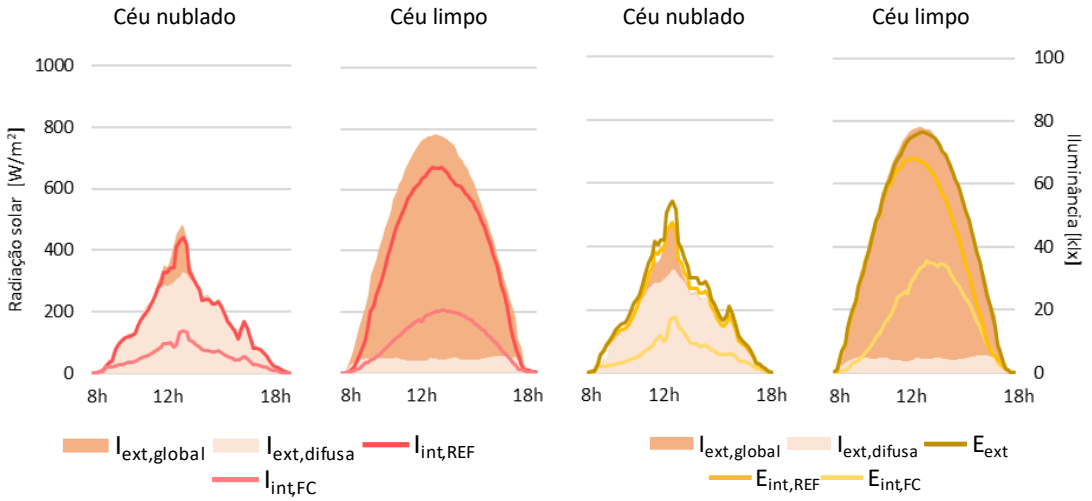
Figura 5 – Resultados do comportamento térmico, em simultâneo com a radiação solar global ($I_{ext,global}$) e difusa ($I_{ext,difusa}$) exterior: a. Evolução temporal da temperatura do ar exterior (T_{ext}) e superficial exterior de cada envidraçado ($T_{se,REF}$ e $T_{se,FC}$), registadas experimentalmente, b. Evolução temporal da temperatura do ar interior (T_{int}) e superficial interior de cada envidraçado ($T_{si,REF}$ e $T_{si,FC}$), registadas experimentalmente

3.2 COMPORTAMENTO LUMÍNICO

O comportamento lumínico dos protótipos foi analisado de forma a determinar o impacto do envidraçado fotocrómico face ao envidraçado de referência na iluminância interior. Complementarmente, o impacto na irradiância interior também foi investigado neste estudo para permitir uma melhor compreensão do comportamento dinâmico da película analisada.

A Figura 6a apresenta a evolução temporal da radiação solar no interior de cada protótipo. No dia de céu nublado, a radiação no interior do protótipo de referência foi semelhante à radiação solar exterior, sendo significativamente superior à registada no interior do protótipo com a película fotocrómica. No dia de céu limpo, os valores registados da radiação solar no interior no protótipo de referência foram semelhantes aos registados no exterior mas apenas no início e no final do dia. O envidraçado fotocrómico foi eficaz a reduzir os níveis de radiação solar no interior do protótipo, atingindo os valores máximos de 134.7W/m^2 (céu nublado) e de 199.7W/m^2 (céu limpo), comparativamente aos valores máximos no protótipo de referência (céu nublado – 431.3W/m^2, céu limpo – 660.9W/m^2).

A evolução temporal da iluminância exterior e interior em cada protótipo é apresentada na Figura 6b. A iluminância interior no protótipo de referência é ligeiramente inferior à iluminância exterior, em ambos os dias, sendo possível observar uma maior discrepância nos resultados com céu limpo. Os níveis de iluminância no interior do protótipo com a película fotocrómica são significativamente inferiores aos registados no interior do protótipo de referência, atingindo valores máximos de 18.3klx (céu nublado) e de 37.3klx (céu limpo), comparativamente aos valores de referência (céu nublado – 48.0klx, céu limpo – 68.7klx). É possível observar uma maior redução dos níveis de iluminância (entre 60-90%) no protótipo fotocrómico durante o período da manhã do dia de céu limpo.



a. b.

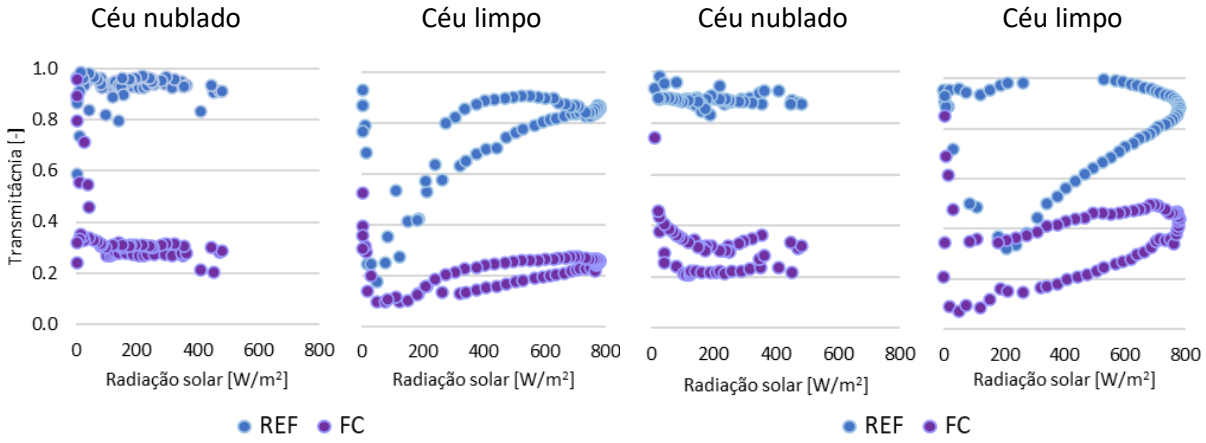
Figura 6 – Resultados do comportamento lumínico, em simultâneo com a radiação solar global ($I_{ext,global}$) e difusa ($I_{ext,difusa}$) exterior: a. Evolução temporal da radiação solar interior em cada protótipo ($I_{int,REF}$ e $I_{int,FC}$), registada experimentalmente, b. Evolução temporal da iluminância exterior (E_{ext}) e interior em cada protótipo ($E_{int,REF}$ e $E_{int,FC}$), registada experimentalmente

As transmitâncias solar e visível de cada envidraçado foram calculadas através do rácio entre os valores de radiação solar e iluminância medidos no exterior e no interior dos protótipos.

A Figura 7a apresenta a transmitância solar dos envidraçados em função da radiação solar exterior. No dia de céu nublado, foram obtidos, maioritariamente, valores de transmitância solar de 0.85-0.95 para o envidraçado de referência e de 0.25-0.35 para o envidraçado fotocrómico. Sob céu limpo, os valores de transmitância são menos estáveis, o que estará relacionado com o equipamento experimental, pelo menos no caso do envidraçado de referência que apresenta um comportamento estático. Os valores obtidos variam, maioritariamente, entre 0.70-0.85 para o envidraçado incolor e entre 0.15-0.25 para o envidraçado fotocrómico, no dia de céu limpo. Comparando os valores obtidos para ambos os dias, foram obtidos valores de transmitância solar para o envidraçado fotocrómico mais baixos no dia céu limpo, o que pode ser justificado pelos níveis elevados de radiação solar neste dia que provocaram um escurecimento mais acentuado do envidraçado. Os valores de transmitância solar obtidos para ambos os envidraçados estão de acordo com os valores apresentados no Quadro 2.

A Figura 7b apresenta a transmitância visível dos envidraçados em função da radiação solar exterior. No dia de céu nublado, foram obtidos valores de transmitância visível, maioritariamente entre 0.85-0.95 para o envidraçado incolor e entre 0.20-0.40 para o envidraçado fotocrómico. Sob céu limpo, os resultados mostram ser menos estáveis, em semelhança ao que foi observado nos resultados da transmitância solar. Foram obtidos valores de transmitância visível, maioritariamente, entre 0.60-0.95 para o envidraçado de referência e entre 0.10-0.50 para o envidraçado fotocrómico, com céu limpo.

Apesar de terem sido obtidos valores de transmitância inferiores para o envidraçado fotocrómico com céu limpo, também foram obtidos alguns valores superiores aos do dia com céu nublado. Os valores de transmitância visível obtidos para ambos os envidraçados estão de acordo com os valores apresentados no Quadro 2, tendo-se atingido valores ligeiramente inferiores sob céu limpo.



a. b.

Figura 7 – Resultados de transmitância de cada envidraçado, em função da radiação solar global exterior: a. Transmitância solar, b. Transmitância visível

4 CONCLUSÕES

Do presente estudo experimental com recurso a dois protótipos de pequena escala podem ser retiradas as seguintes conclusões acerca do comportamento térmico e lumínico de um envidraçado fotocrómico, comparativamente a um envidraçado incolor:

- O envidraçado fotocrómico apresentou escurecimento tanto sob céu nublado, como sob céu limpo. A temperatura superficial no exterior e no interior do envidraçado aumentaram devido à absorção de radiação solar por parte da película fotocrómica. No entanto, foi observada uma redução da temperatura do ar interior no protótipo em ambos os dias, comparativamente ao protótipo de referência.
- A radiação solar no interior do protótipo com película fotocrómica foi significativamente inferior à do protótipo de referência, em ambos os dias, com valores de transmitância solar entre 0.25-0.35 com céu nublado e 0.15-0.25 com céu limpo. Os níveis de iluminância interior com o envidraçado fotocrómico foram reduzidos significativamente, atingindo valores de transmitância visível entre 0.2-0.4 com céu nublado e 0.1-0.5 com céu limpo.

Apesar dos resultados obtidos terem possibilitado uma caracterização geral do comportamento do envidraçado fotocrómico, é necessário realizar estudos futuros em laboratório recorrendo a um simulador solar e a um espectrofotómetro para melhor compreender o efeito da radiação na transmitância do envidraçado e permitir a comparação com resultados em condições reais de radiação.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento da bolsa de doutoramento da primeira

autora PD/BD/150576/2020 (DOI: 10.5449/PD/BD/150576/2020) e pelo financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020). Os autores estendem o seu agradecimento à Clara Pacheco pelo apoio prestado na realização dos ensaios experimentais e à empresa IMPERSOL pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

Boubekri, M., & Boubekri, N. (2016). A Review of the Current State-of-the-Art Smart Glazing and Building Skin Materials Designed to Enhance Daylighting Design and Reduce Energy Consumption in Office Buildings. *The Journal of Macro Trends in Energy and Sustainability*, *4*(1), 47–58.

Cannavale, A. (2020). Chromogenic Technologies for Energy Saving. In *Clean Technologies* (Vol. 2, Issue 4). https://doi.org/10.3390/cleantechnol2040029

Cannavale, A., Zampini, G., Carlucci, F., Pugliese, M., Martellotta, F., Ayr, U., Maiorano, V., Ortica, F., Fiorito, F., & Latterini, L. (2021). Energy and daylighting performance of building integrated spirooxazine photochromic films. *Solar Energy*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.058

Curcija, C., Vidanovic, S., Hart, R., Jonsson, J., & Mitchell, R. (2018). *WINDOW Technical Documentation* (Wind. Envel. Mater. Group, Ed.). Lawrence Berkeley Natl. Lab.

Hee, W. J., Alghoul, M. A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M. A., Alrubaih, M. S., & Sopian, K. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 323–343. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020

Jaysawal, R. K., Chakraborty, S., Elangovan, D., & Padmanaban, S. (2022). Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 11). https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100582

Ke, Y., Chen, J., Lin, G., Wang, S., Zhou, Y., Yin, J., Lee, P. S., & Long, Y. (2019). Smart Windows: Smart Windows: Electro-, Thermo-, Mechano-, Photochromics, and Beyond. *Advanced Energy Materials*, *9*(39), 1902066. https://doi.org/10.1002/aenm.201970153

Optics | Windows and Daylighting. (n.d.). Retrieved January 24, 2020, from https://windows.lbl.gov/software/optics

Pereira, J., Teixeira, H., Gomes, M. da G., & Rodrigues, A. M. (2022). Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 12). https://doi.org/10.3390/app12125923

Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *159*, 26–51. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026

Tällberg, R., Jelle, B. P., Loonen, R., Gao, T., & Hamdy, M. (2019). Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

RELAÇÕES ENTRE A BIOMIMÉTICA E SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

Daniel Rodrigues de Oliveira[a]; Elton Belarmino de Sousa[b]

[a]Afiliação (FAU, USP-Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 876 - Butantã, 05508-080, São Paulo, Brasil), daniel_rodrigues@usp.br

[b]Afiliação (FAU, USP-Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 876 - Butantã, 05508-080, São Paulo, Brasil), eltonbelsousa@usp.br

RESUMO

O presente artigo discute a relação entre as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e a biomimética, destacando sua importância para a promoção da sustentabilidade e a resolução de desafios ambientais e sociais. As SbN utilizam ecossistemas para regenerar e melhorar a qualidade de biomas e áreas verdes. São definidas como soluções inspiradas e apoiadas na natureza, que fornecem benefícios ambientais, sociais e econômicos, promovendo resiliência e biodiversidade. A biomimética busca aprender com a natureza, criando soluções mais eficientes e sustentáveis. É uma abordagem prática para entender como a natureza funciona e replicar suas formas e ecossistemas. Ambas são mencionadas como termos recentes, que vem sendo exploradas e estão em desenvolvimento constante. Embora ambas se inspirem na natureza, as SbN são mais próximas da bio-utilização, enquanto a biomimética se inspira na funcionalidade da natureza. Pois todos os conceitos atrelados à SbN em seu guarda-chuva tem como foco a utilização de ecossistemas como questão principal. Por fim, há a necessidade de combinar SbN com outras medidas para limitar o aquecimento global. Vale lembrar que as SbN não são uma solução única para os desafios ambientais, mas sim uma parte importante de um conjunto de estratégias para promover a sustentabilidade e a resiliência.

Palavras-chave: SbN, Biomimética, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

Desde o final do século passado, a sociedade tem enfrentado e antecipado uma série de desafios, abrangendo desde problemas de saúde humana até a garantia da disponibilidade de recursos naturais como alimentos, água e energia. Além desses desafios, há fatores adicionais que exacerbam sua complexidade, incluindo questões relacionadas à adaptação e mudanças climáticas. Em busca de respostas, a União Europeia (UE) e outras organizações internacionais têm voltado sua atenção para as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) como uma possível fonte de oportunidades e inovações. (Faivre et. Al, 2017).

Tendo surgido no começo dos anos 2000, as SbN tem sido pauta para muita discussão em âmbito internacional, em especial para sua definição. Após muito investimento, com consultores, assembleias e discussões, os grandes órgãos internacionais chegaram em duas principais definições para as SbN, sendo a primeira (i) definida pela *European Comission* (EU) (em português: Comissão Europeia (CE)) (Faivre et. Al, 2017):

> "soluções inspiradas e apoiadas na natureza, econômicas, que fornecem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos e ajudam a promover resiliência. Tais soluções trazem mais natureza e um maior número de elementos e processos naturais para as cidades, paisagens naturais e marinhas, além de mais diversificadas, por meio de intervenções adaptadas localmente, eficientes em termos de recursos e sistêmicas. Soluções baseadas na natureza devem, portanto, beneficiar a biodiversidade e apoiar a entrega de uma gama de serviços ecossistêmicos." (European Comission, 2015)

A segunda principal definição de SbN, concebida pela União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN) é (ii):

> "ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam desafios sociais de forma eficaz e adaptativa, enquanto simultaneamente proporcionam o bem-estar humano e benefícios da biodiversidade". (Cohen-Shacham et. Al, 2016)

A partir da primeira (i) definição, é possível traçar um paralelo direto entre as SbN e a Biomimética, pois ambas "se inspiram" na natureza. Porém, ao fazer uma comparação rápida entre a biomimética e os outros termos que são colocados junto da SbN, dentro do "guarda-chuva de termos", como Infraestrutura Verde (IV), Drenagem Sustentável (DS) e Serviços Ecossistêmicos (SE), nota-se uma estranheza, pois os termos possuem muita correlação entre si, mas não parecem ter alguma relação com a biomimética.

Tomando como ponto de partida a análise bibliográfica, buscando definições e discussões diretas sobre a definição, podendo assim entender se as SbN se inspiram na natureza da mesma forma que a biomimética, surgem algumas questões centrais que serão exploradas e serão abordadas nos resultados e conclusões finais do presente trabalho. Dentre as questões, estão: (1) Toda SbN é também um tipo de biomimética? (2) Todas as soluções baseadas em biomimética são SbN? (3) Quais as relações entre ambos os termos?

Surge a necessidade de entender tanto se as definições possuem relação direta, quanto se existiu uma evolução da definição de ambos os termos, de maneira que esta evolução tenha caminhado para sentidos opostos ou similares.

2 DESENVOLVIMENTO

Desde o final do século passado, a sociedade vem prevendo e sofrendo com diversos desafios, desde questões relacionadas à saúde humana, até a certeza da existência dos recursos naturais para comida, água e energia. Além destes desafios, existem outros agravantes que potencializam a dificuldade destes desafios. Dentre os agravantes, estão as questões que envolvem a adaptação e mudanças climáticas. Em busca de soluções, a UE, e os grandes órgãos internacionais têm mirado nas SbN como possível fator para gerar oportunidades e inovações (Faivre et. Al, 2017).

2.1 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

As SbN são um conceito novo, que surgiu no começo dos anos 2000 – mais precisamente em 2008 em uma publicação do Banco Mundial (BM) – e ganhou muita atenção e incentivo – tanto em termos de oportunidade e notoriedade, quanto em termos financeiros – vindo dos órgãos internacionais, como o próprio BM. No cenário internacional, a discussão se inicia em 2012, quando foi lançado um Programa de Trabalho 2013-2016 pela UICN, e em 2013, a CE passa a dedicar mais atenção às SbN. O foco principal de ambos os órgãos foi debater, através de consultas e diálogos, e produzir conteúdo científico acerca das SbN para se obter uma consolidação do conceito, e torna-lo mais concreto (Faivre et. Al, 2017).

Como resultado dos estudos, os órgãos chegaram nos seguintes resultados:

Segundo a CE:

> "são soluções inspiradas e apoiadas na natureza, econômicas, que fornecem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos e ajudam a promover resiliência. Tais soluções trazem mais natureza e um maior número de elementos e processos naturais para as cidades, paisagens naturais e marinhas, além de mais diversificadas, por meio de intervenções adaptadas localmente, eficientes em termos de recursos e sistêmicas. Soluções baseadas na natureza devem, portanto, beneficiar a biodiversidade e apoiar a entrega de uma gama de serviços ecossistêmicos." (EC, 2015)

Segundo a UICN:

> "ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam desafios sociais de forma eficaz e adaptativa, enquanto simultaneamente proporcionam o bem-estar humano e benefícios da biodiversidade." (Cohen-Shacham et. Al, 2016)

Juntamente da definição da UICN, Cohen-Shacham (2016) salienta que para o total entendimento da definição de SbN, deve-se considerar também oito princípios norteadores, que são:

(i) incorporar normas de conservação da natureza;
(ii) podem ser implementadas sozinhas ou de uma maneira integrada com outras soluções sociais;
(iii) são determinadas por características naturais e específicas e contextos cultuais que incluem conhecimento tradicional, local e cientifico;
(iv) produz benefícios sociais e uma maneira justa e correta, de maneira que promova transparência e vasta participação;
(v) mantém diversidade cultural e biológica e a habilidade de ecossistemas de evoluir com o tempo;

(vi) são aplicadas na escala urbana;
(vii) reconhecem e endereçam as trocas entre a produção de poucos benefícios econômicos para desenvolvimento, e opções futuras para a produção de uma larga gama de serviços ecossistêmicos; e
(viii) são uma parte integral do projeto de políticas e medidas ou ações para endereçar um desafio específico.

Conforme descrito por Eggermont et al. (2015), as SbN podem ser interpretadas de diferentes formas, dependendo da abordagem adotada e das perspectivas das partes envolvidas. Dentre as formas de classificação, uma das mais comuns foi a proposta pelo autor (Eggermont et al, 2015), a quail categoriza as SbN em três tipos distintos.

Quadro 1 – Tipos de SbN, segundo Eggermont et al. (2015) – Elaborado pelos autores

Tipo 1	consiste na mínima intervenção nos ecossistemas, com o objetivo de manter ou melhorar a entrega de uma gama de serviços a partir desses ecossistemas preservados;
Tipo 2	ecossistemas existentes modificados ou recuperados para oferecer melhor os serviços selecionados
Tipo 3	novos ecossistemas criados ou construídos, por meio de, por exemplo, telhados verdes, biovaletas, entre outras estruturas.

Independentemente do contexto, as SbN são percebidas como um conceito de destaque que pode motivar governos, instituições, empresas e indivíduos a desenvolverem abordagens alternativas para incorporar o capital natural em políticas e planejamentos, visando a preservação ou o aumento da biodiversidade e do bem-estar humano (Eggermont et al. 2015).

A principal vantagem das SbN reside em sua multifuncionalidade, pois representam soluções que vão além da resolução de problemas específicos, gerando uma série de benefícios adicionais que atendem a uma variedade de agendas sociais, econômicas e ambientais (Eggermont et al. 2015), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – infográfico destacando os benefícios e os desafios das SbN (CGEE, 2022).

Existem diversas concepções sobre SbN na literatura especializada. Apesar das abordagens variadas, todas convergem para a ideia de que as SbN devem promover a biodiversidade e facilitar a prestação de uma ampla gama de serviços ecossistêmicos, visando aprimorar a qualidade de vida humana e de todos os seres vivos.

Dessa forma, as SbN podem ser compreendidas como um conceito guarda-chuva que inclui uma variedade de termos relacionados (Cohen-Shacham et. Al, 2016), conforme destacado na Figura 2.

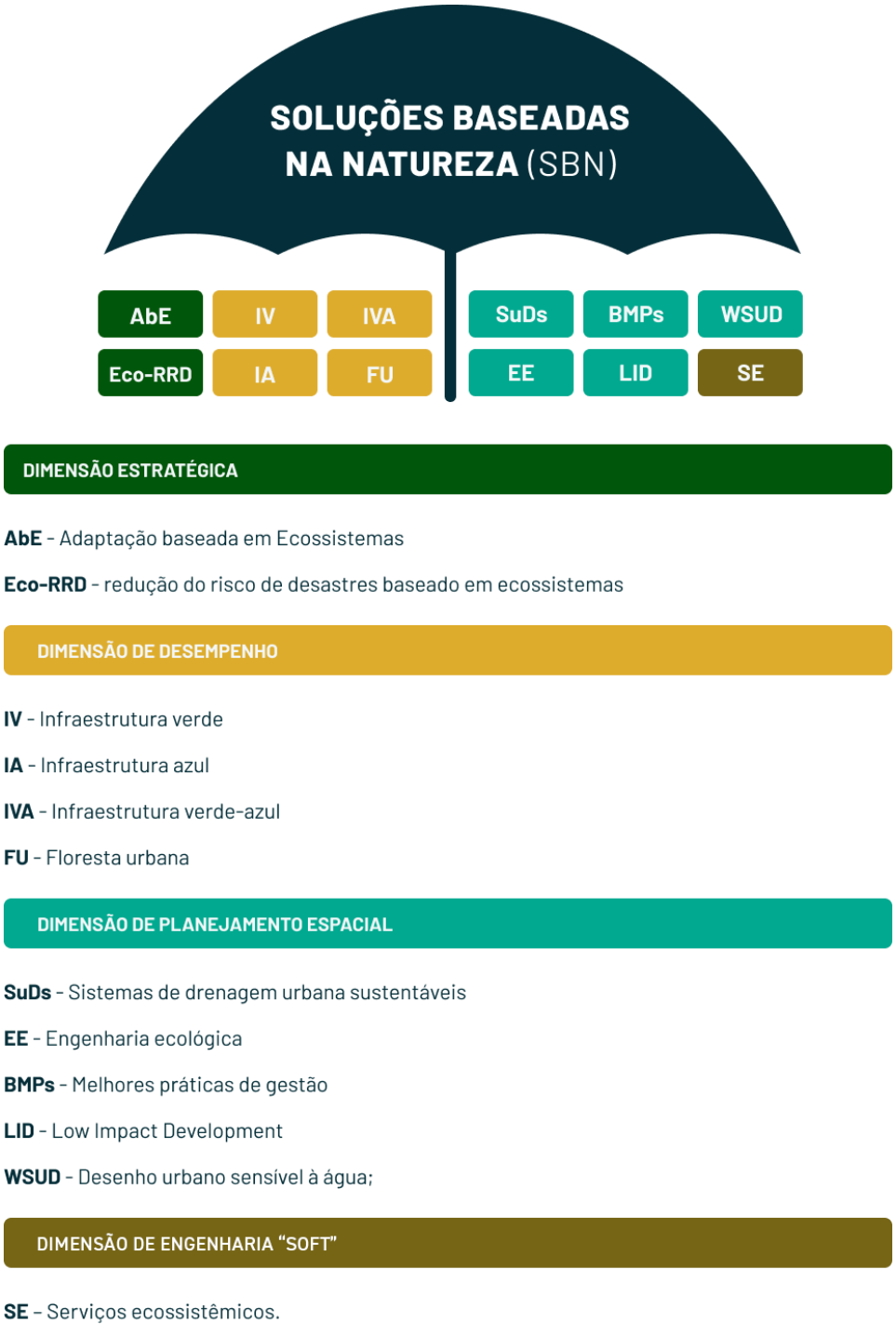


Figura 2 – Principais conceitos existentes e suas relações dentro do conceito guarda-chuva das SbN (CGEE, 2022).

Buscando uma melhoria científica e acadêmica ainda maior, principalmente no âmbito das soluções para os desafios nas cidades, a União Europeia (EU) criou o programa Horizonte 2020 (H2020), que prometia investir até 2020, aproximadamente 80 bilhões de euros em pesquisas, prometendo levar as ideias mais inovadoras diretamente dos laboratórios para o mercado (Gadda et. Al, 2019).

> "Até abril de 2020, 28 projetos foram financiados com consórcios envolvendo universidades, governos locais, empresas, entidades não-governamentais e institutos tecnológicos totalizando aproximadamente 250 milhões de Euros, envolvendo a implementação de projetos demonstrativos e de pesquisa em mais de 100 cidades ao redor do mundo." (Marques et. Al, 2021. p.17)

Já no cenário brasileiro, em 2018 foi a primeira vez que o termo foi abordado na América Latina, em um evento em Brasília. (Marques et. Al, 2021. p.17). Em 2019 houveram mais pesquisas a respeito do tema, em território nacional, sendo o foco difundir e apresentar novos casos no Brasil e também na Europa (Herzog e Rozado, 2019). No mesmo ano, acontece outro grande acontecimento relacionado às SbN, foi publicada a Avaliação Global da Biodiversidade e Serviços Ecossistemicos (AGBSE), realizada pelo IPBES (Plataforma Intergovernamental Científica e Política Sobre a Biodiversidade e os Serviços Ecossistemicos), onde é estimado que aproximadamente 37% da mitigação de mudanças climáticas pode ser alcançada com as SbN, ajudando a cumprir também com as ODS (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável) (Marques et. Al, 2021).

Outro conceito que alguns trabalhos acadêmicos recentemente vêm sugerindo que fazem parte do guarda-chuva de termos da SbN é a biomimética. Devido à sua similaridade na definição, por se tratar de uma solução inspirada na natureza (Dacol et. Al, 2020).

2.2 BIOMIMÉTICA

A biomimética é a ciência que se inspira na natureza para solucionar problemas humanos (Titotto et. Al, 2015). Em 1950 o termo *biomimetics* surgiu com norte-americano Otto Schmitt, utilizado para descrever a transferência de ideias entre a biologia para a tecnologia, sendo que a mesma lógica se aplicava para a biônica, quando se transferia as ideias da biologia para a mecânica/mecatrônica. Porém, em 1997, com a cientista Janine Benyus, o termo *biomimicry* se torna popular por conta de seu livro "*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature"* (em português: Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza) (Vincent et. Al, 2006).

Janine Benyus (2007) define a biomimética em três categorias: (I) Utilização da natureza como modelo; (II) Utilização da natureza como medida; (III) Utilização da natureza como mentora. Ao afirmar que a biomimética usa a natureza como modelo (I), Benyus (2007) quer dizer que é uma ciência que se inspira ou usa os processos de modelos da natureza para resolver problemas humanos. Com relação a usar a natureza como medida (II), Benyus (2007) se refere a um padrão ecológico que a natureza usa para ajuizar e corrigir as nossas inovações, o que funciona como a evolução de Charles Darwin, como a própria menciona em seu trabalho. A natureza como mentora (III) significa que com a biomimética não vamos simplesmente extrair ideias da natureza, pelo contrário, vamos aprender com a natureza o que ela tem de melhor.

Outra definição de biomimética são os três elementos essenciais para se perguntar para a natureza. Esta definição é apresentada pela organização Ask Nature criada e idealizada por Benyus em 2006, e serve como banco de dados para soluções inspiradas na natureza, onde todas as soluções são publicadas. Os três elementos essenciais são: (i) (Re)conectar, (ii) Emular e (iii) Ethos (Benyus, 2006).

O primeiro (i) (Re)conectar envolve a compreensão humana como parte da natureza, partindo do conceito que nós somos a natureza e que devemos encontrar uma maneira de nos comunicar e conectar com o nosso planeta terra (Benyus, 2006).

> "(Re)Conectar como uma prática para nos encorajar a observar e passar mais tempo na natureza para entender como a vida funciona, para que assim nós temos uma melhor Ethos para Emular estratégias biológicas nos nossos designs." (Benyus, 2006)

O segundo (ii) Emular é a parte prática dos elementos, pois consiste no processo de aprender com a natureza e então replicar suas formas e seus ecossistemas de maneira que possamos atingir conceitos mais regenerativos, com base na prática da pesquisa. O terceiro (iii) Ethos significa entender como a vida funciona, seus conjuntos de hábitos, seus costumes e traços, e com base nisso criar inovações que sejam apropriadas para a vida (Benyus, 2006).

3 RELAÇÕES ENTRE SBN E BIOMIMÉTICA

Apesar de aparentemente SbN e biomimética possuírem similaridades apenas na descrição de suas definições, as coincidências começaram antes mesmo da publicação das definições de SbN.

Com base em uma pesquisa bibliográfica, proveniente de uma revisão de literatura com base em dados e bibliotecas virtuais, Stöberl (2019) aponta que dentre os 267 documentos que possuíam o termo "nature based solution", a segunda publicação, de 2012, foi um artigo intitulado "Biomimicry Innovation as a Tool for design".

Cohen-Shacham (2016) aponta que, para deixar claro os termos citados na definição da UICN para SbN, na frase "ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam desafios sociais de forma eficaz e adaptativa, enquanto simultaneamente proporcionam o bem-estar humano e benefícios da biodiversidade", a palavra "ações" significa a necessidade de soluções ativas para os principais desafios sociais, e deixa claro que todas as intervenções por SbN são soluções baseadas pela natureza ou por ecossistemas, descartando intervenções meramente inspiradas pela natureza, como é o caso da biomimética.

Entretanto, no documento de orientação para o uso do padrão global para SbN, publicado pela UICN (2020), ao explicar as SbN no contexto da crise climática, é possível observar que é indicada a diferença entre as Soluções Baseadas na Natureza, Soluções Derivadas da Natureza e as Soluções Inspiradas na Natureza. Ao definir as soluções inspiradas na natureza, é utilizado o exemplo de luvas pegajosas para escalada, inspiradas em lagartos, salientando que estas soluções nem sempre são baseadas no funcionamento de ecossistemas. Por fim, o documento também observa que para atingir os objetivos de limitar o aquecimento entre 1,5ºC e 2,00ºC, é preciso, além de algumas reduções em emissão de combustível fóssil, a combinação destas soluções.

Ainda sobre relações entre definições de termos, existem outros que são confundidos tanto com a definição – já apresentada – de biomimética, e também com as definições – também já apresentadas – de SbN.

> "Design Bio-inspirado" é um termo que é geralmente aceito como uma categoria no guarda-chuva para abordagem do design e da engenharia, incluindo biomimética, que usa a biologia como um recurso para soluções. Enquanto biomimética é um tipo de design bio-inspirado, nem todos os designs bio-inspirados são biomimética. Um fator importante para diferenciar

> biomimética das outras abordagens do design bio-inspirado é a ênfase em aprender e imitar as soluções regenerativas que os sistemas vivos tem para desafios funcionais específicos." (Benyus et. Al, 2006)

O Biomimicry Institue, também criado por Janine Benyus, cita alguns exemplos de processos que são confundidos com biomimética dentro da família dos design bio-inspirados, dentre eles são (i) Bio-morfismo e a (ii) Bio-utilização, conforme ilustrado na figura 3.

O bio-morfismo (i) é o design que traz a morfologia da natureza, ou seja, que parece com a natureza. Enquanto o design biomimético foca na função, em como a natureza funciona em funcionar como a natureza. Outro processo onde também ocorre tal confusão é na bio-utilização (ii), que é a utilização literal da natureza no design, como por exemplo utilizar a madeira, proveniente das árvores, para móveis (Benyus et. Al, 2006).

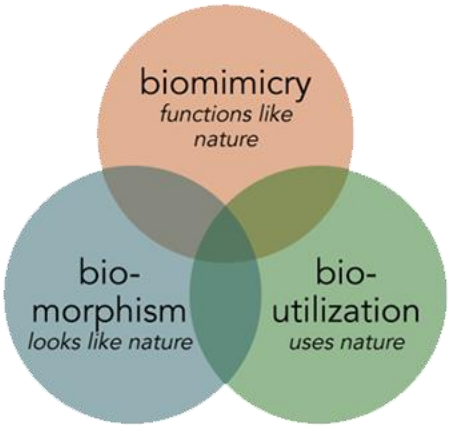


Figura 3 – Família dos design bio-inspirados (Benyus et al. 2006)

4 CONCLUSÕES

É compreensível a relação estabelecida entre SbN e Biomimética por muitos pesquisadores, pois uma das principais fontes de definição afirma que as SbN são inspiradas na natureza, assim como é a biomimética. Entretanto, com base na investigação aprofundada destas definições, foi possível entender a evolução da definição de SbN e da biomimética, e traçar seus paralelos, além de responder as questões inicialmente trazidas na discussão.

As SbN são soluções que utilizam ecossistemas, e seriam, dentro dos processos do design bio-inspirado, mais próximas da bio-utilização, conforme indicado na figura 4. Pois podemos observar que todos os conceitos atrelados à SbN em seu guarda-chuva tem como foco a utilização de ecossistemas como questão principal. Desde as IV até as DS, todos focam em utilizar a natureza, e principalmente, em restaurar os ecossistemas que se encontram em risco, utilizando elementos do próprio ecossistema.

A biomimética, por outro lado, se inspira na funcionalidade da natureza, seja ela um ecossistema, ou um ser vivo. Assim como ressaltado por Cohen-Sacham (2016) e pela UICN (2020), as soluções que se baseiam meramente na natureza e não por ecossistemas não podem ser consideradas SbN, mas sim podem fazer parte de um conjunto de estratégias para se atingir os resultados e objetivos propostos pela SbN.

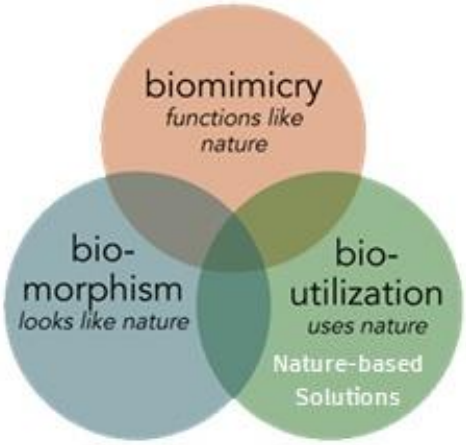


Figura 4 – Família dos design bio-inspirados com as SbN indicadas por similaridade. Adaptado de Benyus et al. (2006).

Neste caso, vale ressaltar as diversas áreas em que a biomimética atua, trazendo soluções para agricultura, arquitetura e construção, energia, moda, transporte, saneamento basico, entre outros (Benyus et al. 2006). Ainda nesta linha de raciocínio, é importante enfatizar a capacidade da biomimética em trazer soluções para muitas das questões apresentadas nas ODS, podendo ser uma potente ferramenta para contribuir com a busca para atender à Agenda 2030.

REFERÊNCIAS

BENYUS, J. M.; SCHWAN, B. Whats is Biomimicry?. The Biomimicry Institute. (2006) Disponível em: < https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/# >. Acesso em: 06.nov.2022.

BENYUS, J. M. About: Ask Nature. (2006). Disponível em: < https://asknature.org/about/ >. Acesso em: 06.nov.2022.

BENYUS, J. M. Biomimética: inovação inspirada pela natureza. São Paulo: Pensamento-Cultrix Ltda, 2007.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Catálogo brasileiro de soluções baseadas na natureza. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022. 29 p.

COHEN-SHACHAM, E.; WALTERS, G.; JANZEN, C. & MAGINNIS, S. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN, 2016, p. xiii-97.

DACOL, KELLI CRISTINA; TISCHER, WELLINGTON. A Relação entre soluções baseadas na natureza e serviços ecossistêmicos: uma análise bibliométrica. Revista GeoNordeste, 2, 172-191, 2020.

EGGERMONT, H. ET AL. (2015) Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, Volume 24, Number 4, pp. 243-248(6). https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9

EUROPEAN COMMISSION (EC) (2015). Horizon 2020 expert group on Nature-based solutions and re-naturing cities. Final Report: Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Brussels. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980- d5aa-46df-8edc-af367cddc202>. Acesso em 13/06/2021.

FAIVRE ET AL. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. Environmental Research, Volume 159, November, Pages 509-518.

FRAGA, R. G.; SAYAGO, DORIS ALEIDA VILLAMIZAR. Soluções baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito. Parcerias Estratégicas, CGEE, v. 25, n. 50, pg. 19-36, 2020.

IUCN (2020). Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions. First edition. Gland, Switzerland: IUCN.

MARQUES, T. H. N., RIZZI, D., FERRAZ, V., HERZOG, C. P. (2021) Soluções Baseadas na Natureza Conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru. Revista LABVERDE. FAUUSP. São Paulo, v. 11, n. 01, e189419, 2021. https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189419

STÖBERL, A. P. M.; DIAZ, L. T.; GADDA, T. M. C.; VELLOZO, L. D. Trajetória do conceito Soluções Baseadas na Natureza e a relação com o Brasil: uma análise bibliográfica. In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 18., 2019, Natal, RN. Anais[...]. Natal: UFRN, 2019. ISSN: 1984-8781.

TITOTTO, S., OLIVEIRA, D., FERRANTE, A. (2015). Space and energy: relationships among architects from nature. Scientific research and Information Technology Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione Vol 5, Issue 1. E-ISSN 2239A4303, DOI 10.2423/i22394303v5n1p115

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2021). State of Finance for Nature 2021. Nairobi.

VINCENT, J.F.V.; BOGATYREVA, O.A.; BOGATYREV, N.R.; BOWYER, A.; PAHL, A.K. Biomimetics: Its practice and theory. J. R. Soc. Interface2006, 3, 471–482. https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS E MACROSCÓPICOS E DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA UTILIZANDO REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

Luís Pereira[a]; Luís Godinho[b]; Fernando G. Branco[c]; Paulo da Venda Oliveira[d]

[a] - Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, lfmpereira@student.uc.pt

[b] - Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, lgodinho@dec.uc.pt

[c] - Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, fjbranco@dec.uc.pt

[d] - Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, pjvo@dec.uc.pt

RESUMO

O betão poroso com argila expandida, devido à sua porosidade inerente, torna-se um material acústico interessante e eficaz, aplicado em inúmeros cenários como autoestradas, aeroportos e estruturas arquitetónicas, devido à sua capacidade de mitigar a poluição sonora, absorvendo e amortecendo as ondas sonoras. É geralmente aceite que propriedades macroscópicas como a porosidade aberta, tortuosidade ou resistividade ao fluxo de ar desses materiais desempenham um papel fundamental na definição do processo de absorção interna. Este estudo explora a aplicação de redes neuronais artificiais (ANNs) personalizadas para prever primeiro as propriedades macroscópicas (porosidade aberta, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar) e depois o coeficiente de absorção sonora (α) destas misturas de betão poroso, utilizando apenas dois parâmetros de entrada (classe de tamanho da argila expandida e densidade dos provetes). Os resultados demonstram a eficácia da abordagem ANN proposta na previsão precisa das propriedades macroscópicas e do coeficiente de absorção sonora destas misturas, tornando possível obter tais parâmetros importantes de forma eficaz e muito mais simples.

Palavras-chave: Betão Poroso; Redes Neuronais Artificiais, Parâmetros Macroscópicos; Coeficiente de Absorção Sonora.

1 INTRODUÇÃO

O betão poroso, especialmente quando composto por agregados de argila expandida, emergiu como um material versátil com inúmeras aplicações em cenários de construção, desde pavimentos onde é desejada uma drenagem rápida para o solo, como isolamento térmico especialmente em zonas de climas frios, passando pelo isolamento acústico em vias de comunicação e também em ambientes industriais, entre outras utilizações (Kurpińska et al., 2021). Originalmente apreciado pelas suas características leves e ecológicas, o betão poroso evoluiu para desempenhar um papel crucial no controlo do ruído e na engenharia acústica, tanto em ambientes interiores como exteriores (Asdrubali and Horoshenkov, 2002). Estes materiais permitem atingir uma absorção sonora elevada, devido à sua estrutura única, que facilita uma absorção sonora eficaz, promovendo múltiplas interações das ondas sonoras dentro do material, dissipando-as e atenuando-as eficazmente (Tay and Yip, 1989; Horoshenkov and Swift, 2001). Adicionalmente, apresentam características mecânicas aceitáveis e capacidade de resistir às condições atmosféricas durante longos períodos de tempo, contribuindo também para a redução do peso das estruturas e sendo considerados alternativas baratas e fáceis de aplicar em comparação com outros tipos de betão poroso (Zaetang et al., 2013; Vasina et al., 2006).

A compreensão do comportamento acústico do betão poroso requer a caracterização de parâmetros como porosidade, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar. Estes parâmetros podem ser determinados diretamente ou através do uso de modelos teóricos como o método de Horoshenkov-Swift, entre outros. A determinação direta nem sempre é fácil devido a propriedades específicas do material, como a baixa densidade e poros fechados não conectados, e exige a preparação e ensaios laboratoriais de provetes, com o investimento inerente de tempo e recursos financeiros. As metodologias inversas requerem a avaliação prévia da impedância de superfície e do coeficiente de absorção sonora (Horoshenkov and Swift, 2002).

Este estudo aplica de forma inovadora redes neuronais artificiais (ANNs) para prever com precisão parâmetros cruciais do comportamento acústico do betão poroso (porosidade aberta, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar), contornando as limitações dos métodos tradicionais, como ensaios laboratoriais demorados e modelos teóricos complexos. Ao requerer apenas dois parâmetros de entrada de fácil obtenção (a classe dimensional do material e a densidade da mistura), a metodologia ANN aplicada nesta pesquisa simplifica o processo de caracterização, oferecendo uma solução mais eficiente e económica para otimizar formulações de betão poroso para requisitos acústicos específicos. O parâmetro de entrada classe dimensional é fornecido pelo fabricante, e a densidade foi determinada experimentalmente, pesando e medindo os provetes. No que concerne aos parâmetros de saída, a porosidade aberta foi obtida experimentalmente, e a tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar foram determinadas aplicando um método inverso, que exigia os dados experimentais resultantes do teste de tubo de impedância (ISO 10534-2, 2001), a impedância de superfície e o coeficiente de absorção sonora (Pereira et al., 2019).

Para este estudo, um extenso conjunto de amostras foi produzido utilizando diversas misturas de betão poroso, baseadas em três categorias distintas de agregados. Essas amostras foram testadas utilizando o método do tubo de impedância, e os parâmetros macroscópicos associados foram subsequentemente estimados. A estimativa foi realizada por inversão, no caso da tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar, ou por meio de medição direta, para determinar a porosidade aberta. Um modelo ANN foi então treinado, usando este conjunto de parâmetros e considerando os parâmetros de entrada mencionados anteriormente (densidade e classe de tamanho). Os valores dos parâmetros macroscópicos previstos pela ANN (porosidade aberta, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar) foram então usados para estimar o coeficiente de absorção (α) para o intervalo de frequência de

125Hz-2000Hz utilizando o modelo semi-fenomenológico proposto por Horoshenkov-Swift (Horoshenkov and Swift, 2001).

A aplicação de metodologias de aprendizagem computacional com o intuito de prever o coeficiente de absorção sonora de diferentes tipos de materiais já se mostrou uma abordagem confiável e precisa, como demonstrado em materiais fibrosos (Jeon et al., 2020), espumas de alumínio (Liang et al., 2020), painéis de madeira perfurados (Der Lin et al., 2009), ou mesmo em ressoadores de Helmholtz combinados com estruturas porosas (Gao et al., 2022), entre outras aplicações. No que diz respeito ao objetivo específico de prever o coeficiente de absorção sonora, os algoritmos de aprendizagem computacional são por vezes utilizados em associação com métodos numéricos, sendo cada vez mais aplicados em diversos setores da atividade humana, desde estúdios musicais e auditórios até aplicações aeroespaciais (Ciaburro et al., 2021; Le Clainche et al., 2023).

2 MATERIAIS, PREPARAÇÃO DOS PROVETES, E MÉTODOS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na preparação dos provetes utilizados nos ensaios foram: água da rede de abastecimento público, cimento Portland tipo 1 (42,5R) e três classes granulométricas de argila expandida com a designação comercial "0-2", "2-4" e "3-8". A dimensão destas três classes de argila expandida foi verificada através de um processo de peneiração, que envolve a passagem do material granular por uma sequência de peneiros com tamanhos de malha decrescentes e o registo da quantidade de material retida por cada peneiro como uma fração da massa total. O procedimento detalhado está patente na norma de ensaio NP EN 993-1:2014.

A Figura 1 mostra as diferentes classes de tamanho de argila expandida utilizadas neste estudo.

Figura 1 - Amostras não ligadas das classes de tamanho de argila expandida utilizadas neste estudo: a) "0-2"; b) "2-4"; e c) "3-8". Adaptado de Pereira et al., 2019.

Os provetes utilizados neste estudo consistem na mistura de cimento Portland 42,5 de elevada resistência, água e as três classes granulométricas de argila expandida, em diferentes proporções, explanadas na tabela 1. As misturas foram então moldadas em tubos circulares de diferentes espessuras (4, 6 e 8 cm), todos com diâmetro de 10,1 cm, e identificadas como Mistura 1, Mistura 2 e Mistura 3. Após 48 horas, os provetes foram retirados dos moldes para passarem por um processo de cura com duração de 30 dias, dentro de uma sala com temperatura (20±2ºC) e humidade (95±5%) controladas.

*Tabela 1 - Resumo das misturas utilizadas neste estudo (adaptado de Pereira et al., 2019). * - Proporção Agregado/Cimento/Água, em percentagem.*

Mistura	A/C/W* (%)	Designação Comercial	Espessura (cm)
Mistura 1	48.48/34.43/17.20	2-4	4
			6
			8
		3-8	4
			6
			8
Mistura 2	43.96/37.36/18.68	0-2	4
			6
			8
		2-4	4
			6
			8
		3-8	4
			6
			8
Mistura 3	40.17/38.89/19.92	0-2	4
			6
			8

2.1 METODOLOGIA HOROSHENKOV – SWIFT (H-S)

Horoshenkov e Swift desenvolveram uma metodologia teórica capaz de prever com precisão as propriedades acústicas de materiais de betão poroso consolidado, a partir de quatro parâmetros não acústicos: (i) porosidade aberta, (ii) tortuosidade, (iii) desvio padrão da dimensão dos poros, e (iv) resistividade ao fluxo de ar. Neste estudo, esses parâmetros foram obtidos utilizando um algoritmo genético para procurar ao longo de uma gama de limites físicos conhecidos por serem aceitáveis para este tipo de material. O modelo assume um cenário onde uma amostra porosa de estrutura rígida, possuindo uma área de secção transversal S_0, é penetrada por poros uniformes com diferentes seções transversais. Esses poros são idealizados como uma série de tubos capilares com formas específicas, e os seus tamanhos aderem a uma distribuição estatística única (Umnova et al., 2000; Vasina et al., 2006; Asdrubali and Horoshenkov, 2002).

2.2 MACHINE LEARNING

As metodologias de aprendizagem computacional (ou machine learning - ML) conseguem analisar dados incompletos ou imperfeitos e encontrar relações não lineares entre as variáveis de um dado sistema (Jong et al., 2021; Zhang et al., 2021). Uma Rede Neuronal Artificial (ANN) é um modelo matemático (ou computacional) que mimetiza os aspetos estruturais e funcionais das redes neuronais biológicas. Consiste em um grupo interconectado de neurónios artificiais e processa informações usando uma perspetiva computacional conexionista, alterando sua estrutura com base num conjunto de informações em constante evolução ao longo da fase de aprendizagem/treino. Um algoritmo supervisionado utiliza um conjunto dado de parâmetros de entrada e saída para treinar um modelo que permita a estimativa desses parâmetros de saída na presença de novos parâmetros de entrada. Isso permite a comparação dos valores previstos com os valores reais, facilitando a melhoria da precisão do modelo de previsão (Flores, 2021). A metodologia de aprendizagem supervisionada emprega duas técnicas para treinar modelos: regressão e classificação. A regressão prevê respostas

contínuas, enquanto a classificação prevê respostas discretas (classes). Neste estudo, foi utilizado o modelo de regressão.

Esta metodologia é frequentemente aplicada em diversos setores da atividade humana, com um natural destaque para os testes não destrutivos, essenciais na monitorização da condição de estruturas já construídas e/ou em utilização. Desempenha também um papel relevante na identificação e avaliação de patologias, aferindo, por exemplo, o risco de deslizamentos de terra e monitorizando, através de emissões acústicas, o ritmo de desenvolvimento de fissuras. Adicionalmente, ajuda na previsão de parâmetros mecânicos e físicos, reduzindo ou anulando a necessidade de ensaios laboratoriais ou *in situ* (Pereira et al., 2023; Lee et al., 2021).

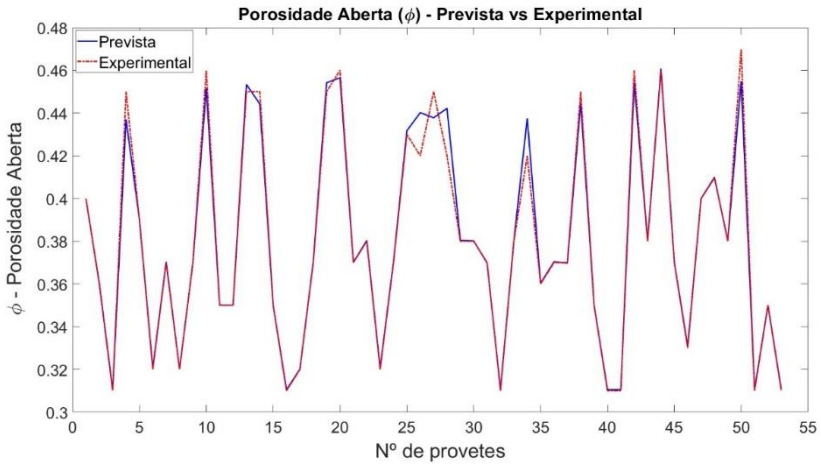
A base de dados utilizada para treinar o modelo de ANN era inicialmente composta por 88 provetes, mas a aplicação de uma função MATLAB para identificar e remover valores atípicos que pudessem comprometer o desempenho do modelo ANN reduziu a sua dimensão para 82 provetes. Posteriormente, esta base de dados foi dividida aleatoriamente em subconjuntos de treino, teste e validação, com 70% da base de dados sendo (aleatoriamente) alocada para o set de treino e 15% para cada um dos subconjuntos restantes (teste e validação). Esta proporção percentual é frequentemente aplicada em pesquisas semelhantes (Tola et al., 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

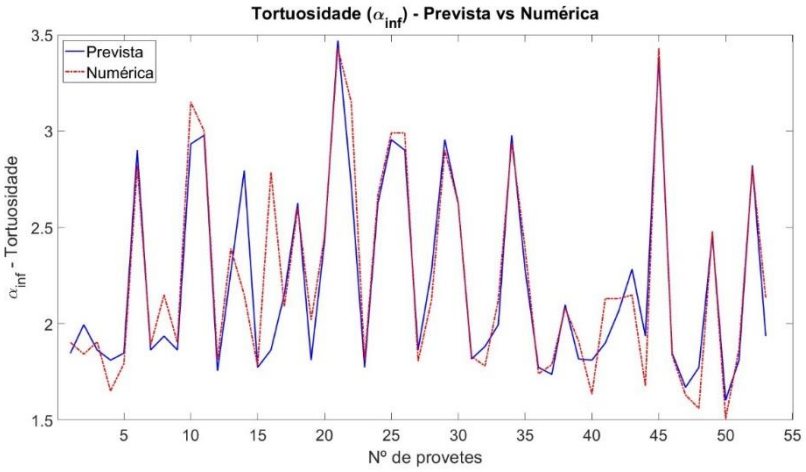
A previsão dos três parâmetros macroscópicos (porosidade aberta, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar) obtida pelo modelo de rede neuronal artificial e a comparação com os mesmos parâmetros obtidos pelo algoritmo inverso baseado na metodologia semi-fenomenológica de Horoshenkov-Swift (H-S) são apresentados abaixo.

3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MACROSCÓPICOS

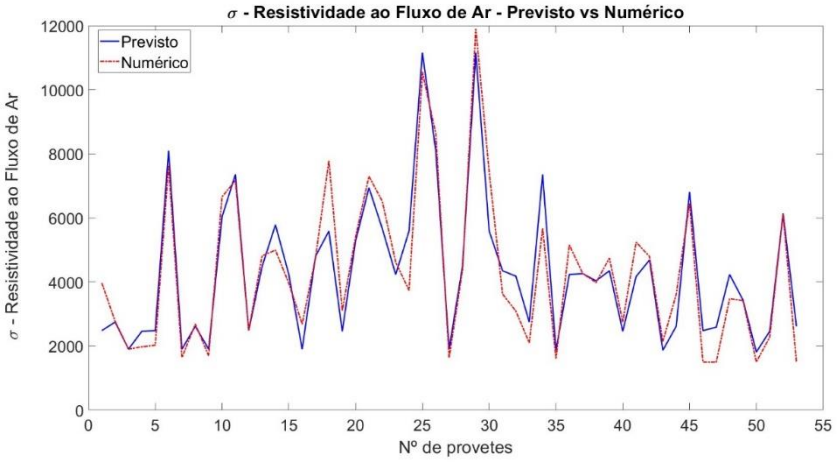
Como referido anteriormente, o treino da rede neuronal artificial utilizou apenas dois parâmetros de entrada, a densidade dos provetes e a classe dimensional da argila expandida. A Figura 2 apresenta a sobreposição das curvas obtidas pela aplicação do modelo ANN e pela metodologia H-S, para cada parâmetro de saída. Adicionalmente, foram determinadas as métricas de avaliação erro percentual médio absoluto (MAPE) e coeficiente de determinação R^2, para verificar a adaptabilidade dos parâmetros previstos em relação à referência obtida pelo método H-S.



a)



b)



c)

Figura 2 - Sobreposição das curvas previstas pela ANN e obtidas pelo método H-S. a) porosidade aberta; b) tortuosidade; c) resistividade ao fluxo de ar.

Analisando a Figura 2, é evidente a similaridade entre parâmetros macroscópicos previstos pelo modelo ANN alimentado apenas por dois parâmetros de entrada (densidade dos provetes e classe de tamanho da argila expandida), e os parâmetros obtidos pela metodologia numérica. Também é possível concluir que, devido à variabilidade mais elevada dos dados de resistividade ao fluxo de ar, o ajuste da Figura 2 c) não é tão bom como o ajuste dos outros dois parâmetros de saída, sugerindo que, para este parâmetro específico, o modelo ANN precisaria de um maior número de parâmetros de entrada (por exemplo, outros parâmetros de composição da mistura, como relação água/cimento/agregado) para alcançar o nível de precisão demonstrado para os outros dois parâmetros de saída (porosidade aberta e tortuosidade).

A Figura 3 apresenta a métrica de avaliação MAPE.

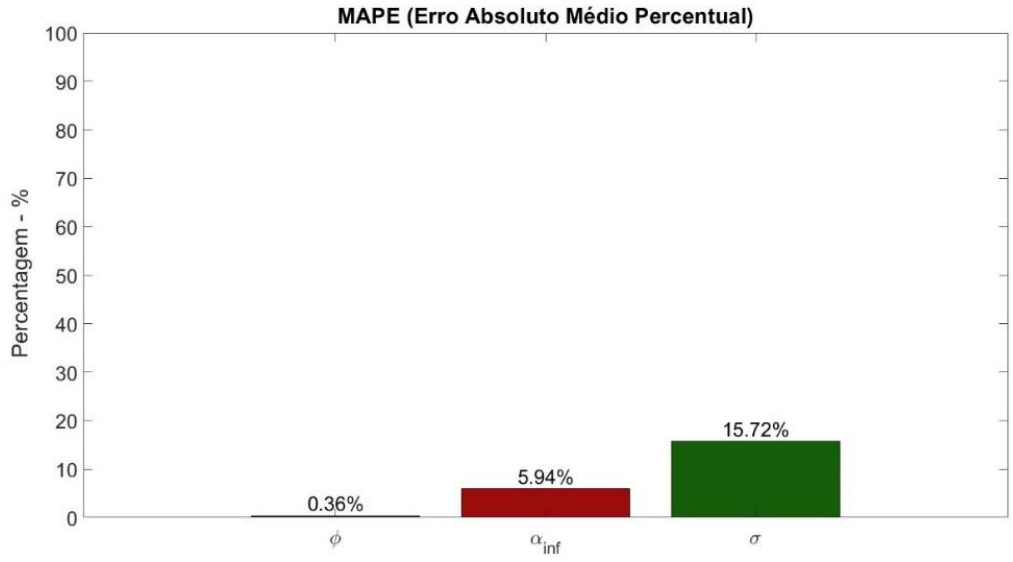


Figura 3 - Erro percentual médio absoluto para os três parâmetros de saída previstos pelo modelo ANN.

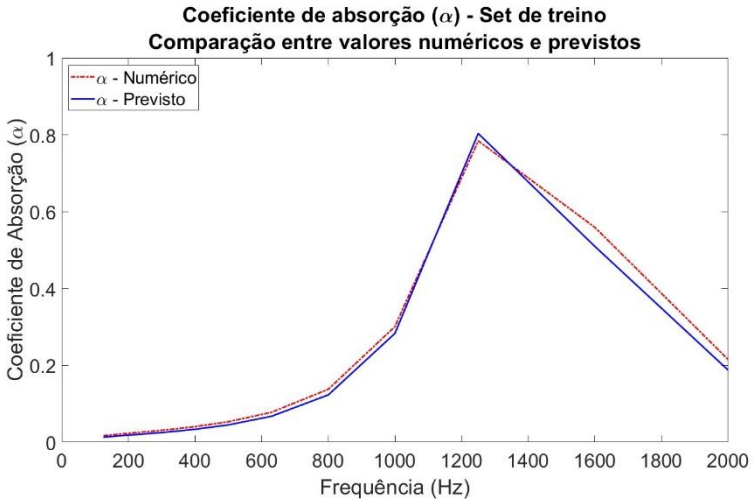
A observação da Figura 3 indica uma notável concordância entre os valores previstos de porosidade aberta (ϕ) e os dados de referência (numéricos). No que concerne à tortuosidade (α_{inf}), o modelo ANN apresentou um erro de 5,94%, enquanto o erro para a resistividade ao fluxo de ar (σ) foi de 15,72%. Este resultado sugere que, para este parâmetro específico, o uso de apenas dois parâmetros de entrada pode resultar em resultados menos precisos em comparação com os outros dois parâmetros. A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente de determinação R^2, onde se demonstra de forma muito evidente a capacidade do modelo ANN em prever as variáveis dependentes.

Tabela 2 – Valores do coeficiente de determinação (R^2) de cada variável dependente.

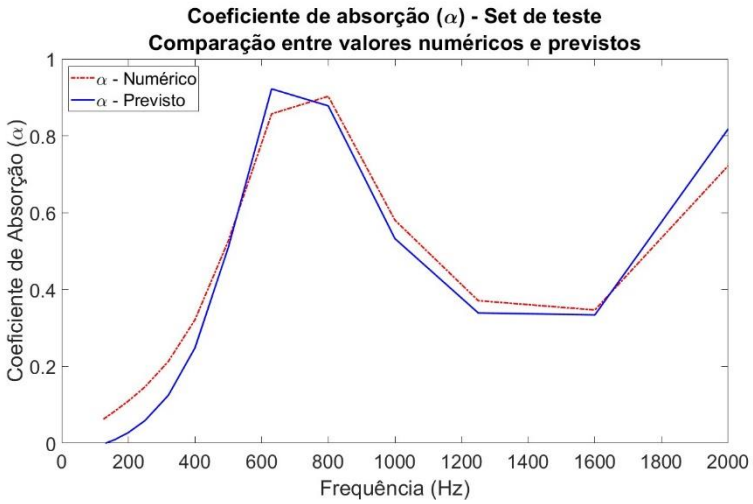
Variável dependente	Coeficiente de determinação – R^2
Porosidade Aberta - ϕ	0.99
Tortuosidade - α_{inf}	0.92
Resistividade ao Fluxo de Ar - σ	0.85

3.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

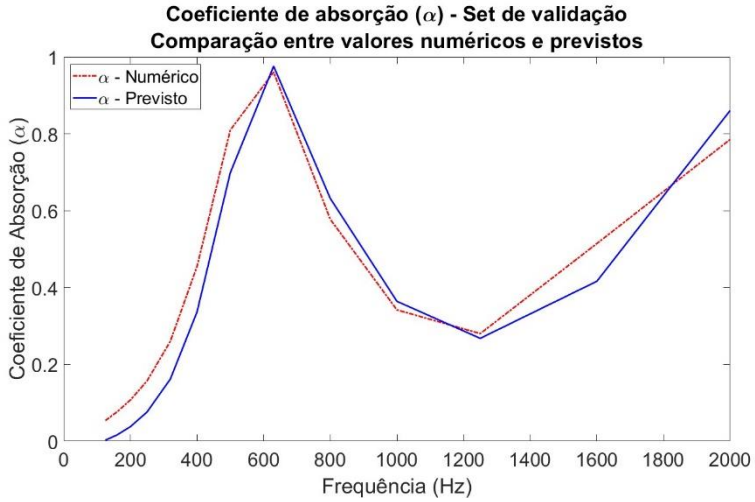
Após a previsão dos parâmetros macroscópicos pelo modelo ANN, realizou-se o cálculo do coeficiente de absorção (α) considerando esses parâmetros, e procedeu-se à comparação com a estimativa direta usando o método de Horoshenkov-Swift com os dados numéricos. Na Figura 4, apresentam-se dois exemplos de curvas de absorção para a faixa de frequência de 100-2000 Hz, ilustrando cenários retirados dos conjuntos de dados de treino (Figura 4.a)) e teste (Figura 4.b)) utilizados no processo de treino da ANN. A mesma figura apresenta ainda a curva de sobreposição entre as duas metodologias para o set de dados de validação, não utilizados durante o treino do modelo ANN (Figura 4.c)).



a)



b)



c)

Figura 4 - Exemplos de comparação do coeficiente de absorção (α) calculado a partir dos parâmetros macroscópicos obtidos por ambos os métodos: a) Conjunto de Treino; b) Conjunto de Teste; c) Conjunto de Validação.

Da análise da Figura 4, pode-se concluir que os resultados do coeficiente de absorção sonora calculados a partir dos parâmetros macroscópicos obtidos pelo modelo ANN e o coeficiente de absorção sonora obtido usando os dados numéricos são muito semelhantes, o que mais uma vez demonstra a precisão e confiabilidade do modelo ANN. Os resultados obtidos na presença de novos dados (Figura 4.c)) demonstra inequivocamente a capacidade de desempenho e generalização do modelo ANN. A Tabela 3 apresenta a reprodução dos resultados de referência (numéricos) pelos valores previstos do modelo ANN para o parâmetro coeficiente de absorção sonora, para a mesma gama de frequências (100-2000 Hz), e para os diferentes conjuntos de dados (treino, teste e validação).

Tabela 3 – Valores do coeficiente de determinação (R^2) para os diferentes conjuntos de dados do coeficiente de absorção sonora (α).

Base de dados do coeficiente de absorção sonora (α)	**Coeficiente de determinação – R^2**
Conjunto de dados de Treino	0.90
Conjunto de dados de Teste	0.81
Conjunto de dados de Validação	0.86

O coeficiente de determinação (R^2) de todos os conjuntos de dados (treino, teste e validação) demonstram uma correspondência muito significativa entre os valores numéricos e os valores previstos pelo modelo ANN, para o parâmetro coeficiente de absorção sonora. Isso significa que o coeficiente de absorção sonora calculado a partir do modelo ANN explica 90% da variância do mesmo parâmetro calculado pela metodologia de Horoshenkov-Swift. Também significa que as estimativas obtidas pelo modelo ANN se adaptam muito bem ao conjunto de dados de treino. O R^2 de 0,86 do

conjunto de validação demonstra a capacidade do modelo ANN de generalizar de forma competente e consistente na presença de novos dados, não utilizados durante o treino.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo de rede neuronal artificial baseado apenas em dois parâmetros simples e rápidos de obter (dimensão do grão da argila expandida e densidade dos provetes) para prever, numa primeira fase, as propriedades macroscópicas (porosidade aberta, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar) e, finalmente, o coeficiente de absorção sonora do betão poroso com argila expandida.

Os resultados da previsão dos parâmetros macroscópicos indicam uma boa concordância com os resultados obtidos através do método tradicional de inversão, reforçada pela notável semelhança evidenciada pela sobreposição das curvas resultantes da previsão pelo modelo ANN e pela metodologia Horoshenkov-Swift. O erro médio percentual absoluto (MAPE) indica que esta metodologia é promissora, apesar do erro de cerca de 15.7% na previsão da resistividade ao fluxo de ar sugerir que este parâmetro específico requer uma base de dados substancialmente maior (ou mais parâmetros de entrada), de modo a reduzir este erro. O elevado coeficiente de determinação R^2 obtido para cada uma das variáveis dependentes demonstra que o modelo ANN explica e se ajusta de forma muito satisfatória à variabilidade dos parâmetros determinados numericamente.

A estimativa do coeficiente de absorção sonora obtida a partir dos parâmetros macroscópicos previstos pelo modelo ANN está em consonância com a obtida pelo método H-S, reforçando a precisão e confiabilidade do modelo ANN, algo que é visível nas curvas de comparação das duas metodologias (machine learning e numérica) para os diferentes subconjuntos de dados (treino, teste e validação).

Os valores de R^2 para todos os conjuntos de dados (treino, teste e validação) indicam uma correspondência efetiva entre os valores numéricos e os previstos. Foi demonstrado que o coeficiente de absorção calculado pelo modelo ANN representa 90% da variabilidade observada no mesmo parâmetro calculado usando a metodologia H-S para o conjunto de dados de treino, e 81% para o conjunto de dados de teste, o que demonstra um ajuste robusto do modelo aos sets de dados de treino e teste. Salienta-se ainda o valor de R^2 de 0,86 para o set de dados de validação, o que demonstra a elevada capacidade do modelo ANN de generalizar eficaz e consistentemente quando na presença de dados novos, não utilizados durante a fase de treino.

Os resultados deste estudo demonstram a eficácia da abordagem ANN na previsão de propriedades macroscópicas e coeficientes de absorção sonora de misturas de betão poroso usando apenas parâmetros de entrada fáceis e simples de obter. Conclui-se ainda que os modelos ANN constituem uma alternativa eficaz aos métodos tradicionais, assumindo-se como uma ferramenta valiosa para, por exemplo, otimizar formulações de betão poroso para requisitos acústicos específicos.

FINANCIAMENTO

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e sob o Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE sob a referência LA/P/0112/2020.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ao abrigo do contrato de bolsa 2022.12096.BD atribuído ao 1º autor.

REFERÊNCIAS

F. Asdrubali and K. V. Horoshenkov, "The acoustic properties of expanded clay granulates," Building Acoustics, vol. 9, no. 2, pp. 85–98, 2002, doi: 10.1260/135101002760164553.

G. Ciaburro, G. Iannace, M. Ali, A. Alabdulkarem, and A. Nuhait, "An artificial neuronal network approach to modelling absorbent asphalts acoustic properties," Journal of King Saud University - Engineering Sciences, vol. 33, no. 4, pp. 213–220, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.07.002.

H. Lo Lee, J. S. Kim, C. H. Hong, and D. K. Cho, "Ensemble learning approach for the prediction of quantitative rock damage using various acoustic emission parameters," Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 9, p. 4008, 2021, doi: 10.3390/app11094008.

International Organization for Standardization, ISO 10534-2, Acoustics- Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes. 2001.

IPQ, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Método de Peneiração. Portugal, 2014.

J. A. Flores, Focus on artificial neuronal networks. Nova Science Publishers, 2021.

J. H. Jeon, S. S. Yang, and Y. J. Kang, "Estimation of sound absorption coefficient of layered fibrous material using artificial neuronal networks," Applied Acoustics, vol. 169, p. 107476, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107476.

J.-H. Tay and W.-K. Yip, "Sludge ash as lightweight concrete material," Journal of Environmental Engineering, vol. 115, no. 1, pp. 56–64, 1989.

K. V Horoshenkov and M. J. Swift, "The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal," J Acoust Soc Am, vol. 110, no. 5, pp. 2371–2378, 2001.

K. V. Horoshenkov and M. J. Swift, "The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates," Applied Acoustics, vol. 62, no. 6, pp. 665–690, 2001, doi: 10.1016/S0003-682X(00)00069-4.

K. V. Horoshenkov and M. J. Swift, "Acoustic granular materials with pore size distribution close to log-normal," J Acoust Soc Am, vol. 111, no. 5, p. 2378, 2002, doi: 10.1121/1.4809157.

L. Liang, W. Guo, Y. Zhang, W. Z. Zhang, L. Li, and X. Xing, "Radial Basis Function Neuronal Network for prediction of medium-frequency sound absorption coefficient of composite structure open-cell aluminum foam," Applied Acoustics, vol. 170, p. 107505, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.APACOUST.2020.107505.

L. Pereira, L. Godinho, and F. G. Branco, "Predicting unconfined compression strength and split tensile strength of soil-cement via artificial neuronal networks," Geomechanics and Engineering, vol. 33, no. 6, pp. 611–624, 2023, doi: 10.12989/gae.2023.33.6.611.

M. Der Lin, K. T. Tsai, and B. S. Su, "Estimating the sound absorption coefficients of perforated wooden panels by using artificial neuronal networks," Applied Acoustics, vol. 70, no. 1, pp. 31–40, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.APACOUST.2008.02.001.

M. Kurpińska, L. Kułak, T. Miruszewski, and M. Byczuk, “Application of artificial neuronal networks to predict insulation properties of lightweight concrete,” Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112210544.

M. Pereira, J. Carbajo, L. Godinho, P. Amado-Mendes, D. Mateus, and J. Ramis, “Acoustic behavior of porous concrete. Characterization by experimental and inversion methods,” Materiales de Construccion, vol. 69, no. 336, 2019, doi: 10.3989/mc.2019.03619.

M. Vašina, D. C. Hughes, K. V. Horoshenkov, and L. Lapčík, “The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates,” Applied Acoustics, vol. 67, no. 8, pp. 787–796, 2006, doi: 10.1016/j.apacoust.2005.08.003.

N. Gao, M. Wang, and B. Cheng, “Deep auto-encoder network in predictive design of Helmholtz resonator: On-demand prediction of sound absorption peak,” Applied Acoustics, vol. 191, p. 108680, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.APACOUST.2022.108680.

O. Umnova, K. Attenborough, and K. M. Li, “Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres,” J Acoust Soc Am, vol. 107, no. 6, pp. 3113–3119, 2000, doi: 10.1121/1.429340.

S. C. Jong, D. E. L. Ong, and E. Oh, “State-of-the-art review of geotechnical-driven artificial intelligence techniques in underground soil-structure interaction,” Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 113, p. 103946, 2021, doi: 10.1016/j.tust.2021.103946.

S. Le Clainche, E. Ferrer, S. Gibson, E. Cross, A. Parente, and R. Vinuesa, “Improving aircraft performance using machine learning: A review,” Aerosp Sci Technol, vol. 138, p. 108354, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.AST.2023.108354.

S. Tola, J. Tinoco, J. C. Matos, and E. Obrien, “Scour Detection with Monitoring Methods and Machine Learning Algorithms—A Critical Review,” Applied Sciences (Switzerland), vol. 13, no. 3, p. 1661, 2023, doi: 10.3390/app13031661.

W. Zhang, H. Li, Y. Li, H. Liu, Y. Chen, and X. Ding, “Application of deep learning algorithms in geotechnical engineering: a short critical review,” Artif Intell Rev, vol. 54, no. 8, pp. 5633–5673, 2021, doi: 10.1007/s10462-021-09967-1.

Y. Zaetang, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, “Use of lightweight aggregates in pervious concrete,” Constr Build Mater, vol. 48, pp. 585–591, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.077.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO GESSO RECICLADO ADITIVADO COM DIFERENTES TEORES DE EMULSÃO DE POLIACETATO DE VINILA

Sandra Cunha Gonçalves[a]; Milton Ferreira da Silva Junior[a]; Celso Carlino Maria Fornari Junior[b]; Paulo Neilson Marques dos Anjos[b]; Miriam Sanae Tokumoto[b]

[a] (UFSB-Universidade Federal do Sul da Bahia, Praça José Bastos, s/n, 45600-923, Itabuna-Ba, Brasil) sancunhaeng@gmail.com / notlimf@gmail.com

[b] (UESC-Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, 45662-900, Ilhéus-Ba, Brasil) celso@uesc.br / pauloneilson@uesc.br / mstokumoto@uesc.br

RESUMO

Nos últimos anos o consumo das chapas de gesso acartonado vem aumentando progressivamente e, consequentemente, a geração de resíduos. A reciclagem do gesso apresenta-se como uma alternativa viável; entretanto, parte de suas propriedades iniciais são reduzidas. Nesse sentido, o presente estudo analisou a influência da adição da emulsão de PoliAcetato de Vinila, em teores de 2,5 %, 5 %, 10 % e 20 % no comportamento das pastas de gesso reciclado e pastas híbridas com gesso comercial. Observou-se que a emulsão melhorou a trabalhabilidade e a consistência em todas as misturas analisadas, além de superar os requisitos mínimos normativos do gesso para fundição. Os resultados obtidos mostraram-se favoráveis até o teor de 10 % de adição; obteve-se incremento, em relação à amostra de referência, de 10,94 %, 7,13 % e 3,1 % na resistência à flexão, resistência à compressão e dureza superficial, respectivamente. A sorptividade chegou a ser reduzida em até 51,84 %. A análise de DRX e TGA sugerem que a emulsão de PVA modificou a morfologia e o comportamento térmico da pasta de gesso, modificando as propriedades no estado fresco e endurecido.

Palavras-chave: Gesso reciclado, Emulsão de PVA, Propriedades, Resíduos.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado um aumento na utilização das chapas de gesso acartonado, também conhecido como Drywall, em divisórias para as edificações. De acordo com dados da Knauf do Brasil (2020), este é um mercado emergente e em ascenção, com um crescimento da ordem de 8 % ao ano, tendo em vista que em 2019 o consumo foi em torno de 73 milhões de metros quadrados, superando os 56 milhões consumidos no ano de 2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL, 2019 *apud* ERBS, 2020).

Porém, juntamente com o crescimento no uso tem-se a geração de resíduos. De acordo com Godinho-Castro *et al.* (2012), um quantitativo anual de aproximadamente 15 milhões de toneladas de resíduos de chapas de gesso acartonado é despejado em aterros, oriundos das etapas de produção, construção e demolição. Segundo Neto, Cincotto e Wellington (2010), a fase que mais gera perdas é no corte para a instalação do sistema *drywall*. Há uma estimativa de que no Brasil este descarte chegue a 5 % do total produzido (GYPSUM S/A, 2019). A reciclagem do gesso apresenta-se como uma solução tecnicamente possíveis e economicamente viável, tanto na indústria cimenteira como no setor agrícola e até na indústria de transformação do gesso. Os materiais a serem reciclados só precisam ser separados, transportados e armazenados, de forma a evitar umidade e contaminações (SINDUSGESSO, 2022).

Em estudos anteriores encontra-se que o gesso reciclado apresenta um aumento no consumo de água, redução da trabalhabilidade da pasta e alteração do tempo de pega, em relação ao gesso comercial. Uma solução para driblar essa questão é adicionar aditivos na intenção de melhorar a trabalhabilidade do material, sem perder as propriedades mecânicas (PINHEIRO, 2011; ERBS, 2020). Nesse sentido, o presente estudo analisou o comportamento da pasta de gesso com a adição da emulsão de PoliAcetato de Vinila (PVA), com o objetivo de fornecer ao material a trabalhabilidade necessária, sem aumentar o consumo de água, alterando as propriedades no estado fresco e endurecido. De acordo com Mesquita (2002), uma das vantagens do emprego de um polímero emulsificado, em relação às outras formas de polimerização, é a minimização de problemas ambientais, uma vez que o polímero resultante está disperso em água.

2 DADOS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo foram:

- Gesso Comercial (GC): gesso para fundição comprado em estabelecimento comercial.
- Emulsão de PoliAceto de Vinila: emulsão em forma de cola branca extra, aparência líquida na cor branca; densidade a 25 °C entre 1,02 e 1,07 g/mL; pH a 25 °C entre 4 e 6; teor de sólidos: 45 %; teor de água: 55 %.
- Água de amassamento: fornecida pelo abastecimento público de Ilhéus – Bahia.
- Gesso Reciclado (GR): resíduo das chapas de gesso acartonado doado por empresa do segmento gesseiro, em Ilhéus-Ba. Conforme o passo a passo à Figura 1, inicialmente realizou-se o desprendimento manual do papel cartão aderido; tanto os elementos metálicos quanto o papel cartão foram encaminhados a reuso e reciclagem. O resíduo de gesso passou pelo processo de trituração manual por apiloamento, trituração eletromecânica e cominuição moinho de bolas; em seguida usou-se a peneira de malha 0,290 mm. O material passante foi encaminhado para calcinação em estufa de circulação de ar forçada na temperatura de 150 °C por 10 horas e, após estabilização da temperatura, o gesso reciclado foi acondicionado em embalagens de 1 kg.

Os ensaios e procedimentos foram realizados de acordo com as referências normativas brasileiras e internacionais, no intuito de avaliar e comparar as características das pastas de gesso com e sem emulsão de PVA. Na Tabela 1 tem-se as análises físico-químicas obtidas para o pó de gesso

comercial e reciclado, os valores representados entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação estatística em porcentagem. A Tabela 2 descreve a composição das pastas e a Tabela 3 a relação dos ensaios que foram realizados no estado fresco e endurecido, assim como as respectivas normas técnicas empregadas e o quantitativo de amostras produzidas.

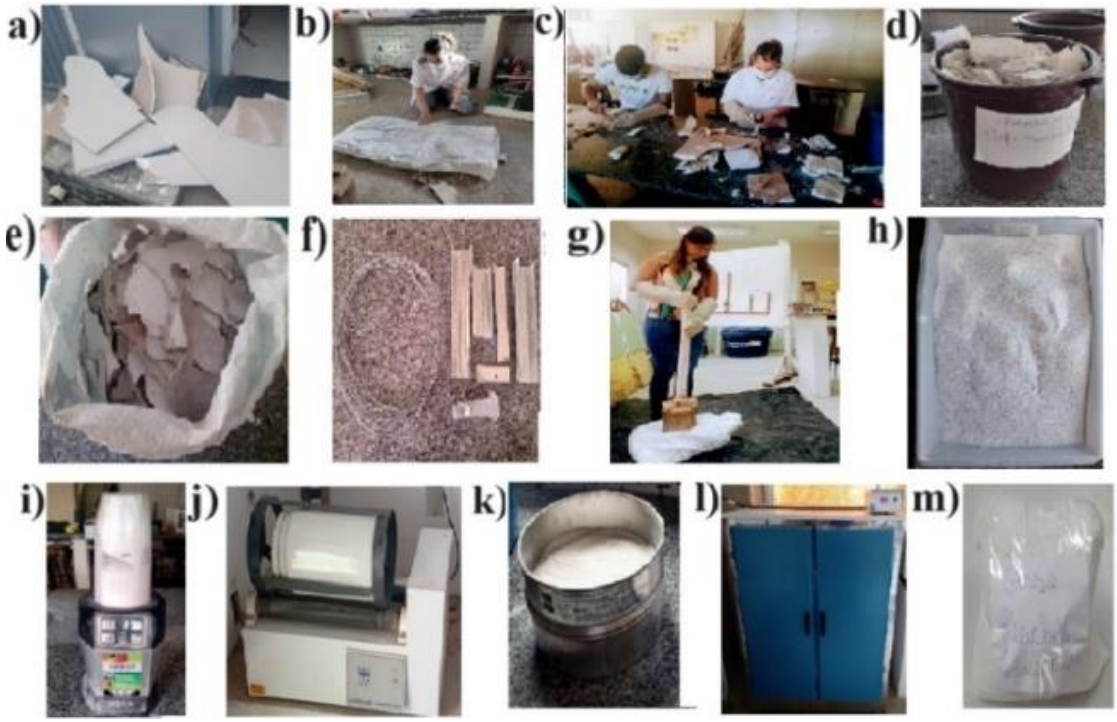


Figura 1: Etapas de produção do gesso reciclado. Fonte: Autores.

Tabela 1: Caracterização físico-química obtida para o pó de gesso.

Propriedade	GR	GC	Limite Normativo
Análise granulométrica (%)	91	96	≥ 90 passante na peneira de 0,290mm
Massa Unitária (kg/m³)	636 (3,4)	830 (3,0)	≥ 600
Massa Específica (kg/m³)	2442,66 (9,8)	3096,54 (6,2)	------
Superfície específica (m²/kg)	346,54 (3,7)	540,74 (2,9)	200 a 800
Água livre (%)	1,07 (9,3)	1,23 (8,1)	≤ 1,3
Água de cristalização (%)	4,9 (8,2)	6,1 (3,3)	4,2 a 6,2
Teor de óxido de cálcio	32,7 (5,4)	41,4 (5,6)	≥ 38
Teor de anidrido sulfúrico	40,3 (9,1)	51,6 (7,5)	≥ 53

*Valor entre parênteses é o coeficiente de variação estatística, em porcentagem.

Tabela 2: Composição das amostras experimentais da pesquisa.

Amostra	GR (%)	GC (%)	Emulsão de PVA (%)	Relação água/gesso
Referência – sem adição				
GC	0	100	0	0,7
GR	100	0	0	0,6
Mistura 1				
R100P2,5	100	0	2,5	0,65
R100P5,0	100	0	5,0	0,65
R100P10	100	0	10,0	0,65
R100P20	100	0	20,0	0,65
Mistura 2				
R70C30P2,5	70	30	2,5	0,65
R70C30P5,0	70	30	5,0	0,65
R70C30P10	70	30	10,0	0,65
R70C30P20	70	30	20,0	0,65
Mistura 3				
R50C50P2,5	50	50	2,5	0,65
R50C50P5,0	50	50	5,0	0,65
R50C50P10	50	50	10,0	0,65
R50C50P20	50	50	20,0	0,65

O preparo dos corpos de prova segue a sequência da Figura 2. Inicialmente misturou-se a água com a emulsão de PVA; posteriormente o gesso foi polvilhado sobre a mistura líquida, por 1 minuto; manteve-se em repouso por 2 minutos; em seguida, procedeu-se a mistura manual de forma contínua, durante 1 minuto. A pasta formada foi transferida imediatamente para os moldes, com o auxílio de uma espátula. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados, e submetidos a cura em temperatura ambiente por 28 dias, até serem encaminhados para os ensaios.

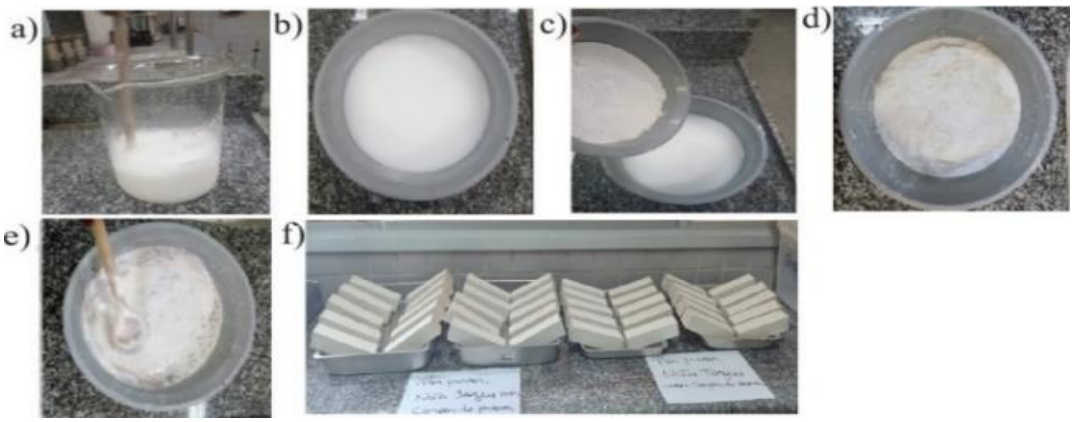


Figura 2: Sequência de preparo dos corpos de prova. Fonte: Autores.

Tabela 3: Descrição dos ensaios realizados.

Tipo de análise	Ensaio	Norma	Quantidade de amostras
Propriedades da pasta no estado fresco	Consistência normal	ABNT NBR 12128/2019	03
	Determinação do início e fim de pega	ABNT NBR 12128/2019	03
Propriedades no estado endurecido	Tração na flexão	ABNT NBR 13279/2005	05
	Dureza superficial	ABNT NBR 13207-3/2023	05
	Compressão	ABNT NBR 13207-3/2023	05
	Absorção de água por capilaridade	BS EN 1015-18/2002	06
Análise Microestrutural	Difração de Raios X	Condições de ensaio: difratômetro de raios X da marca Rigaku, modelo MiniFlex 600; fonte Cukα (λ =1,54 angstron), velocidade igual a 20º/ min.; passo igual a 0,01 grau; faixa de varredura de 2 teta de 5° a 70°.	
	Termogravimetria (TGA)	Condições de ensaio: detector Shimadzu (TGA-50), em atmosfera de nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de 10 ^{o}C/min; com capacidade para análise diferencial e termogravimétrica de modo simultâneo (TGA/ DTA) com balança do tipo *top plan* de guia diferencial paralela.	

Os dados obtidos nos ensaios foram tratados estatisticamente por meio do teste de Shapiro-Wilk, para número de dados entre 3 e 6, e K variáveis, utilizando o software livre Past (versão 4.03). Levando em consideração que alguns conjuntos de dados apresentam unidades diferentes, optou-se por empregar o coeficiente de variação, que é a razão percentual entre o desvio-padrão e a média dos dados, para indicar a variabilidade dos resultados dentro de um mesmo conjunto de dados, sendo que esta é uma maneira de expressar a variabilidade dos dados excluindo a influência da ordem de grandeza da variável.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AVALIAÇÃO DAS PASTAS NO ESTADO FRESCO

Consistência das Pastas

No preparo das amostras notou-se a diferença entre a consistência das misturas de referência: enquanto as amostras de GC possuíam aspectos mais fluídos, as amostras de GR apresentaram aspecto mais pastoso, conforme pode ser visto na Figura 3. No ensaio de consistência normal, obteve-se a relação a/g de 0,6 para o GC; de 0,7 para o GR e de 0,65 para as misturas aditivadas com emulsão de PVA. A consistência normal da pasta de gesso reciclado é maior que do gesso comercial, isso pelo fato do material reciclado ter menor superfície específica e maior volume de vazios.

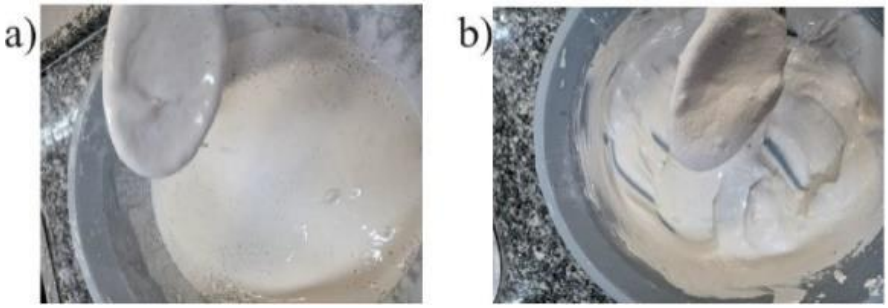


Figura 3: Consistências das pastas: a) Gesso comercial - GC; b) Gesso reciclado – GR. Fonte: Autores.

Tempos de pega

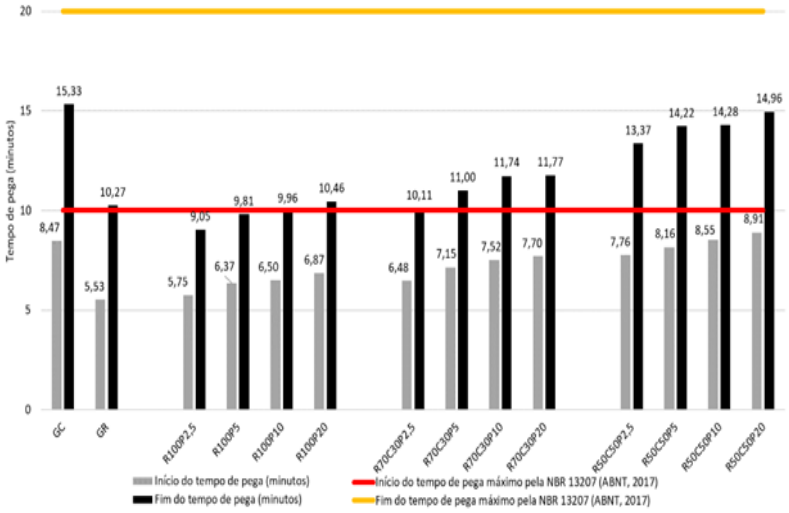


Figura 4: Valores médios para o Tempo de Início e Fim de pega.

A norma técnica NBR 13207/2017, determina para o gesso de fundição que o tempo de início de pega seja menor ou igual a 10 minutos e o fim de pega seja menor ou igual a 20 minutos. A Figura 4 apresenta os valores médios obtidos para o início e o fim de pega para todas as amostras analisadas. Todas atenderam aos critérios normativos do início e do fim de pega do gesso para fundição. Observou-se que o início e o fim de pega do GR foram mais rápidos do que o GC. É importante destacar a influência da granulometria das amostras e o fato do material reciclado apresentar, em sua composição, muitas impurezas que influenciam em suas reações químicas. Todas as pastas aditivadas aumentaram sua faixa de consistência em relação ao referencial GR. Segundo Silva (2018), formação mais rápida dos cristais de dihidrato é o que ocasiona o aumento da velocidade de endurecimento das pastas.

3.2 AVALIAÇÃO DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO

A Figura 5 apresenta a seção transversal da amostra GR e das amostras híbridas com adição de 5 % de emulsão de PVA; observou-se que há uma quantidade de poros e vazios aparentes na seção transversal da amostra de referência GR. Percebe-se uma aparência mais densa e compacta nas misturas com gesso comercial e emulsão de PVA, além da superfície ser mais regular e a coloração mais clara, devido à maior quantidade de gesso comercial na mistura. Percebeu-se que a emulsão e o GC alteraram a textura das amostras, aparentando uma superfície mais suave, o que é esteticamente mais agradavável, pois oferece um acabamento mais refinado.

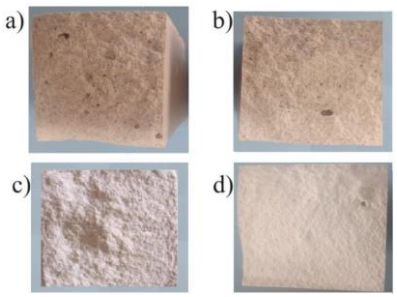


Figura 5: Seção transversal das amostras; a) amostra referência-GR; b) amostra R100P5; c) amostra R70C30P5; d) amostra R50C50P5. Fonte: Autores.

Os resultados mostraram que a incorporação da emulsão de PVA na mistura alterou o tempo de secagem do gesso, o que já era esperado levando em consideração que esse aditivo age como um retardador de pega, retém a umidade e isso prolonga o processo de cura do gesso. Por um lado, é um ponto interessante para o gesso de fundição, pois permite melhor moldagem das peças e redução da retração na secagem, evitando o surgimento de fissuras ou deformações durante a cura. Entretanto, verificou-se a importância de encontrar um teor ideal de adição que não implicasse num gasto energético extra, ou em tempo de cura superior aos 28 dias em condições-ambiente. Na Figura 6, tem-se 3 amostras após os 28 dias de cura em temperatura ambiente. Observou-se que os corpos de prova com teor de emulsão até 5 % (Figura 6a) apresentaram superfície seca; os corpos de prova com teor de emulsão de 10 % apresentaram a superfície externa um pouco úmida (Figura 6b) e alguns corpos de prova com teor de emulsão de 20 % apresentaram superfície úmida e pontos de mofo (Figura 6c).

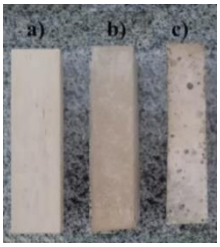


Figura 6: Superfície das amostras após 28 dias de cura em temperatura ambiente: a) amostra R100P5; b) amostra R100P10; c) amostra R100P20. Fonte: Autores.

Sorptividade

Na Figura 7 tem-se a demonstração da análise da sorptividade, que foi executada em conformidade com a norma britânica BS EN 1015-18/2002, por meio do qual foi possível determinar o coeficiente de capilaridade das pastas.

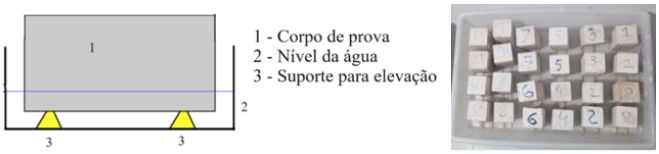


Figura 7: ensaio de absorção de água por capilaridade. Fonte: Autores.

De acordo com a norma alemã DIN EN 15148:2002 + A1:2016, os materiais de construção são classificados, em função do coeficiente de absorção de água por capilaridade, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Classificação dos materiais quanto à absorção de água por capilaridade (S).

Sorptividade, S [x 10^{-4} kg/(m^2.$s^{0,5}$)]	Classificação
S > 333,0	Sucção rápida
83,3 < S < 333,0	Preventivo à água
0,167 < S < 83,3	Quase impermeável
S < 0,167	Impermeável

Fonte: DIN EN ISO 15148:2002 (DIN, 2016)

As amostras de referência GC e GR apresentaram um comportamento diferente das demais amostras, pois apresentaram um crescimento acelerado na absorção de água na primeira hora de ensaio e constância próxima aos 120 minutos, conforme mostra a Figura 8, sendo classificadas como Tipo B, e a água atingiu a superfície superior dos corpos de prova antes de finalizar o ensaio. Já as amostras

aditivadas com emulsão de PVA, embora também classificadas como de sucção rápida, de acordo com a Tabela 4, apresentaram uma absorção de água lenta e crescente ao longo do ensaio, sendo que apenas as amostras compostas por 100 % de gesso reciclado apresentaram água na superfície dos corpos de prova, sendo classificadas como Tipo A. Os valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade das pastas foram avaliados segundo a norma americana C1794 / 2015. Constatou-se que a amostra R50C50P10 apresentou o menor Coeficiente de absorção de água por capilaridade, conforme mostra a Tabela 5, o valor entre parênteses se refere ao coeficiente de variação estatística, em porcentagem.

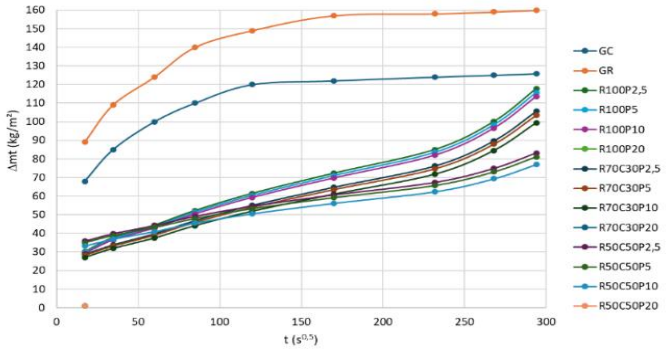


Figura 8: Curvas de absorção de água capilar das amostras estudadas.

Tabela 5: Sorptividade das amostras de gesso e de compósito estudadas.

Sorptividade [x 10^{-4} kg/(m^2.$s^{0,5}$)]					
Referências (sem adições)					
Gesso Comercial (GC)		4280 (1,4)	Gesso Reciclado (GR)		5440 (1,9)
Mistura 1		**Mistura 2**		**Mistura 3**	
R100P2,5	4040 (13,6)	R70C30P2,5	3590 (11,6)	R50C50P2,5	2829 (11,9)
R100P5,0	3933 (11,2)	R70C30P5,0	3520 (11,4)	R50C50P5,0	2759 (11,4)
R100P10	3863 (12,2)	R70C30P10	3382 (11,7)	R50C50P10	2620 (11,5)
R100P20	4122 (11,6)	R70C30P20	3396 (11,1)	R50C50P20	2690 (10,8)

Lima *et al.* (2023) analisou a sorptividade das pastas de gesso também através da norma norte-americana C1794 (ASTM, 2015), constatando que os teores de 0,25 %, 0,3 % e 1 % de aditivo hidrofugante resultaram na redução em 88,2 %, 91,3 % e 98,2 %, respetivamente, após 24h de ensaio. Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que a emulsão de PVA apresenta propriedades hidrofóbicas relevantes para este estudo, pois sua adição, em todos os teores, reduziu a absorção de água capilar e, consequentemente, isso poderá melhorar sua durabilidade.

Resistência à Flexão

Na análise da resistência à tração na flexão em três pontos seguiram-se as recomendações da norma europeia UNE-EM 13279-1 (AENOR, 2009), que estabelece, como parâmetro o critério mínimo de resistência, a flexão de 2,0 MPa, representado pela linha vermelha na Figura 10. Todas as amostras atenderam ao valor mínimo normativo. O valor médio obtido para o GR, sem adição, ficou abaixo dos valores encontrados por Savi (2017) e Erbs (2020) de 2,90 e 3,24 MPa, respectivamente.

Observou-se que a adição da emulsão de PVA ao gesso proporcionou, mesmo que sutilmente, certa flexibilidade à mistura, tendo em vista que a amostra de referência GR apresentou um aspecto mais quebradiço, enquanto as aditivadas eram menos suscetíveis a rachaduras e quebras por impacto.

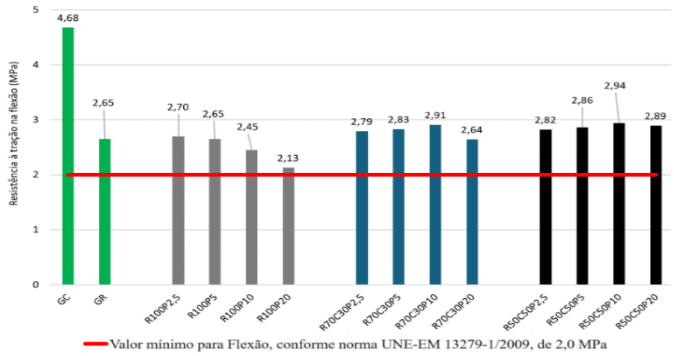


Figura 10: Valores médios obtidos para Resistência à tração na flexão em três pontos.

Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 13207-3 (ABNT, 2023). Para análisar a resistência à compressão axial aos 28 dias utilizou-se o critério mínimo especificado na norma americana C28/C28M-10 (ASTM, 2020), de 5,20 MPa, representado pela linha vermelha na Figura 11- Todas as amostras atenderam ao valor mínimo normativo. As amostras de GR apresentaram valor de resistência à compressão inferior a Serna *et al.* (2012), Zhu *et al.* (2018) e Erbs (2020) de 7,54 MPa, 9,20 MPa e 9,30 MPa, respectivamente; mas foi superior ao encontrado por Bardella e Camarini (2011) e Moura *et al.* (2014), de 6,10 MPa e 4,20 MPa, respectivamente.

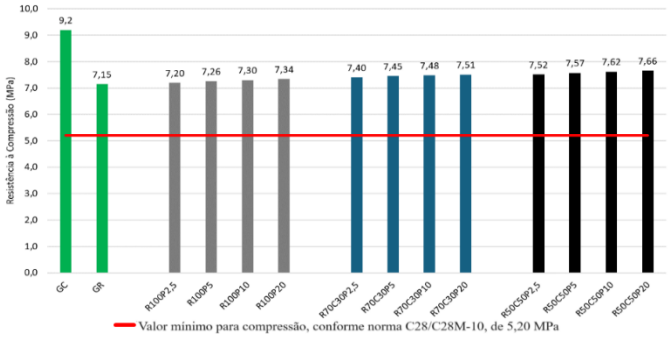


Figura 11: Valores médios obtidos para Resistência à Compressão.

Dureza Superficial

O ensaio de dureza superficial das pastas de gesso seguiu a metodologia descrita na NBR 13207-3 (ABNT, 2023), utilizando um durômetro Shore C (u.s.c.). Observou-se que o aumento no teor de adição reduziu o valor médio da dureza superficial. Situação semelhante foi encontrada por Silva *et al.* (2018) e Lima *et al.* (2023), que estudaram pastas gesso com aditivo hidrofugante. Em relação ao requisito da norma NBR 16494 (ABNT, 2017), verifica-se que todas as amostras apresentadas na Figura 12 atenderam ao critério mínimo para dureza superficial média de 55 unidades Shore C (u.s.c.).

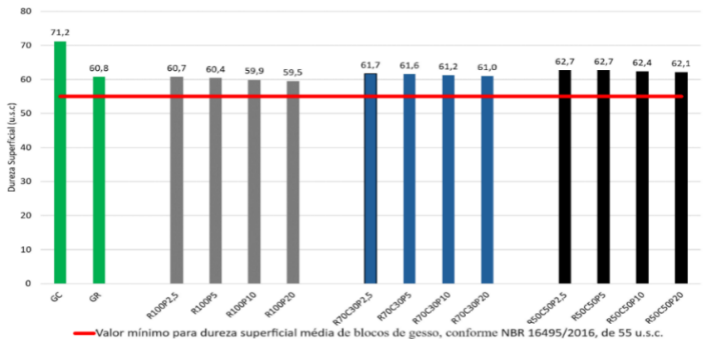


Figura 12: Valores médios obtidos para Dureza superficial.

Tabela 6: Resumo de todos os resultados experimentais obtidos.

Amostra	Início de Pega (min)	Fim de pega (min)	Tempo útil (min)	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)	Dureza superficial (u.s.c.)	Coeficiente de absorção (kg/m².s^{0,5})
GC	8,47(2,3)	15,33 (1,8)	6,68	4,68 (10,4)	9,20 (3,2)	71,2 (2,8)	0,4280 (1,4)
GR	5,53 (3,1)	10,27 (2,4)	4,74	2,65 (11,3)	7,15 (4,4)	60,8 (3,4)	0,5440 (1,9)
R100P2,5	5,75 (1,9)	9,05 (2,3)	3,30	2,70 (8,8)	7,20 (9,4)	60,7 (33,4)	0,4004 (13,6)
R100P5,0	6,37 (2,5)	9,81 (1,7)	3,44	2,65 (6,6)	7,26 (8,4)	60,4 (34,7)	0,3933 (11,2)
R100P10	6,50 (2,8)	9,96 (2,5)	3,46	2,45 (7,5)	7,34 (9,3)	59,5 (32,3)	0,3863 (12,2)
R100P20	6,87 (1,9)	10,46 (2,3)	3,59	2,13 (8,9)	7,18 (10,1)	57,8 (33,0)	0,4122 (11,6)
R70C30P2,5	6,48 (2,2)	10,11 (2,9)	3,63	2,79 (8,2)	7,40 (9,3)	61,7 (30,0)	0,3590 (11,6)
R70C30P5,0	7,15 (2,4)	11,00 (1,5)	3,85	2,83 (8,2)	7,45 (7,3)	61,6 (30,1)	0,3520 (11,4)
R70C30P10	7,52 (3,4)	11,74 (3,7)	4,22	2,91 (6,9)	7,51 (7,3)	61,0 (31,2)	0,3382 (11,7)
R70C30P20	7,70 (3,0)	11,77 (2,2)	4,07	2,64 (7,1)	7,41 (9,3)	60,0 (30,4)	0,3396 (11,1)
R50C50P2,5	7,76 (2,9)	13,37 (3,4)	5,61	2,82 (7,4)	7,52 (8,2)	62,7 (30,8)	0,2829 (11,9)
R50C50P5,0	8,16 (3,3)	14,22 (3,9)	6,06	2,86 (7,3)	7,57 (7,1)	62,7 (30,0)	0,2759 (11,4)
R50C50P10	8,55 (3,1)	14,28 (2,0)	5,73	2,94 (8,2)	7,66 (7,1)	62,1 (31,7)	0,2620 (11,5)
R50C50P20	8,91 (2,6)	14,96 (1,8)	6,05	2,89 (6,1)	7,62 (7,3)	60,9 (30,9)	0,2690 (10,8)

*Valor entre parênteses é o coeficiente de variação estatística, em porcentagem.

3.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

3.3.1 Difração de raios X

Os difratogramas apresentados na Figura 13a correspondem às amostra de GC e GR na forma hemihidratada. Percebeu-se, nas duas amostras, a presença do sulfato de cálcio dihidratado (D), que pode explicar o baixo teor de anidrido sulfúrico obtido, apresentadas na Tabela 1, que se relacionam com a presença de dihidrato que não foi convertido em hemihidrato durante o processo de calcinação. A amostra de GC apresentou picos mais intensos que a amostra de GR, indicando uma melhor desidratação da gipsita. O que também poderia explicar os baixos teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico do GR, apresentada na Tabela 1, além dos dihidratos é a presença de impurezas como alumina e perlita, geralmente presentes nos aditivos, além de picos de celulose, que provavelmente estão relacionados ao papel cartão e explicariam a coloração marrom do gesso reciclado ao ser hidratado.

Na Figura 13b tem-se o difratograma do gesso hidratado composto pela mistura 50 % GR + 50 % GC + 5 % PVA (R50C50P5). Segundo Morgan e Gilman (2003), a DRX pode até auxiliar na investigação das características do compósito; entretanto, de forma não conclusiva, devido à presença de picos alargados e à diluição da emulsão de PVA na matriz, que podem conduzir a falsas interpretações quanto ao grau de intercalação. Observou-se que a adição da emulsão de PVA alterou os picos cristalinos em relação ao dihidrato padrão, tendo em vista que o pico em 2θ igual 11,8, relativo ao plano (220), apresentou maior intensidade, assim como em 2θ igual a 20,8.

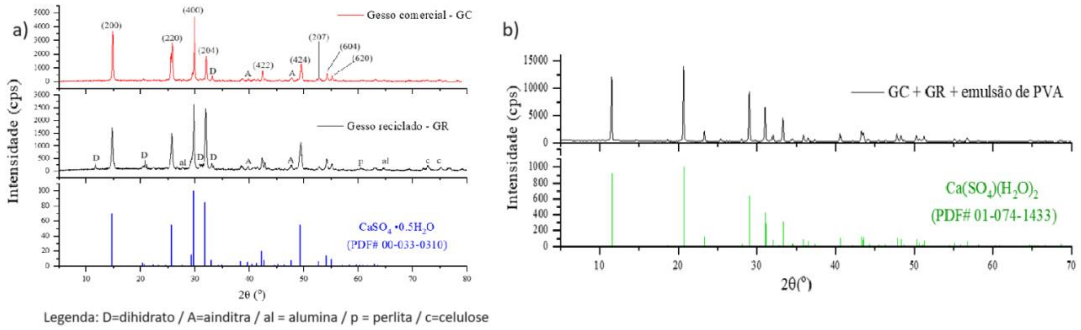


Figura 13: Difratogramas: a) DRX dos hemihidratos de referência; b) DRX do dihidrato R50C50P5.

3.3.2 Análise Termogravimétrica

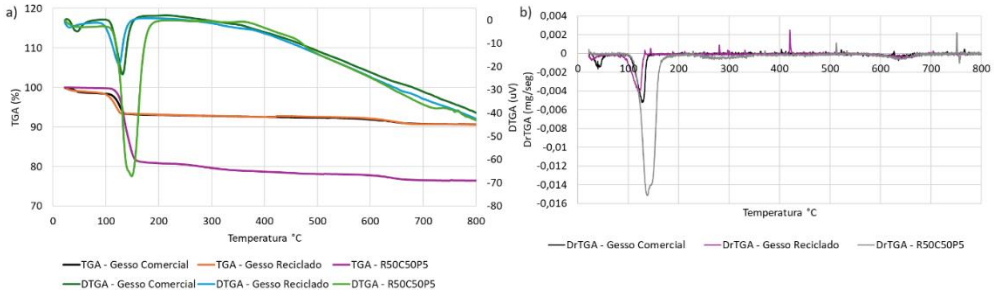


Figura 14: Termogramas: a) TGA e DTA das amostras-referência e R50C50P5; b) DrTGA das amostras-referência e R50C50P5.

A Figura 14a descreve a Análise Termogravimétrica (TGA) e a Análise Térmica Diferencial (DTGA) das amostras GR, GC e R50C50P5. Já a Figura 14b, descreve a Termogravimetria Derivada (DrTGA) das mesmas amostras, registrando a derivada primeira da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt).

A análise térmica mostrou que a amostra de gesso combinada com emulsão de PVA apresentou temperaturas de degradação iniciais mais baixas e temperaturas maiores (máximas) de degradação que as amostras de referência GR e GC. Pode-se atribuir este resultado a dois fatores alternativos: a mistura do gesso com a emulsão de PVA promoveu a decomposição térmica dos aerogéis ou promoveu a decomposição dos grupos de terminação de superfície.

4 CONCLUSÕES

Observou-se que até os 10 % de adição da emulsão de PVA os resultados apresentaram um aumento gradual, decaindo aos 20 % de adição, do que se infere que o teor de saturação do aditivo está abaixo deste percentual. Ainda assim, todas as amostras aditivadas apresentaram resultados físicos e mecânicos superiores à amostra de referência. Diante de todos os fatores investigados, concluiu-se que a melhor mistura foi a híbrida 50 %, aditivada com 5 % de emulsão de PVA, tendo em vista que, além dos resultados quantitativos favoráveis, após os 28 dias de cura em temperatura ambiente, a superfície apresentou-se visualmente seca, sem a necessidade de recurso energético complementar.

A redução da dureza superficial dos corpos de prova, à medida em que se aumentou o teor de aditivo, corrobora com as hipóteses levantadas nos resultados microestruturais, de que houve alterações morfológicas nos cristais do gesso e no arranjo das partículas, refletindo no comportamento das propriedades mecânicas. Percebeu-se que todas as amostras aditivadas com emulsão de PVA apresentaram uma absorção de água lenta e crescente ao longo do tempo de contato, além de menor

sorptividade, em relação à pasta de referência. Ainda assim, todas as amostras foram classificadas com sucção rápida, ou seja, teriam seu uso recomendado apenas para regiões secas.

Em suma, a adição da emulsão de PVA aumentou o tempo de início e fim de pega**;** consequentemente, o tempo útil das pastas melhorou a trabalhabilidade em relação à pasta de referência GR, sem a necessidade de adicionar mais água na mistura, além de influênciar positivamente nas propriedades mecânicas e estéticas do gesso, oferecendo maior aderência, resistência à água, flexibilidade e um acabamento menos áspero.

REFERÊNCIAS

American society for testing materials (ASTM). C1794: standard test methods for determination of the water absorption coefficient by partial immersion. New York, 2015.

_____ (ASTM). C28/C28M-10: Standard Specification for Gypsum Plasters. Pennsylvania, 2020.

Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____ (ABNT). NBR 13207: Gesso para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____ (ABNT). NBR 16494: Bloco de gesso para vedação vertical - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____ (ABNT). NBR 12128: Gesso para construção: Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro, 2017.

_____ (ABNT). NBR 12129: Gesso para construção: Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2017.

_____ (ABNT). NBR 13207-3: Gesso para construção - Parte 3: Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2023.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE-EN 13279-1: Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid, 2009

Bardella, P. S.; Camarini, G. Recycled Plaster: Physical and Mechanical Properties. Advanced Materials Research, v. 374, p. 1307-1310, out. 2011.

DIN EN ISO 15148:2002 + A1:2016. Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção - Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial. 01 dez. 2018.

Erbs, A. Desenvolvimento de chapas de gesso acartonado exclusivamente a partir de seus resíduos. 2020. 186 f. Tese (doutorado em engenharia civil) – universidade tecnológica federal do paraná, curitiba, 2020.

Godinho-Castro, A. P.; Testolin, R. C.; Janke, l.; Corrêa, A. X. R.; Radetski, C. M. Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling proces. Waste management, v. 32, p. 153–157, jan. 2012.

Gypsum S/A (Brasil). Tudo sobre as chapas drywall. Disponível em: https://gypsum.com.br/. Acesso em: 02 jan. 2022.

Knauf do Brasil. Produção nacional bate record em 2019. Disponível em: http://www.knauf.com.br/. Acesso em: 06 mai. 2023.

Lima, k. P. B. de A.; Silva, D. B. P. da; Cunha, A. L. X.; Cavalcanti, K. V. M.; Lima, F. B. de; Araújo, F. W. C. de; Holanda, R. M. de; Póvoas, Y. V. Estudo das propriedades do gesso de fundição com adição de aditivo hidrofugante. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 273-287, out./dez. 2023.

Mesquita, A. C. Estudo da polimerização do acetato de vinila utilizando a radiação ionizante. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências, Tecnologia Nuclear- Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2002.

Moura, R. S. L. M.; Deusdara, D. F. M.; Barreto, J. M. L.; Cabral, A. E. B. Avaliação Da Adequação Do Gesso Reciclado Às Prescrições Da Nbr 13207 In: XV Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 2014, Maceio. Anais eletrônicos.

Neto, A. M.; Cincotto, M. A.; Wellington, R. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum. Cement & concrete composites, v. 32, p. 312-318, jun. 2010.

Pinheiro, S. M. M. Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes. 2011. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, 2011.

Savi, O. Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso. 2012. 231 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012

Serna, A.; Río, M.; Palomo, J. G.; González, M. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. Construction and Building Materials, v. 35, p. 633–641, 2012.

Sindusgesso (Brasil) (Org.) - SINDUSGESSO – Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcáreos, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do estado de Pernambuco. Disponível em: <www.sindusgesso.org.br>. Acesso em: 05 jan. 2022

Silva, D. B. P. *et al.* Avaliação da influência do aditivo hidrofugante nas pastas de gesso de fundição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., Foz do Iguaçu, 2018. Anais [...] Porto Alegre: ANTAC, 2018.

Zhu, C.; Zhang, J.; YI, W.; Cao, W.; Peng, J.; Liu, J. Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum. Construction and Building Materials, v.173, p. 540–549, jun. 2018.

AGRADECIMENTOS

Ao LAPIMA (UESC), pelo uso do detector Shimadzu (TGA-50) obtido através da SECTI. Ao BIOMA (UESC), pelo uso do equipamento de DRX – CAPES 774573/12. Ao LMCC (UESC), pelo uso da máquina de ensaios universal obtida através do Projeto de pesquisa UESC n° 073.17253.2023.0034157-83. Ao LAPMET (UESC), LAMEAI (UESC) e ao IFBA (Ilhéus). Agradecemos também ao PPGBiossistemas (UFSB) e a PROAP (UFSB) pelo suporte e apoio financeiro.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

TENSILE PROPERTIES AND BOND BEHAVIOUR TO CONCRETE OF THERMOPLASTIC GFRP BARS AT ELEVATED TEMPERATURE

Inês C. Rosa[a]; Emma Coopman[b]; Mathis Taecke[c]; João P. Firmo[d]; João R. Correia[e]

[a] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, ines.rosa@tecnico.ulisboa.pt

[b] Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 25, 9000 Gent, Belgium, emma.coopman@ugent.be

[c] Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 25, 9000 Gent, Belgium, mathis.taecke@ugent.be

[d] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.firmo@tecnico.ulisboa.pt

[e] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

ABSTRACT

This paper presents a study about the effects of elevated temperature on the mechanical properties and bond to concrete of a novel glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bar produced with acrylic thermoplastic resin.

An experimental campaign was carried out, including: (i) tensile tests on bars exposed to elevated temperatures up to 250 °C, and (ii) pull-out tests, performed at temperatures up to 200 °C, on bars embedded in concrete cylinders. The degradation with temperature of the tensile strength, tensile modulus and bond strength of the thermoplastic bar was compared with data available in the literature for conventional thermoset GFRP bars. Compared to its thermoset counterparts, the tensile strength of the thermoplastic bar exhibited higher degradation at elevated temperature, being reduced by around 80% at 250 °C. However, up to 250 °C, the degradation of the bond strength and tensile modulus of the thermoplastic bar was comparable to the lower bound of data reported in the literature for thermoset bars.

Analytical/numerical studies were also performed (i) to assess the accuracy of several empirical models for describing the degradation of the tensile and bond properties of the thermoplastic bar as a function of temperature, and (ii) to calibrate temperature-dependent local bond-slip laws.

Keywords: thermoplastic GFRP bars, sustainability, elevated temperature, mechanical properties, bond to concrete.

1 INTRODUCTION

The use of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars as internal reinforcement of concrete members has shown remarkable growth in recent years, owing to their high corrosion resistance, lightness and lower maintenance requirements compared to conventional steel reinforcement. GFRP bars are typically produced with thermoset matrices (predominantly incorporating vinylester or epoxy resins), which, due to their highly cross-linked molecular structure, are hardly recyclable and, once cured, cannot be post-formed (*i.e.* re-shaped) (Benmokrane *et al.* 2021). This represents a major limitation in terms of production and design flexibility, especially for stirrups and ties used in concrete structures that, until now, had to be customized (bent) in factory, involving high costs and longer delivery times.

Aiming to address the limitations of conventional GFRP bars, the use of bars with thermoplastic matrices has been gaining increasing interest from the industry. Owing to the unique properties of these resins, thermoplastic bars can be thermoformable after cured, enabling them to be bent on site, and potentially recycled. The use of thermoplastic resins thus holds significant potential to promote a more sustainable and flexible use of GFRP bars in civil engineering structures. However, this technology is fairly recent and therefore many aspects concerning the short- and long-term mechanical properties, bond to concrete, post-processing and structural behaviour of these novel thermoplastic GFRP bars have not yet been investigated. It was only very recently that this topic has been the subject of comprehensive research (*e.g.*, Benmokrane *et al.* (2021), Wang *et al.* (2021) and D'Antino *et al.* (2023)). Consequently, the use of thermoplastic GFRP bars is not covered by current GFRP-reinforced concrete (RC) design codes (*e.g.*, ACI 2022).

One of the most critical aspects in the design of GFRP-RC structures is the behaviour of GFRP bars at elevated temperature and under fire exposure. This is because the tensile properties of GFRP bars, as well as their bond to concrete, undergo significant degradation when exposed to elevated temperatures, especially near and above the bars' glass transition temperature (T_g) (ACI 2022, Rosa *et al.* 2023). Given the polymeric nature of both thermoset and thermoplastic resins, the effects of elevated temperature is therefore also likely to be a concern in the design of RC structural members reinforced with thermoplastic GFRP bars (Benmokrane *et al.* 2021).

The study presented in this paper was developed within the scope a research project that aims at assessing the technical viability of using thermoplastic GFRP bars as reinforcement of concrete members, where typical fire resistance requirements for building applications need to be met. Particularly, this study presents the results of preliminary experimental and analytical studies that aimed at assessing the effects of elevated temperatures on the tensile properties and bond to concrete of GFRP bars produced with thermoplastic resin. To this end, (i) tensile and (ii) direct pull-out tests were performed on a novel GFRP bar produced with acrylic thermoplastic resin at temperatures up to 250 °C and 200°C, respectively. The degradation at elevated temperature of the tensile strength, modulus of elasticity and bond strength of the thermoplastic bar was compared to data available in the literature for thermoset GFRP bars produced with epoxy and vinylester resins. Alongside the experiments, a set of analytical/numerical studies were also carried out, including: (i) the proposal of analytical models for describing the degradation of the tensile and bond properties of the bars as a function of temperature, and (ii) the numerical calibration of local bond-slip laws for different temperatures (from 20 °C up to 200 °C) – these laws can be used in future studies for modelling the GFRP-concrete bond interaction in concrete members exposed to elevated temperature and fire.

2 EXPERIMENTAL PROGRAMME

2.1 MATERIALS

The GFRP bars tested in this study (Figure 1) were supplied by *Sireg Geotechnics*, marketed under the commercial name *Glasspree®TP*, and were produced by the pultrusion of E-CR glass fibres impregnated with acrylic thermoplastic resin (commercial name *Elium®*). The bars have a ribbed surface and a nominal diameter of 12 mm (13 mm including the ribs). The glass transition temperature (T_g) of the bars was determined by dynamic mechanical analysis (DMA) performed in air atmosphere, and its value was conservatively defined as 90 °C, based on the onset of the storage modulus curve decay (plotted in logarithmic scale). The decomposition temperature of the bars (T_d) was conservatively defined as 351 °C, based on the middle temperature of the mass change, obtained through thermogravimetric analysis (TGA).

Figure 1 – Ribbed GFRP bar produced with acrylic thermoplastic resin.

2.2 EXPERIMENTAL PROGRAMME

2.2.1 TENSILE TESTS AT ELEVATED TEMPERATURE

For preparing the test specimens, the bars were cut with a length of 1 m, and both extremities were protected with steel anchors filled with epoxy resin (*Sikadur-330* from *Sika*) to prevent premature failures in the grips of the testing machine. Figure 2 illustrates the test setup, consisting of: (i) an Instron universal testing machine; (ii) a *Tinius Olsen* thermal chamber for heating the bars; and (iii) a video-extensometer system (with a *Flir Blackfly* video camera and *MatchID* software), used for measuring the axial strain in tests conducted up to 150 °C, and a high-temperature extensometer (from *Epsilon*, model 7642) for tests carried out at higher temperatures. The bars were gripped outside the thermal chamber to avoid premature failures due to bar slippage in the grip zones.

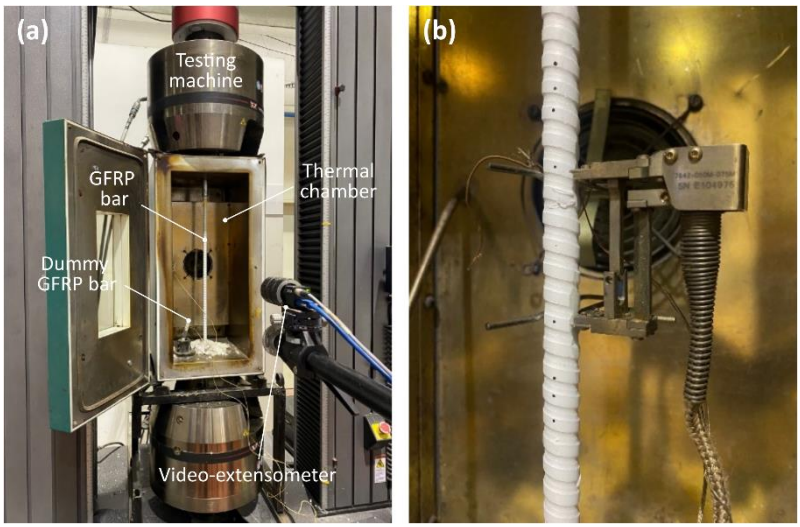


Figure 2 – (a) Tensile tests setup and video-extensometer used in tests up to 150 °C; (b) high-temperature mechanical extensometer used in tests carried out at 200 °C and 250 °C.

The tensile tests were carried out up to failure, according to standard ISO 10406-1, at both ambient temperature (20 °C ± 2 °C) and at elevated temperatures, in steady-state conditions, in which the bars were first heated up to the target temperature (50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C and 250 °C), and then loaded, in both cases under displacement control, at a controlled rate of 6 mm/min. Type K thermocouples were used to monitor the temperature of the air and inside the bar specimens (in this case measured in a dummy specimen). The average heating time of the bars ranged between 18 min and 57 min, for specimens tested at 50 °C and 250 °C respectively. A minimum of three specimens were tested for each target temperature.

2.2.2 PULL-OUT TESTS AT ELEVATED TEMPERATURE

The bond to concrete of the GFRP bars was assessed through direct pull-out tests performed according to standard ASTM D7913. As shown in Figure 3a, each bar was embedded in a concrete cylinder (with 150 mm in height and 150 mm in diameter) along a bonded length of 60 mm (equal to five times the bar diameter). The remaining unbonded length of the bar was set using a bond breaker, made of a PVC tube, placed adjacent to the bottom face of the cylinder. Premixed structural dry concrete *Betão-S Estrutural*, from *SECILTEK*, was used to cast the concrete cylinders. The average cube compressive strength and splitting tensile strength of the concrete 52 days after casting (corresponding to the onset of the pull-out tests) were 47.7 MPa and 3.4 MPa, respectively. The loaded end of the bars was protected with steel anchors, as described in section 2.2.1. Figure 3b illustrates the pull-out test setup, which featured the same testing machine, thermal chamber and video-extensometer used in the tensile tests. The test specimen was placed inside the thermal chamber in a steel reaction frame, in turn connected to the testing machine. The slip of the bar was measured at both the free and loaded ends using a video-extensometer, taking as reference pairs of target points marked on the bars' surface (free and loaded ends), and in steel brackets, fixed in the top surface of the concrete cylinder and in the bottom steel plate of the reaction frame. The specimen temperature was measured with a type K thermocouple fixed to the bar at mid-height of the bonded length, before the pouring of the concrete; an additional thermocouple monitored the air temperature inside the chamber. The tests were carried out at ambient temperature (20 °C ± 2 °C, reference condition) and in steady-state conditions at temperatures of 50 °C, 100 °C, 150 °C and 200 °C. First, the specimens were heated up to the target temperature (measured at the bar-concrete interface) and then, after the temperature stabilized, the bar was pulled out from its loaded end, under displacement control, at 1 mm/min. For each target temperature, a minimum of 3 tests were performed.

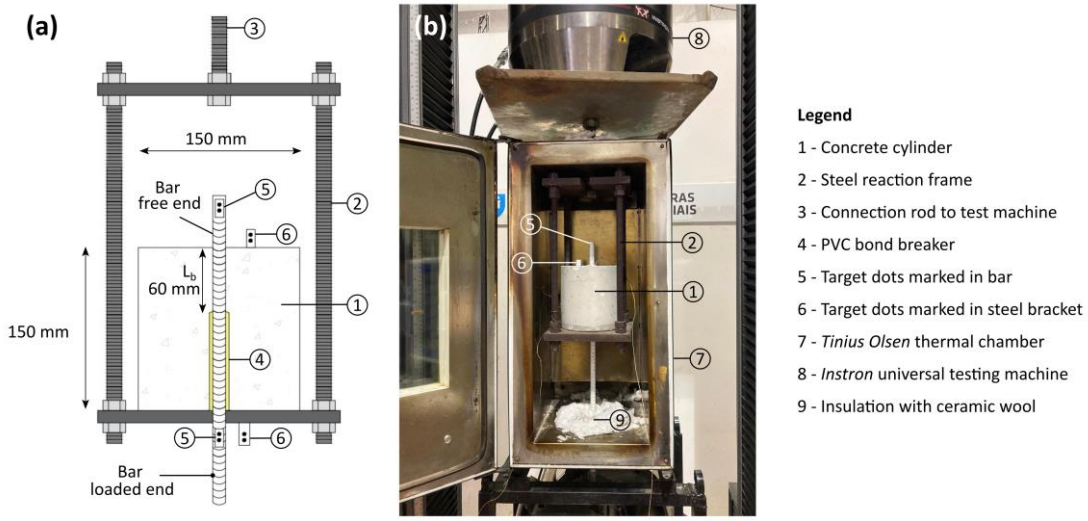


Figure 3 - (a) Pull-out specimen geometry and (b) view of the test setup.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 TENSILE PROPERTIES OF THERMOPLASTIC BAR AT ELEVATED TEMPERATURE

Figure 4a presents the load-crosshead displacement curves obtained in the tensile tests, which for temperatures between 20 °C and 100 °C (close to T_g) exhibited the typical linear-elastic response of GFRP bars up to failure. However, at temperatures well above the bar's T_g (i.e. 150 °C, 200 °C and 250 °C) the curves showed a non-linear behaviour, markedly visible from small loads (due to the extensive thermal expansion of the bars at the onset of loading) and also after the maximum load was attained (attributed to the softening of the resin, which causes an increase in the matrix's viscosity and in the bars' deformation capacity). Figure 4b shows the stress-strain constitutive relationships of the bar at different temperatures. Note that the curves at 150 °C and 200 °C are only plotted up to 25% of the bar's tensile strength; this was due to extensive damage of the bar's surface at those temperatures, which impaired the strain measurements. Despite this, all curves show that while the bar's mechanical response under tension was linear, the increase in temperature caused a reduction in its tensile strength and modulus of elasticity.

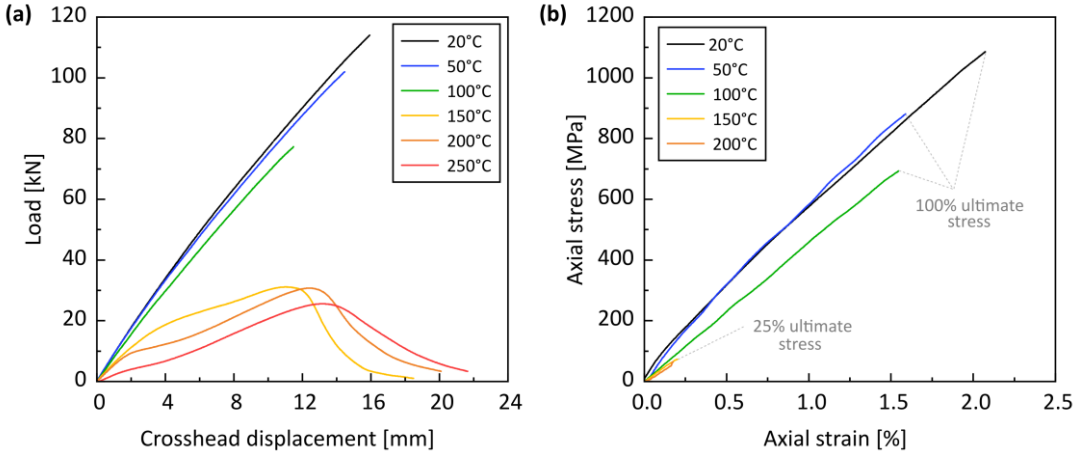


Figure 4 – (a) Load-crosshead displacement curves, and (b) axial stress-strain curves obtained from tensile tests of the bar.

The retentions of tensile strength and modulus of elasticity at different temperatures are plotted in Figure 5. Table 1 summarizes the tensile properties obtained in terms of absolute values and normalized values with regard to the properties at ambient temperature (20 °C). The results obtained prompt the following comments: (i) the bar's tensile strength was more severely degraded at elevated temperature than the tensile modulus; and (ii) the more significant reduction in strength occurred at temperatures higher than T_g (90 °C) – this was due to the softening of the thermoplastic matrix, which caused a decrease in its capacity to effectively (uniformly) distribute stresses among fibres. At 100 °C (slightly above T_g) the tensile strength decreased 36%. At temperatures higher than T_g, the tensile strength degradation became more pronounced, with reductions of 73% at 150 °C and 79% at 250 °C. On the other hand, the tensile modulus (mostly dominated by the glass fibres, thus less affected by the degradation of the matrix) only decreased 9% at 100 °C, 26% at 200 °C and 28% at 250 °C.

Figure 6 compares the retentions with temperature of the tensile properties of the thermoplastic GFRP bar with those reported in the literature (cf. (Rosa *et al.* 2023)) for thermoset GFRP bars produced with vinylester and epoxy resins. The figure shows that the level of tensile strength degradation observed in the thermoplastic GFRP bar at 250 °C is comparable to that exhibited by thermoset bars at significantly higher temperatures (above 400°C). On the other hand, the tensile modulus of both types of bars falls within the scatter of data.

Table 1 – Summary of tensile tests results (average value ± standard deviation).

Temperature [°C]	Tensile strength [MPa]	Tensile strength retention [-]	Tensile modulus [GPa]	Tensile modulus retention [-]
20 ± 2	1052.5 ± 39.9	1.00 ± 0.04	51.9 ± 2.0	1.00 ± 0.04
50 ± 2	922.8 ± 20.3	0.88 ± 0.02	53.5 ± 0.3	1.03 ± 0.01
100 ± 2	678.8 ± 13.6	0.64 ± 0.02	47.4 ± 2.2	0.91 ± 0.04
150 ± 2	292.2 ± 11.4	0.28 ± 0.01	38.2 ± 1.4	0.74 ± 0.03
200 ± 2	274.9 ± 12.5	0.26 ± 0.01	37.1 ± 1.9	0.72 ± 0.04
250 ± 2	223.2 ± 6.1	0.21 ± 0.01	-	-

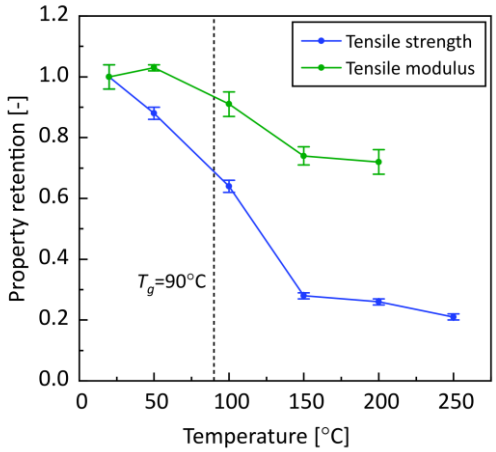


Figure 5 – Tensile strength and tensile modulus retention as a function of temperature (values normalized with respect to properties at 20 °C).

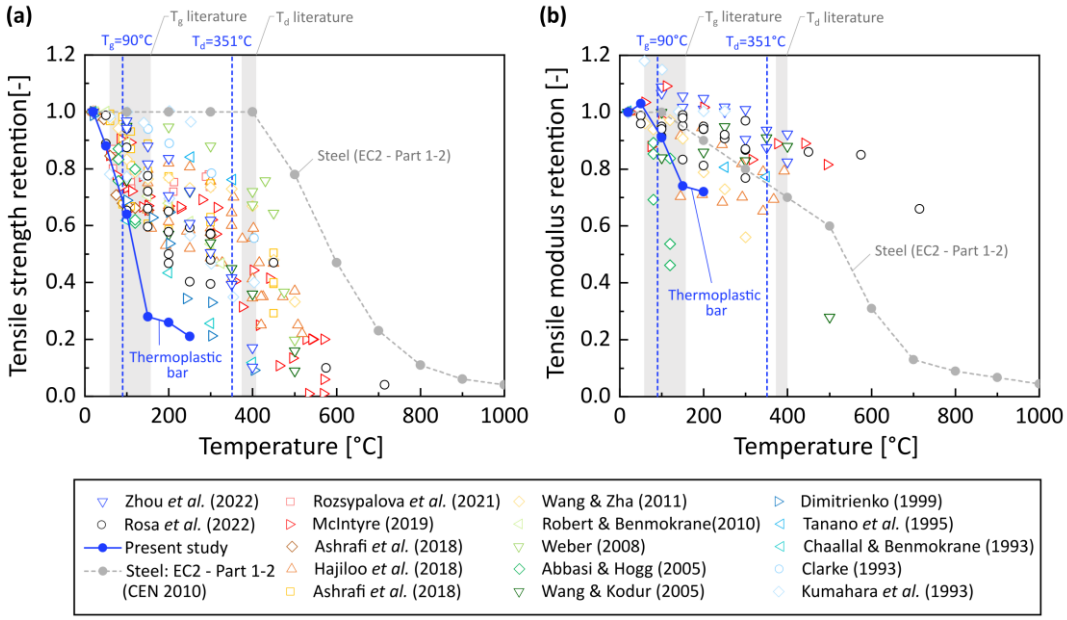


Figure 6 – a) Tensile strength and (b) tensile modulus retention of thermoplastic GFRP bar as a function of temperature (present study), and comparison with data from literature for GFRP bars with thermoset resins (values normalized with respect to properties at ambient temperature).

3.2 BOND BEHAVIOUR OF THERMOPLASTIC BAR AT ELEVATED TEMPERATURE

Figure 7a shows the average bond stress *vs.* loaded end slip curves obtained from the pull-out tests, which feature an approximately linear pre-peak stage, followed by a non-linear post-peak stage, in which the bond stress reduced and then oscillated/stabilized for high slip values. As the exposure temperature increased, both the bond strength (*i.e.* maximum average bond stress) and the bond stiffness (initial slope of the pre-peak stage) gradually reduced. The degradation of the bond strength and stiffness was especially steep for temperatures above T_g, due to the more severe damage that occurred at the bar-concrete interface when the resin softened. As shown in Figure 7b, the failure modes at the bar-concrete interface changed before and after the glass transition of the resin occurred: (i) at 20 °C and 50 °C (below T_g), failure was due to the fracture and shearing off of the concrete corbels between the bar's ribs; (ii) at 150 °C and 200 °C (above T_g), the bar's core detached and slipped in relation to the ribs, which remained bonded to the concrete; and (iii) at 100 °C (close to T_g), failure occurred due to a mixed failure mode, involving the combination of the two previous modes. All specimens failed due to pull-out of the bars from the concrete.

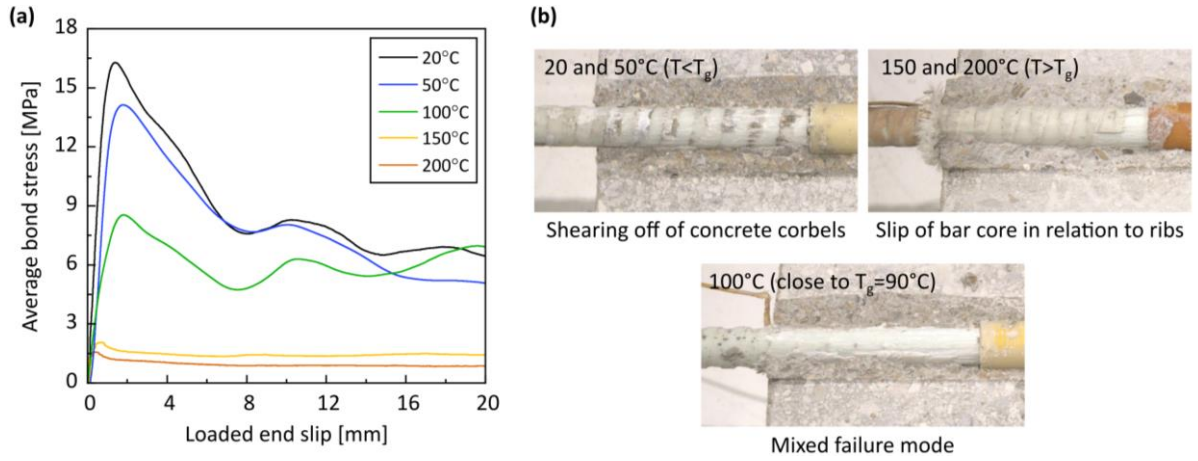


Figure 7 - (a) Average bond stress-loaded end slip curves; (b) failure modes at bar-concrete interface.

The retention of the bar's bond properties as a function of temperature is shown in Figure 8a and Table 2. The exposure to temperatures below T_g (up to 50 °C) caused similar degradation (below 20%) in both the bond properties and tensile strength of the bars. However, above T_g, the bond to concrete was significantly more affected by the resin softening. Indeed, at 100 °C, the bond strength and stiffness reduced by 51% and 70%, respectively (*vs.* 36% for the tensile strength), and at 200 °C that reduction increased to 90% in both bond properties (*vs.* 74% for the tensile strength). Despite this, as highlighted in Figure 8b, the degradation of the bond strength of the thermoplastic bar falls within the most severe level of degradation reported in the literature for GFRP bars produced with conventional thermoset resins (see (Rosa *et al.* 2023)).

Table 2 – Summary of pull-out tests results (average value ± standard deviation).

T [°C]	Maximum pull-out load [kN]	Bond strength [MPa]	Bond strength retention [-]	Bond stiffness [kN/mm]	Bond stiffness retention [-]
20 ± 2	38.9 ± 3.2	17.2 ± 1.4	1.00 ± 0.08	19.3 ± 2.3	1.00 ± 0.12
50 ± 2	33.9 ± 3.6	15.0 ± 1.6	0.87 ± 0.09	17.1 ± 1.4	0.89 ± 0.07
100 ± 2	19.2 ± 1.0	8.4 ± 0.4	0.49 ± 0.03	5.8 ± 1.6	0.30 ± 0.08
150 ± 2	4.9 ± 0.5	2.2 ± 0.2	0.13 ± 0.01	3.5 ± 0.9	0.18 ± 0.05
200 ± 2	3.8 ± 0.1	1.7 ± 0.0	0.10 ± 0.00	1.9 ± 0.3	0.10 ± 0.02

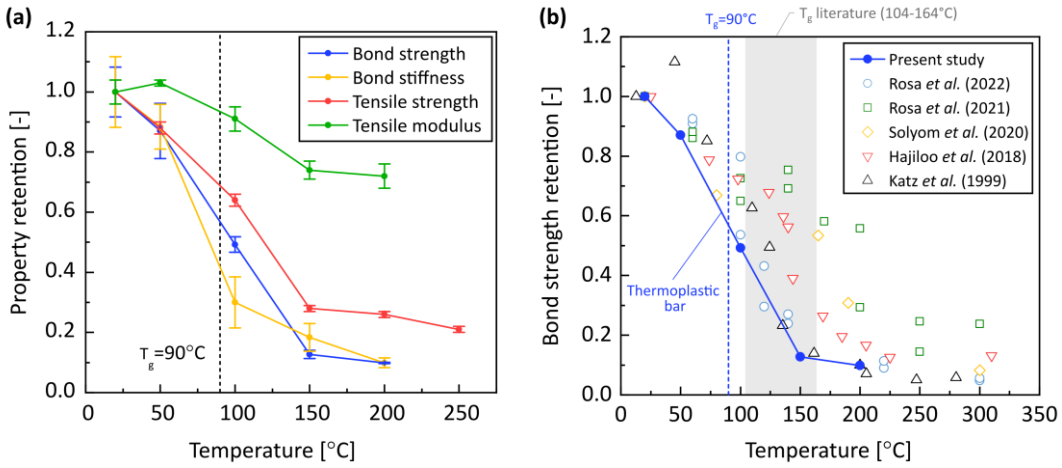


Figure 8 - (a) Retention of tensile and bond properties of thermoplastic bar as a function of temperature (normalized values with respect to 20 °C); (b) comparison of bond strength retention obtained in thermoplastic bar with literature data for thermoset ribbed GFRP bars.

4 ANALYTICAL/NUMERICAL STUDIES

4.1 DEGRADATION MODELS

Analytical models were proposed for describing the variation with temperature of the tensile strength and modulus of the thermoplastic GFRP bar (Section 4.1.1), as well as of its bond strength to concrete (Section 4.1.2). For that purpose, the accuracy of different empirical relaxation models – namely those of Mahieux *et al.* (2001), Gibson *et al*. (2006), Wang *et al.* (2011) and Correia *et al.* (2013) – was assessed to select which analytical formulation best modelled the degradation of the bar's properties with the increase in temperature. For each property, some of the models' parameters were calibrated through a standard curve-fitting procedure, which aimed at minimizing the root mean square error (RMSE) between the experimental data and the models' predictions.

The analytical formulations of the models considered are shown in Table 3 (Section 4.1.1) and Table 4 (Section 4.1.2), where a given property (P) is described through a mathematical expression as a function of temperature (T). For each modelled property, a set of parameters P_u and P_r were defined based on the experimental data, where P_u is the property of the material in the unrelaxed state (*i.e.* at ambient temperature), and P_r is the relaxed property (*i.e.* after glass transition, but before decomposition). The remaining model parameters, described next, were fitted to the experimental data according to the abovementioned procedure. In the model of Mahieux *et al.* (2001) (Equation (1)), these parameters included T_0 (relaxation temperature) and m (Weibull exponent). In the model of Gibson *et al*. (2006) (Equation (2)), the parameters were k', a constant describing the amplitude of the hyperbolic *tanh* function, and $T_{g,mech}$, which represents the T_g. The model of Wang *et al.* (2011) (Equation (3)) is defined by four calibrated parameters (A, B, C and n), while the model of Correia *et al.* (2013) (Equation (4)) considers two parameters, B and C, without physical meaning.

4.1.1 Degradation models for tensile properties

The parameters of the models analysed for describing the reduction of the bar's tensile strength and modulus with temperature are listed in Table 3, alongside with the respective mean absolute percentage error (MAPE) (providing a measure of relative accuracy of the fitted models in relation to the experimental data). The analytical modelling curves are plotted together with the experimental data in

Figure 9. Based on the analysis conducted, it was concluded that the model of Mahieux *et al.* (2001) provides the most accurate predictions of the tensile strength reduction with temperature (MAPE = 5.4%), while the degradation of the tensile modulus can be equally well described through the models of Mahieux *et al.* (2001) (MAPE = 3.3%) and of Correia *et al.* (2013) (MAPE = 3.4%).

Table 3 - Degradation models for describing the variation of tensile properties of the with temperature: calibrated parameters and mean absolute percentage error (MAPE).

Model	**Equation**		**Parameter**	**Tensile strength**	**Tensile modulus**
Mahieux *et al.* (2001)	$P(T) = P_r + (P_u - P_r) \cdot e^{-\left(\frac{T}{T_0}\right)^m}$	(1)	m [-]	10.87	17.97
			T_0 [K]	390.12	396.47
			MAPE [%]	5.4	3.4
Gibson *et al.* (2006)	$P(T) = P_u - \frac{P_u - P_r}{2} \cdot (1 + \tanh[k'(T - T_{g,mech})]$	(2)	k' [-]	0.204	0.387
			$T_{g,mech}$ [°C]	102.1	110.90
			MAPE [%]	6.2	3.3
Wang *et al.* (2011)	$P(T) = P_u \cdot \left[A - \frac{(T-B)^n}{C}\right]$	(3)	A [-]	1.54	1.4
			B [-]	0.0	2.1
			C [-]	6.46	2889.94
			n [-]	0.40	1.31
			MAPE [%]	17.1	4.6
Correia *et al.* (2013)	$P(T) = P_r + (P_u - P_r) \cdot (1 - e^{Be^{C \cdot T}})$	(4)	B [-]	-8.11	-320.56
			C [-]	-0.3	-0.6
			MAPE [%]	8.3	3.2
Tensile strength: P_u = 1.00 and P_r = 0.21			Tensile modulus: P_u = 1.00 and P_r = 0.72		

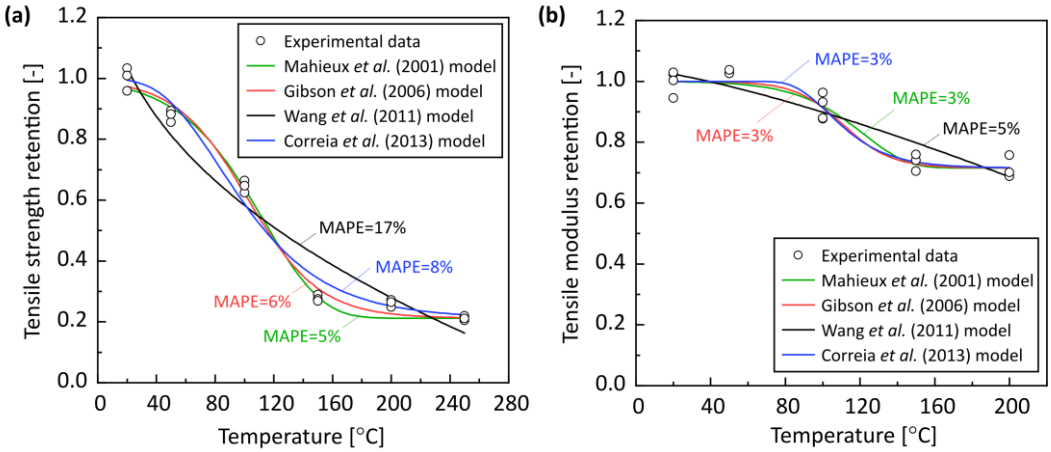


Figure 9 - (a) Tensile strength and (b) tensile modulus retentions as a function of temperature: experimental results and modelling curves based on models of Mahieux *et al.* (2001), Gibson *et al.* (2006), Wang *et al.* (2011) and Correia *et al.* (2013).

4.1.2 Degradation models for bond strength

Regarding the modelling of the average bond strength degradation with temperature, only the models of Gibson *et al*. (2006) and Correia *et al.* (2013) were considered for the analysis. The parameters and corresponding MAPE obtained for these models are presented in Table 4; the modelling curves are plotted in Figure 10. In this case, the model of Gibson *et al.* (2013) provided the most accurate predictions of the bond strength degradation of the thermoplastic bar with temperature, presenting a significantly lower MAPE (8.8%) compared to the alternative model of Correia *et al*. (18.8%).

Table 4 - Degradation models for describing the bond strength variation with temperature: calibrated parameters and mean absolute percentage error (MAPE).

Model	Equation		Parameter	Value
Gibson *et al.* (2006)	$P(T) = P_u - \frac{P_u - P_r}{2} \cdot (1 + \tanh[k'(T - T_{g,mech})]$	(2)	k' [-]	0.02
			$T_{g,mech}$ [°C]	93.4
			MAPE [%]	8.8
Correia *et al.* (2013)	$P(T) = P_r + (P_u - P_r) \cdot (1 - e^{Be^{C \cdot T}})$	(4)	B [-]	-10.1
			C [-]	-0.03
			MAPE [%]	18.8
Bond strength: P_u = 1.00 and P_r = 0.10				

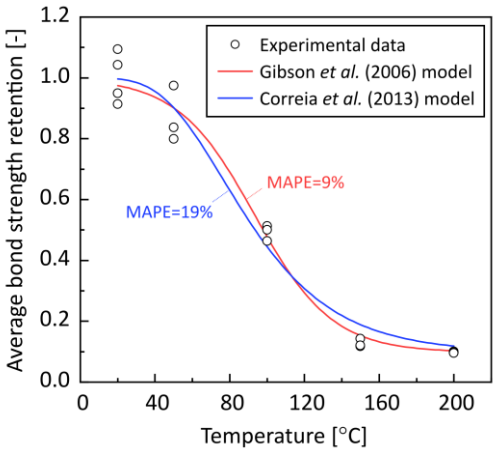


Figure 10 - Average bond strength retention as a function of temperature: experimental results and modelling curves based on models of Gibson *et al.* (2006) and Correia *et al.* (2013).

4.2 TEMPERATURE-DEPENDENT LOCAL BOND-SLIP LAWS

Based on the results of the pull-out tests, local bond stress-slip laws were calibrated for the thermoplastic GFRP bar at different temperatures. These laws are considered useful for future studies, as they can be implemented, for example in finite element models, to numerically simulate the complex interaction between the GFRP reinforcement and the concrete during exposure to elevated temperature and fire. In this study, the local bond-slip laws were calibrated for temperatures between 20 °C and 200 °C, considering the numerical procedure and bond constitutive relationships defined by Sena-Cruz and Barros (2004). The bond stress (τ) *vs.* slip (*s*) response was modelled based on Equation (5), where τ_m and s_m are the bond strength and corresponding slip, and parameters α and α' were numerically calibrated to define the shape of the pre- and post-peak bond-slip curves.

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} & if\ s \le s_m \\ \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'} & if\ s > s_m \end{cases} \quad (5)$$

For each temperature, the parameters of the bond laws (listed in Table 5) were calibrated through a numerical procedure implemented in a *MatLab* code. This procedure enabled determining the optimal parameters which minimize the relative differences between the analytical and experimental bond stress-slip curves obtained at the free and loaded ends of the bars. This procedure also considered the degradation of the bar's tensile modulus with temperature (as obtained in the tensile tests) and the non-uniform distribution of stress along the bar's bonded length. As shown in Figure 11a, the load *vs.* loaded end slip curves obtained numerically showed a very close agreement to those obtained in the experiments. Accordingly, the local bond stress-slip curves, shown in Figure 11b, were able to capture the progressive degradation of the bond strength and stiffness with the increase in the exposure temperature.

Table 5 - Parameters of local bond-slip laws calibrated for different temperatures.

Temperature [°C]	S_m [mm]	τ_m [MPa]	α [-]	α' [-]
20	1.08	16.54	0.55	0.33
50	1.60	14.90	0.33	0.32
100	1.02	8.35	0.90	0.14
150	0.50	1.92	0.32	0.10
200	0.45	1.68	0.29	0.16

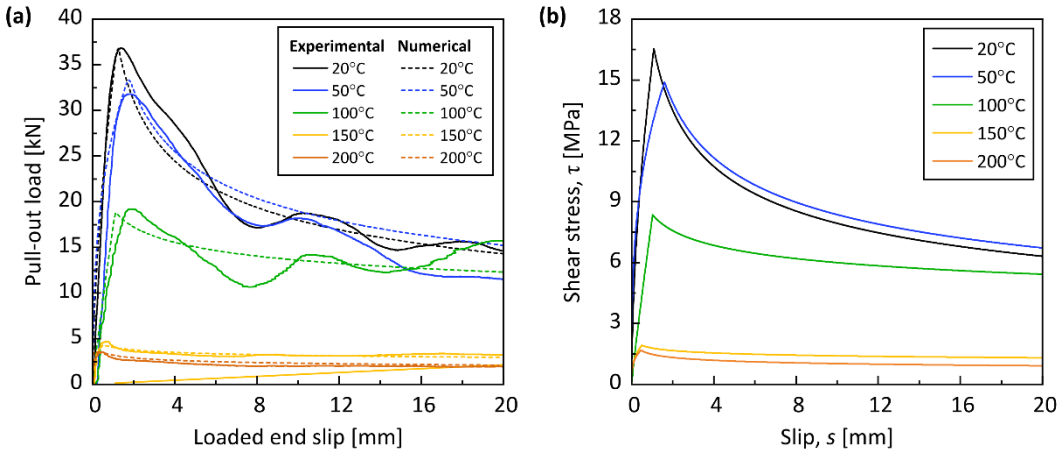


Figure 11 - (a) Comparison between experimental (continuous) and numerical (dashed) load-loaded end slip curves; (b) calibrated local bond-slip laws.

5 CONCLUSIONS

This paper described an experimental and analytical-numerical study about the effects of elevated temperatures (up to 250 °C) on the mechanical properties and bond behaviour to concrete of a new GFRP bar produced with acrylic thermoplastic resin. The results indicate that the tensile and bond

strengths of the bar are significantly degraded due to the softening of the thermoplastic matrix (starting at ~90 °C), exhibiting reductions of 74% and 90%, respectively, at 200 °C. Compared to conventional GFRP bars produced with thermoset resins, such as vinylester or epoxy, the reduction of the tensile strength of the thermoplastic bar was notably more pronounced. However, the degradation of the tensile modulus and bond strength was comparable to the lower bound of performance reported in the literature for its thermoset counterparts. Based on the experimental data, empirical analytical models were proposed to accurately model the degradation of the tensile properties and bond to concrete of the thermoplastic GFRP bar with temperature. Furthermore, local bond-slip laws dependent on the exposure temperature were numerically calibrated, considering the load *vs.* slip response obtained from the pull-out tests and the degradation of the tensile modulus of the bar with temperature.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Research Centre CERIS (project FireFRPrebar, FCT funding UIDB/04625/2020, doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020) for funding the research, and *Sireg Geotech* for supplying the GFRP bars. The authors also wish to thank Mr. Abu T. Shahid for conducting the DMA tests.

REFERENCES

ACI (2022). Building code requirements for structural concrete reinforced with glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars, ACI CODE-440.11-22, American Concrete Institute, Michigan, USA.

Benmokrane B., Mousa S., Mohamed K., and Sayed-Ahmed M. (2021). *Physical, mechanical and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures*, Construction and Building Materials, 276, 122200.

Correia J.R., Gomes M.M., Pires J.M., and Branco F.A. (2013). *Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment*, Composite Structures, 98(1), 303–313.

D'Antino T., Bertolli V., Pisani M.A., Poggi C. (2023). *Tensile and interlaminar shear behavior of thermoset and thermoplastic GFRP bars exposed to alkaline environment*, Journal of Building Engineering, 72, 106581.

Gibson A.G., Wu Y.S., Evans J.T., and Mouritz A.P. (2006). *Laminate theory analysis of composites under load in fire*, Journal of Composite Materials, 40(7), 639–658.

Mahieux C.A., Reifsnider K.L., and Case S.W. (2001). *Property modeling across transition temperatures in PMC's: Part I—Tensile properties*, Applied Composite Materials, 8(4), 217–234.

Rosa I.C., Firmo J.P., Correia J.R., Bisby L.A (2023). *Fire behaviour of GFRP-reinforced concrete structural members: a state-of-the-art review*, Journal of Composites for Construction, 27(5), 03123002.

Sena-Cruz J., and Barros J. (2004). *Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete*, Computers and Structures, 82, 1513-1521.

Wang K., Young B., and Smith S.T. (2011). *Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures*, Engineering Structures, 33(7), 2154–2161.

Wang X., Peng Z., Ding L., Lu J., Zhu Z., and Wu Z. (2021). *Mechanical and bonding behavior of a bendable fiber-reinforced thermoplastic rebar*, Construction and Building Materials, 302, 124222.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE AS SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE

Inês C. Rosa[a]; Mário Garrido[b]; João R. Correia[c]; Diogo Cabrita[d], João Constantino[e], Maria Cunha[f], Tiago Silvestre[g], Susana Cabral-Fonseca[h]

[a] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, ines.rosa@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt

[c] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

[d] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, diogo.ventura.cabrita@tecnico.ulisboa.pt

[e] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.constantino@tecnico.ulisboa.pt

[f] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, mariaalegriacunha@tecnico.ulisboa.pt

[g] CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, tiago.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

[h] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, Lisboa, Portugal, sbravo@lnec.pt

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de um estudo sobre compósitos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), produzidos por infusão a vácuo com resina acrílica termoplástica, tendo em vista a sua utilização em estruturas de Engenharia Civil. Em particular, pretendeu-se avaliar o desempenho de um compósito de matriz termoplástica, no que se refere ao seu comportamento mecânico, termomecânico e à sua durabilidade, comparando-o com o de um compósito convencional de matriz termoendurecível produzido com resina de poliéster isoftálico. O desempenho dos compósitos foi comparado no que se refere às suas propriedades mecânicas, temperatura de transição vítrea e absorção de água, bem como à sua durabilidade quando sujeitos a ciclos térmicos, ciclos de gelo-degelo e imersão em água a diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que o compósito com resina termoplástica possui propriedades mecânicas e durabilidade comparáveis às do compósito com resina termoendurecível, nomeadamente quando exposto a ciclos térmicos e a ciclos de gelo-degelo. Porém, para além de absorver mais água, as propriedades do compósito termoplástico mostraram ser mais suscetíveis a degradação na presença de humidade, nomeadamente as dominadas pela matriz, sendo que para ambos os compósitos essa degradação agravou-se com o aumento da temperatura de imersão.

Palavras-chave: Compósitos de polímero reforçados com fibras (FRP), resina acrílica termoplástica, propriedades mecânicas, durabilidade, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP), predominantemente produzidos com resinas termoendurecíveis, tais como as de poliéster insaturado, viniléster ou epoxídicas, têm vindo a consolidar-se na indústria da construção como uma alternativa ao aço, sobretudo para aplicações estruturais que requerem leveza, elevado desempenho mecânico e durabilidade em ambientes agressivos. Contudo, as dificuldades associadas ao reprocessamento e à reciclagem destes materiais suscitam preocupações quanto à sua sustentabilidade, em grande parte devido aos impactes ambientais associados às diferentes fases do seu ciclo de vida, em particular ao fim de vida. Isto porque as opções nesta fase são tipicamente limitadas ao depósito em aterro e à incineração em fornos de cimento (Biron 2018, Minchenkov *et al.* 2021).

Neste contexto, os aspetos relacionados com a sustentabilidade dos materiais FRP têm despertado um interesse crescente na utilização de compósitos produzidos com resinas termoplásticas, potencialmente mais sustentáveis, pelo facto de poderem ser reprocessadas, facilitando a sua reciclagem. Além disso, ao contrário dos compósitos com resinas termoendurecíveis, os compósitos produzidos com aquelas resinas podem ser dobrados e soldados, facilitando a sua montagem e reparação (Biron 2018, Cousins *et al.* 2019, Kravtsova *et al.* 2024).

A utilização de resinas termoplásticas em materiais FRP tem vindo a ser explorada há várias décadas nas indústrias aeroespacial, naval e automóvel. Porém, o desenvolvimento da tecnologia que permite o fabrico à escala industrial de compósitos termoplásticos direcionados para o setor da Engenharia Civil é relativamente recente. Por esta razão, foram realizadas poucas investigações sobre a produção, o comportamento mecânico e termomecânico, a durabilidade, o pós-processamento e a reciclabilidade de compósitos de matriz termoplástica (*e.g.*, D'Antino e Pisani (2023), Kazemi *et al.* (2019), Obande *et al.* (2019)). Pelo mesmo motivo, as recomendações de dimensionamento para estruturas em compósitos FRP fornecidas pelas normas e códigos estruturais atuais, como é o caso da Especificação Técnica Europeia CEN/TS 19101:2022 (CEN 2022), não contemplam elementos estruturais em FRP produzidos com resinas termoplásticas, sendo aplicáveis apenas a compósitos com matriz termoendurecível.

O estudo apresentado neste artigo foi desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação em curso e cujo principal objetivo é avaliar a viabilidade do uso de compósitos de matriz termoplástica em aplicações estruturais em Engenharia Civil. O artigo apresenta e discute os resultados iniciais deste estudo, que contempla o comportamento de compósitos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) produzidos por infusão a vácuo com resina acrílica termoplástica e fibras de vidro. Em particular, este projeto de investigação visa avaliar o comportamento mecânico, termomecânico e a durabilidade deste tipo de compósito de matriz termoplástica, comparando-o com o comportamento de um compósito de matriz termoendurecível, produzido com uma resina convencional de poliéster isoftálico insaturado. Para este propósito, foram determinadas as propriedades (resistência e rigidez) à tração e flexão, e a resistência ao corte interlaminar dos dois tipos de compósitos, bem como a sua temperatura de transição vítrea. Inicialmente, foram realizados ensaios a provetes em estado "não envelhecido" (*i.e.*, as propriedades iniciais) e, posteriormente, a provetes sujeitos a ensaios de envelhecimento acelerado (propriedades residuais) que simularam a exposição prolongada a ciclos térmicos, ciclos de gelo-degelo e imersão em água a diferentes temperaturas (envelhecimento higrotérmico).

2 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA E TERMOENDURECÍVEL

As placas de compósito FRP foram produzidos pela empresa *Arkema*, por infusão a vácuo, utilizando fibras de vidro (tipo E) impregnadas com: (i) uma resina acrílica termoplástica, patenteada pela *Arkema* e com a referência comercial *Elium® 191 XO/SA*, e (ii) uma resina termoendurecível de poliéster insaturado isoftálico. Ambos os compósitos (termoplástico (TP) e termoendurecível (TE)) tinham 8,5 mm de espessura e a mesma arquitetura de fibras, com camadas de mantas de fibra de vidro unidirecionais (U, direção 0°), intercaladas por mantas bi-axiais (B) orientadas a +/- 45° de acordo com a sequência $[U/(B)_4/U]_S$. A fração mássica de fibra dos compósitos (74%) foi obtida através de ensaios de queima realizados de acordo com a norma ASTM D2584-02 (ASTM 2002). Os compósitos foram curados a temperatura ambiente e, posteriormente, pós-curados a 80 °C durante 5 h, no caso da resina de poliéster, e durante 2 h no caso da resina acrílica, conforme recomendação do fabricante.

2.2 PROGRAMA DE ENSAIOS

O Quadro 1 apresenta as séries de ensaios realizados para avaliar o comportamento mecânico e termomecânico e a durabilidade dos dois tipos de compósitos. A série 1 teve como objetivo caracterizar as propriedades mecânicas em tração, flexão e corte interlaminar, e a sua temperatura de transição vítrea (T_g). As séries 2 a 4 tiveram como objetivo comparar as propriedades residuais dos compósitos após exposição a ambientes de envelhecimento acelerado com as propriedades de referência (*i.e.,* iniciais) obtidas na série 1. Especificamente, foi avaliada a durabilidade dos compósitos quando sujeitos a ciclos térmicos (série 2), envelhecimento higrotérmico (série 3) e ciclos de gelo-degelo (série 4). Para cada tipo de ensaio mecânico, na série de referência foram testados 10 provetes de cada material, enquanto nas restantes séries foram testados 5 provetes.

Quadro 1 – Resumo das séries de ensaios.

Séries de ensaio	**Condições de envelhecimento**	**Ensaios**
Série 1 - Propriedades do material não envelhecido	-	Tração Flexão Corte interlaminar Análise dinâmica mecânica Absorção de água[1]
Série 2 - Durabilidade após ciclos térmicos	100 ciclos térmicos entre -20 °C e 50 °C	
Série 3 - Durabilidade após envelhecimento higrotérmico	Imersão em água a 20 °C, 35 °C ou 50 °C durante 1 mês	
Série 4 - Durabilidade após ciclos de gelo-degelo	Imersão em água a 20 °C durante 1 mês (fase de pré-condicionamento), seguida de 100 ciclos de gelo-degelo entre -20 °C e 23 °C	

[1] Ensaio realizado no âmbito das séries 3 e 4.

2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.3.1 Ensaios de caracterização das propriedades do material não envelhecido (série 1)

No que se refere às suas propriedades mecânicas, os compósitos foram caracterizados através de ensaios de tração, flexão e corte interlaminar. Os ensaios de tração foram realizados em provetes com as dimensões de 300 × 25 × 8,5 (mm), de acordo com a norma ISO 527-4 (ISO 1997), para determinar a sua resistência à tração e módulo de elasticidade na direção longitudinal (paralela à das fibras a 0°). Os

ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, a uma velocidade de 2 mm/min, numa máquina universal de ensaio *Instron* (modelo 5989, com capacidade de carga de 600 kN), conforme ilustrado na Figura 1a. De modo a evitar roturas prematuras na zona de aperto, as extremidades dos provetes foram reforçadas com *tabs* feitos com o mesmo material compósito. As extensões axiais foram medidas através de vídeo-extensometria, com uma câmara de alta resolução *Sony* e software da *MatchID*.

As propriedades em flexão dos compósitos foram determinadas de acordo com a norma ISO 14125 (ISO 1998) em provetes com as dimensões de 270 × 15 × 8,5 (mm) (maior dimensão alinhada com a direção 0°). Os provetes foram testados num esquema de flexão em três pontos, ilustrado na Figura 1b, com um vão entre apoios de 170 mm. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, à velocidade de 20 mm/min, em máquinas universais de ensaio *Instron* (modelo 5982, com capacidade de carga de 100 kN) e *Tinus Olsen* (modelo H50KL, com capacidade de carga de 50 kN).

A resistência ao corte interlaminar foi determinada de acordo com a norma ASTM 2344 (ASTM 2000), em provetes com as dimensões de 54 × 18 × 8,5 (mm) (maior dimensão alinhada com a direção 0°). Os provetes foram testados num esquema de flexão em três pontos, com um vão de 34 mm (Figura 1c), em controlo de deslocamento, à velocidade de 1 mm/min, utilizando as mesmas máquinas de ensaio referidas para a flexão.

A temperatura de transição vítrea dos compósitos foi determinada através de análises dinâmicas mecânicas (DMA), realizadas segundo a norma ISO 6721 (ISO 2012). Os provetes (previamente pós-curados) foram testados num analisador dinâmico mecânico da *TA Instruments* (modelo Q800), num esquema de flexão em três pontos (Figura 1d), a uma frequência de oscilação de 1 Hz e a uma amplitude de 15 μm. O ensaio foi realizado em atmosfera de ar (*i.e.*, na presença de oxigénio), com um varrimento de temperaturas de 25 °C a 185 °C à taxa de 2 °C/min.

2.3.2 Ensaios de durabilidade – ciclos térmicos (série 2)

Os compósitos expostos a ciclos térmicos foram envelhecidos numa câmara climática *Aralab* (modelo Testa CT 1000 EP20) de acordo com o protocolo de aquecimento/arrefecimento ilustrado na Figura 2a. O período de envelhecimento consistiu em 100 ciclos térmicos, tendo cada ciclo a duração de 12 horas, durante as quais a temperatura do ar dentro da câmara variou entre -20 °C e 50 °C. Esta gama de temperaturas está compreendida entre os limites de temperatura máxima definidos na CEN/TS 19101:2022 (CEN 2022) (*i.e.*, entre -40 °C e T_g - 20 °C), pretendendo simular condições de temperatura de serviço a que uma estrutura em compósito de GFRP pode estar sujeita num ambiente exterior. Terminado o período de envelhecimento, as propriedades residuais dos compósitos foram avaliadas através de ensaios de tração, flexão e corte interlaminar, realizados a temperatura ambiente, e ensaios de DMA, de acordo com os procedimentos descritos na Secção 2.3.1.

2.3.3 Ensaios de durabilidade em ambiente higrotérmico (série 3)

Nos ensaios de envelhecimento higrotérmico, as placas de compósito foram imersas em água e expostas à temperatura constante de 20 °C, 35 °C e 50 °C (temperaturas inferiores à T_g) durante 1 mês, dentro de uma câmara térmica. Os bordos das placas foram previamente selados com resina epóxi (*Icosit K101-N*, da *Sika*). Após o período de envelhecimento, os provetes de ensaio foram extraídos das placas por corte CNC (*computer numerical control*) e testados, em estado húmido, para determinar as suas propriedades residuais em tração, flexão e corte interlaminar, e a sua T_g. Paralelamente, foi também avaliada a absorção de água dos compósitos. Para o efeito, 3 provetes de cada compósito (com dimensões de 60 × 60 × 8,5 (mm)) foram imersos em água às mesmas temperaturas (20 °C, 35 °C e 50 °C) e pesados periodicamente para medir a variação da sua massa (*i.e.*, absorção de água) ao longo do tempo.

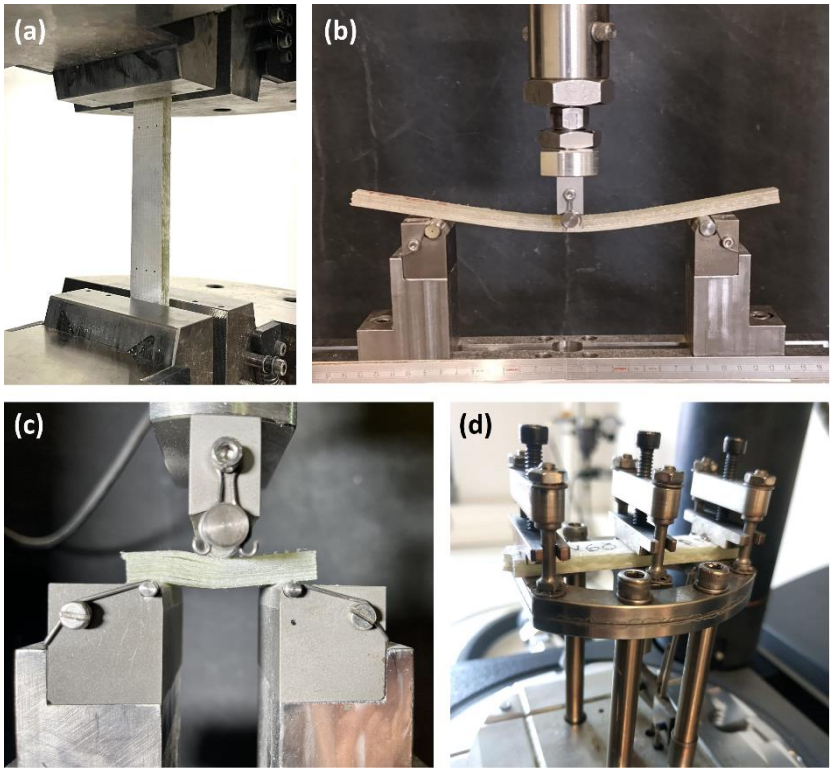


Figura 1 – Configuração dos ensaios de (a) tração, (b) flexão, (c) corte interlaminar, e (d) DMA.

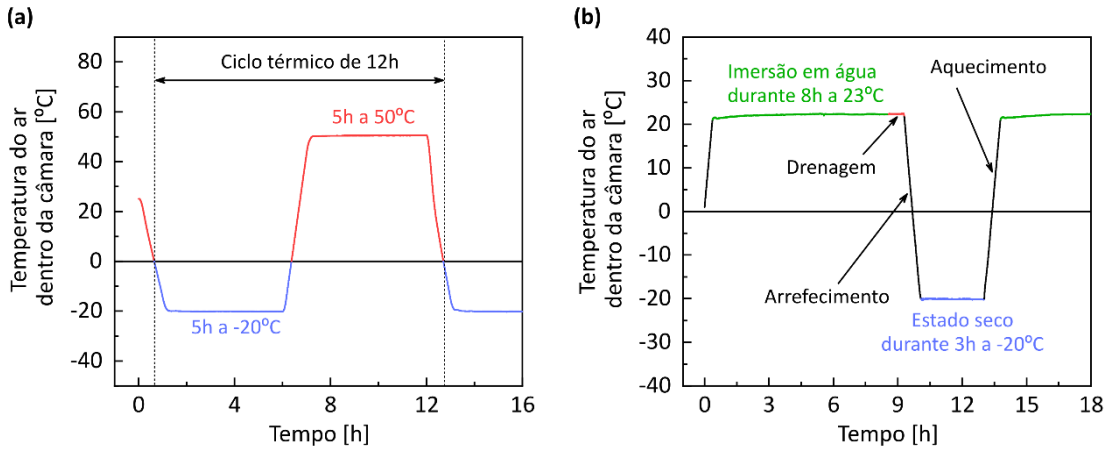


Figura 2 - Variação da temperatura do ar no interior das câmaras climáticas utilizadas no envelhecimento acelerado de provetes expostos a (a) ciclos térmicos e (b) ciclos de gelo-degelo.

2.3.4 Ensaios de durabilidade – ciclos de gelo-degelo (série 4)

O estudo da durabilidade em ambiente de gelo-degelo (*i.e.*, exposição cíclica e combinada a humidade e ciclos térmicos) foi realizado numa câmara climática *Aralab* (modelo Fitoclima 500 EPC45). As placas de compósito foram primeiramente precondicionadas por imersão em água a 20 °C durante 30 dias. Terminado o período de pré-condicionamento, os materiais foram submetidos a 100 ciclos gelo-degelo. Conforme ilustrado na Figura 2b, cada ciclo teve uma duração aproximada de 13 h e 25 min, sendo constituído por 4 fases: (i) uma fase a 23 °C com duração de 8 h, com as placas imersas em água; (ii) uma fase de escoamento da água (40 min), seguida do arrefecimento da câmara à temperatura

de -20 °C (45 min); (iii) uma fase a -20 °C durante 3 h, sem água no tanque de imersão; (iv) uma fase de aquecimento até 23 °C (45 min), seguida de um período de enchimento do tanque de imersão (15 min).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL NÃO ENVELHECIDO

O Quadro 2 apresenta as propriedades iniciais dos compósitos (*i.e.*, em estado não envelhecido). Os resultados mostram que as propriedades (resistência e módulo de elasticidade) à tração e em flexão do compósito termoplástico (TP) são comparáveis às do compósito termoendurecível (TE), apresentando diferenças relativas máximas entre -3% e 5%. Além disso, a resistência ao corte interlaminar do compósito com resina termoplástica é 31% superior à do compósito com resina de poliéster, sendo um indicador da boa (melhor) adesão entre as fibras de vidro e a matriz de resina acrílica. A temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos (pós-curados) foi determinada tendo como referência a temperatura de início do decaimento da curva do módulo de armazenamento (em escala logarítmica), tendo-se obtido valores de T_g de 80,3 °C para o compósito termoplástico de matriz acrílica, e 84,9 °C para o compósito termoendurecível com matriz de poliéster insaturado isoftálico.

Quadro 2 - Propriedades iniciais dos compósitos em estado não envelhecido, apresentadas em termos de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses).

Propriedades iniciais (estado não envelhecido)	**Compósito termoplástico (TP)**	**Compósito termoendurecível (TE)**
Resistência à tração [MPa]	427 ± 29 (6,7%)	452 ± 24 (5,3%)
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	14,8 ± 0,3 (2,3%)	14,6 ± 0,5 (3,3%)
Resistência à flexão [MPa]	474 ± 14 (2,9%)	459 ± 17 (3,6%)
Módulo em flexão [GPa]	23,2 ± 0,8 (3,5%)	24,2 ± 0,7 (3,1%)
Resistência ao corte interlaminar [MPa]	50,5 ± 1,6 (3,2%)	38,7 ± 3,3 (8,6%)
Temperatura de transição vítrea, T_g [°C]	80,3 ± 1,5 (1,9%)	84,9 ± 0,3 (0,4%)

3.2 DURABILIDADE APÓS CICLOS TÉRMICOS

De acordo com o CEN (2022), a exposição de materiais FRP a temperaturas negativas pode fragilizar a matriz polimérica e a sua capacidade de transferir tensões entre as fibras, enquanto a exposição a temperaturas elevadas, sobretudo na proximidade da temperatura de transição vítrea da resina (T_g), tipicamente provoca reduções significativas na sua resistência e rigidez. Apesar disso, os dados existentes para compósitos termoendurecíveis mostram que variações de temperatura compreendidas entre 10 °C e 30 °C em torno da temperatura ambiente geralmente não têm efeitos desfavoráveis nas suas propriedades mecânicas, nem na aderência fibra-matriz (CEN 2022). Porém, amplitudes de variação da temperatura podem gerar micro-fendilhação, caso a diferença entre os coeficientes de expansão térmica da resina e das fibras for significativa.

Os valores médios das propriedades dos compósitos após 100 ciclos térmicos são apresentadas no Quadro 3 em valores absolutos, e na Figura 3 em valores normalizados em relação às propriedades iniciais, com exceção da T_g, que é apresentada em valores absolutos. Os resultados mostram que a T_g, a resistência e a rigidez de ambos os compósitos foram pouco (ou nada) afetadas pelos ciclos térmicos com amplitude entre -20 °C e 50 °C. A T_g do compósito termoplástico não se alterou, enquanto a do compósito termoendurecível aumentou ~2 °C, indiciando uma possível pós-cura (adicional) da resina de poliéster.

Apesar da maioria das propriedades mecânicas não ter mostrado sinais de degradação, obtiveram-se reduções (de 9-10%) na resistência à tração e no módulo em flexão do compósito termoplástico (*vs.* 1% e 5% no compósito de matriz termoendurecível). Em ambos os casos, as reduções obtidas são da ordem de grandeza das reportadas na literatura para compósitos termoendurecíveis (CEN 2022). Como tal, embora o presente estudo esteja limitado a um número reduzido de ciclos, os resultados sugerem que o compósito termoplástico possui um desempenho comparável ao do compósito termoendurecível quando sujeito a variações térmicas representativas das condições de serviço de estruturas de GFRP em ambientes exteriores.

Quadro 3 - Propriedades dos compósitos após 100 ciclos térmicos, apresentadas em termos de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses).

Propriedades do material envelhecido (ciclos térmicos)	**Compósito termoplástico (TP)**	**Compósito termoendurecível (TE)**
Resistência à tração [MPa]	391 ± 10 (2,5%)	428 ± 19 (4,4%)
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	14,5 ± 0,3 (1,8%)	15,0 ± 0,5 (3,1%)
Resistência à flexão [MPa]	466 ± 18 (3,8%)	466 ± 13 (2,8%)
Módulo em flexão [GPa]	21,0 ± 0,8 (3,8%)	23,9 ± 1,0 (4,1%)
Resistência ao corte interlaminar [MPa]	51,3 ± 1,9 (3,7%)	37,4 ± 6,0 (16,1%)
Temperatura de transição vítrea, T_g [°C]	80,4 ± 0,5 (0,7%)	87,1 ± 0,2 (0,2%)

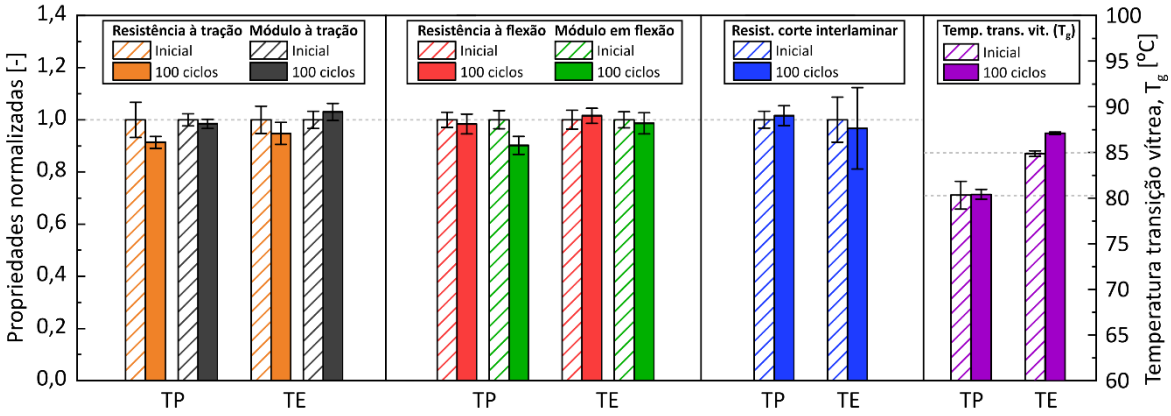


Figura 3 – Propriedades mecânicas (valores normalizados em relação às propriedades em estado não envelhecido) e T_g dos compósitos após exposição a 100 ciclos térmicos.

3.3 DURABILIDADE APÓS ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO

A Figura 4 mostra a variação da massa dos compósitos durante os primeiros 25 dias de imersão em água a 20 °C, 35 °C e 50 °C; note-se que o período necessário para a saturação completa dos provetes ainda não foi atingido. Os resultados mostram que, por um lado, e como esperado, a capacidade de absorção de água de ambos os compósitos aumenta com o aumento da temperatura de imersão. Por outro lado, o compósito termoplástico exibe uma capacidade de absorção de água significativamente superior à do compósito termoendurecível, presumivelmente em virtude das diferenças entre as propriedades da resina acrílica e de poliéster no que se refere à sua afinidade com as moléculas de água.

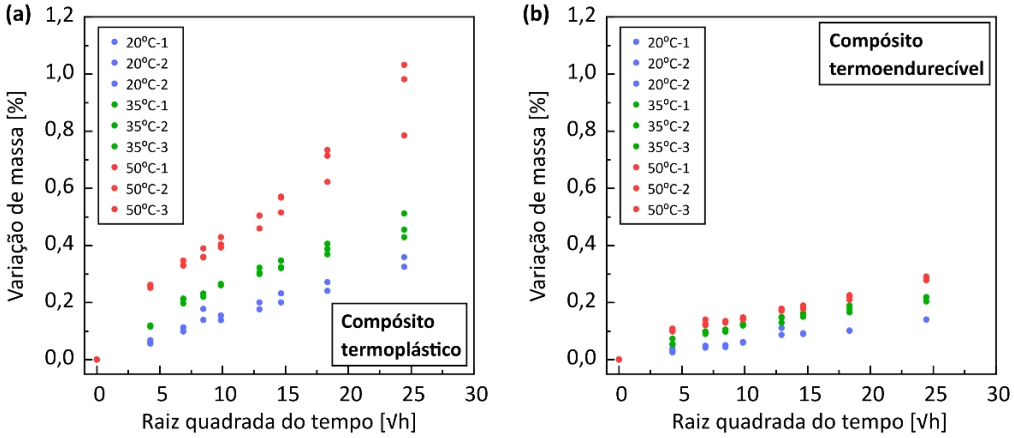


Figura 4 – Perfis de absorção de água dos compósitos de matriz (a) termoplástica e (b) termoendurecível, para imersão a 20 °C, 35 °C e 50 °C (período de medição: 25 dias).

As propriedades residuais dos compósitos após 1 mês de envelhecimento higrotérmico são apresentadas na Figura 5 e no Quadro 4. As análises DMA mostram que a T_g de ambos os compósitos diminuiu após imersão em água, observando-se que: (i) a 20 °C, a redução da T_g do compósito termoplástico (em 9 °C) foi superior à do compósito termoendurecível (5 °C); e (ii) o aumento da temperatura de imersão resultou em reduções menos acentuadas da T_g, sugerindo a ocorrência de fenómenos adicionais de pós-cura da matriz. Os módulos à tração e em flexão dos compósitos, sendo propriedades dominadas pelo comportamento das fibras (as quais são menos suscetíveis à ação da humidade do que as resinas), apresentaram reduções ligeiras ou, na generalidade dos casos, nenhuma degradação significativa em ambiente higrotérmico. Inversamente, as propriedades com maior dependência da matriz apresentaram reduções ligeiras a moderadas, resultantes da degradação da resina e da sua adesão às fibras. Esta degradação é tipicamente causada, de forma isolada ou combinada, pela expansão da matriz devido à absorção de água, e pela plasticização e/ou hidrólise da matriz (CEN 2022), podendo estes fenómenos ainda ser compensados pelos efeitos benéficos da pós-cura da matriz. Como consequência das diferenças na composição das resinas acrílica e de poliéster, bem como da sua capacidade de absorção de água, as propriedades dominadas pela matriz foram afetadas de forma diferente nos compósitos termoplástico e termoendurecível. As principais diferenças observaram-se na resistência ao corte interlaminar (propriedade que reflete a qualidade da adesão fibra-matriz) que, no caso do compósito termoplástico, reduziu 34% após imersão a 20 °C, enquanto no compósito termoendurecível não foi afetada negativamente. Também as resistências à tração e flexão do compósito termoplástico (propriedades que embora sejam predominantemente influenciadas pelo desempenho das fibras, também dependem significativamente da adesão fibra-matriz, em particular para a arquitetura de fibras considerada, que contém múltiplas camadas orientadas a ±45°) apresentaram reduções, embora mais ligeiras, de respetivamente 16% e 10% após imersão a 20 °C (*vs.* 12% e 5% no compósito termoendurecível), e que se agravaram para 25% e 28% após imersão a 50 °C.

Estes resultados sugerem que as propriedades da matriz termoplástica com resina acrílica, incluindo a sua adesão às fibras de vidro, são mais suscetíveis aos efeitos de degradação causados pela exposição à humidade, acelerada e agravada pela combinação com temperatura elevada, do que as propriedades da matriz de poliéster isoftálico. Apesar de os resultados obtidos não permitirem inferir por si só os principais mecanismos de degradação em causa, será razoável admitir que a degradação observada se tenha devido à ocorrência de fenómenos como a plasticização da matriz (devida à presença de moléculas de água entre as cadeias poliméricas), assim como outros fenómenos, como a hidrólise das

cadeias poliméricas ou a degradação da aderência fibra-matriz, os quais competem com os efeitos benéficos da pós-cura da matriz. Embora a durabilidade do compósito termoplástico não aparente ter sido afetada de forma gravosa após 100 ciclos térmicos (ver secção 2.3.2), a sua elevada capacidade de absorção de água (Figura 4) torna-o particularmente suscetível a degradação na presença de água.

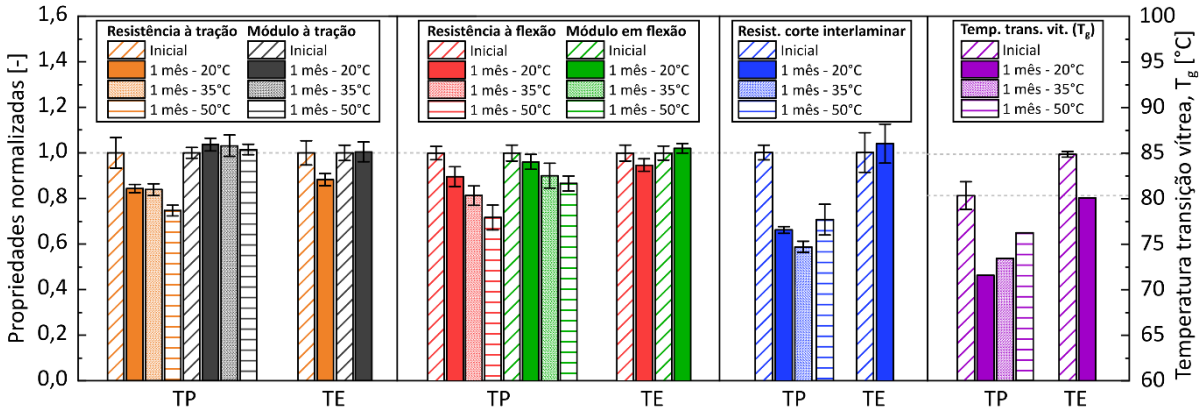


Figura 5 - Propriedades mecânicas (valores normalizados em relação às propriedades do material não envelhecido) e T_g dos compósitos envelhecidos em imersão em água a 20°C, 35°C e 50°C.

Quadro 4 - Propriedades após imersão em água a 20 °C, 35 °C e 50 °C apresentadas em termos de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses).

Propriedades do material envelhecido (ambiente higrotérmico)	**Temperatura de imersão**	**Compósito termoplástico (TE)**	**Compósito termoendurecível (TE)**
Resistência à tração [MPa]	20 °C	360 ± 8 (2,1%)	399 ± 12 (3,1%)
	35 °C	358 ± 11 (3,0%)	-
	50 °C	319 ± 10 (3,2%)	-
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	20 °C	15,3 ± 0,4 (2,7%)	14.6 ± 0.6 (4,3%)
	35 °C	15,2 ± 0,7 (4,6%)	-
	50 °C	15,0 ± 0,3 (2,3%)	-
Resistência à flexão [MPa]	20 °C	424 ± 21 (4,9%)	435 ± 27 (2,9%)
	35 °C	385 ± 20 (5,3%)	-
	50 °C	340 ± 26 (7,6%)	-
Módulo de flexão [GPa]	20 °C	22,3 ± 0,8 (3,4%)	24.7 ± 0.5 (2,1%)
	35 °C	20,9 ± 1,3 (6,1%)	-
	50 °C	20,1 ± 1,1 (5,5%)	-
Resistência ao corte interlaminar [MPa]	20 °C	33,4 ± 0,7 (2,2%)	40,2 ± 3,3 (8,2%)
	35 °C	29,6 ± 1,3 (4,2%)	-
	50 °C	35,7 ± 3,4 (9,6%)	-
Temperatura de transição vítrea, T_g [°C] [(a)]	20 °C	71,6	80,1
	35 °C	73,4	-
	50 °C	76,2	-

[(a)] Média de 2 provetes

3.4 DURABILIDADE APÓS CICLOS DE GELO-DEGELO

As propriedades residuais dos compósitos após 100 ciclos de gelo-degelo são apresentadas em valores absolutos no Quadro 5, e em valores normalizados na Figura 6 (excetuando a T_g, que é indicada em valor absoluto). A Figura 6 mostra também a retenção das propriedades após o período inicial de pré-condicionamento de 1 mês em imersão de água a 20 °C (correspondente às propriedades obtidas após envelhecimento higrotérmico a 20 °C – série 3). Os resultados permitem concluir que: (i) as propriedades mecânicas e a T_g dos compósitos foram afetadas de forma mais significativa durante o período de pré-condicionamento (ver secção 2.3.3); e (ii) que a exposição a ciclos de gelo-degelo conduziu, no pior dos casos, a degradação adicional inferior à obtida após a fase de pré-condicionamento. Com efeito, enquanto as propriedades em tração e a T_g não foram afetadas pelos ciclos de gelo-degelo, estes causaram reduções adicionais nas propriedades em flexão da ordem dos 7-8% no compósito termoplástico, e entre 3 e 8% no compósito termoendurecível. Comparativamente aos resultados obtidos na série 3, que indicaram maior suscetibilidade do compósito termoplástico a degradação na presença de humidade, em particular na sua resistência ao corte interlaminar, não se observaram sinais de degradação adicional nesta propriedade devido aos ciclos de gelo-degelo. Porém, a resistência ao corte interlaminar do compósito termoendurecível reduziu 16% em relação à obtida após o período de pré-condicionamento (embora os resultados tenham apresentado elevada dispersão).

De acordo com a literatura (referente exclusivamente a compósitos termoendurecíveis), a exposição a temperaturas negativas pode endurecer e fragilizar a matriz dos compósitos FRP e, consequentemente, afetar a sua capacidade de transferir tensões entre as fibras. Já as ações cíclicas de congelamento/descongelamento podem ter efeitos adversos quer na matriz (gerando micro-fendilhação) quer na sua adesão às fibras (causando delaminação), devido à diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos dois materiais constituintes (CEN 2022). Estes efeitos, para além de afetarem as propriedades mecânicas do compósito, favorecem a entrada de humidade no material e, deste modo, aumentam a sua suscetibilidade a outros fenómenos de degradação causados pela presença de água (CEN 2022). Contudo, em face dos resultados obtidos no presente estudo, concluiu-se que para a gama de temperaturas e número de ciclos considerado, o compósito de matriz termoplástica não aparenta ser mais suscetível à degradação por ação de ciclos de gelo-degelo do que o compósito convencional de matriz termoendurecível.

Quadro 5 – Propriedades dos compósitos após 100 ciclos de gelo-degelo apresentadas em termos de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação (entre parênteses).

Propriedades do material envelhecido (ciclos gelo-degelo)	**Compósito termoplástico**	**Compósito termoendurecível**
Resistência à tração [MPa]	358 ± 29 (6,7%)	408 ± 41 (10,1%)
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	15,1 ± 0,6 (3,8%)	14,1 ± 0,4 (2,7%)
Resistência à flexão [MPa]	391 ± 5 (1,2%)	397 ± 15 (3,8%)
Módulo em flexão [GPa]	21,4 ± 0,5 (2,6%)	22,4 ± 0,7 (3,2%)
Resistência ao corte interlaminar [MPa]	38,9 ± 0,9 (2,4%)	33,8 ± 4,2 (12,3%)
Temperatura de transição vítrea, T_g [°C]	72,3 ± 0,2 (0,3%)	81,2 ± 0,3 (0,3%)

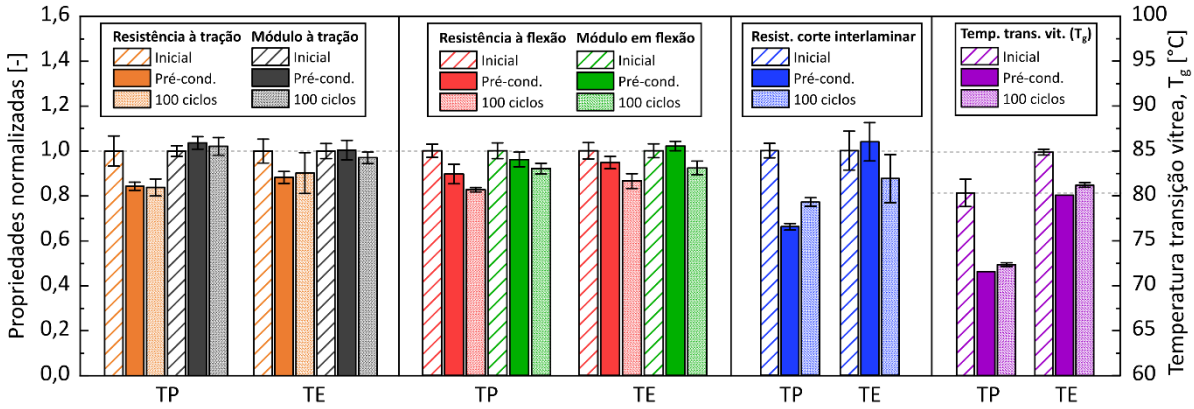


Figura 6 - Propriedades mecânicas (valores normalizados em relação às propriedades em estado não envelhecido)e T_g dos compósitos após exposição a 100 ciclos de gelo-degelo.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentado os resultados iniciais de um estudo em curso sobre o comportamento mecânico e a durabilidade de um compósito de GFRP, produzido por infusão a vácuo, com fibras de vidro e uma resina acrílica termoplástica, que pode ser reprocessada e reciclada. O estudo teve como principal objetivo comparar o desempenho do compósito termoplástico (com mais-valias em termos da sua sustentabilidade ambiental) com um compósito convencional produzido com resina de poliéster insaturado isoftálico, avaliando o seu potencial de aplicação em estruturas de Engenharia Civil. Com esse propósito, os compósitos foram testados em laboratório para quantificar as suas propriedades mecânicas iniciais e as suas propriedades residuais após serem expostos a condições de envelhecimento acelerado que simulam a exposição prolongada a ciclos térmicos, ciclos de gelo-degelo, e ambientes higrotérmicos a diferentes temperaturas.

O compósito termoplástico apresentou um desempenho comparável ao do compósito termoendurecível no que se refere às suas propriedades mecânicas iniciais e durabilidade após 100 ciclos térmicos (entre -20 °C e 50 °C) e 100 ciclos de gelo-degelo (entre -20 °C e 23 °C, em presença de água). Contudo, os ensaios mostraram que o compósito de matriz termoplástica apresenta uma capacidade de absorção de água significativamente superior à do compósito de matriz termoendurecível, bem como maior suscetibilidade a degradação na presença de humidade, sendo essa degradação ainda mais agravada com o aumento da temperatura de imersão.

Não obstante tratar-se de um estudo preliminar, estes resultados indicam que a utilização de compósitos de matriz termoplástica para aplicações estruturais em Engenharia Civil poderá ser viável. Na fase seguinte do projeto no qual esta investigação se insere, o estudo da durabilidade do compósito termoplástico será aprofundado, nomeadamente através da realização de ensaios em materiais sujeitos a períodos de envelhecimento mais longos, bem como através da realização de análises químicas, térmicas e físicas à resina acrílica no seu estado puro (sem fibras de reforço). Os resultados permitirão, por um lado, obter dados experimentais (atualmente limitados) sobre o desempenho de compósitos termoplásticos em vários ambientes e, por outro, propor fatores de redução que considerem os efeitos das condições ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos FRP produzidos com resina termoplástica que, atualmente, não são cobertos pelas normas e códigos estruturais de dimensionamento. Os resultados a obter futuramente no âmbito deste estudo permitirão aferir a aplicabilidade do fator de conversão da CEN/TS 19101:2022 a este tipo de compósitos

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao centro de investigação CERIS (financiamento FCT, UIDB/04625/2020, doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020) e à FCT pelo financiamento desta investigação (projecto Durable-FRP, PTDC/ECI-EGC/4609/2020, http://doi.org/10.54499/PTDC/ECI-EGC/4609/2020) e, também, ao grupo industrial *Arkema* pela produção e fornecimento das placas de compósito. Os autores agradecem também a Abu T. Shahid pela realização dos ensaios DMA.

REFERÊNCIAS

ASTM (2000). ASTM D2344/D 2344M-00, *Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates*, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, EUA.

ASTM (2013). ASTM D5379/D5379M-05, *Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method,* ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, EUA.

ASTM (2002). ASTM D2504-02, *Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins,* ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, EUA.

Biron M. (2018). Thermoplastics and thermoplastic composites, William Andrew Publishing.

CEN (2022), *Design of fibre-polymer composite structures,* CEN/TS 19101: 2022, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

Cousins D. S., Suzuki Y., Murray R. E., Samaniuk J. R., Stebner A. P. (2019). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades, Journal of Cleaner Production, 209:1253-1263.

D'Antino T., Pisani M.A. (2023). Tensile and compressive behaviour of thermoset and thermoplastic GFRP bars, Construction and Building Materials, 366:130104.

ISO (1997). ISO 527-4, *Plastics – Determination of tensile properties. part 4: test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, Organização Internacional de Normalização, Genebra, Suíça.

ISO (1998). ISO 14125, *Fiber-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties*, Organização Internacional de Normalização, Genebra, Suíça.

ISO (2012). ISO 6721, Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 11: Glass transition temperature, Organização Internacional de Normalização, Genebra, Suíça.

Kazemi M. E., Shanmugam Logesh, Lu D., Wang X., Wang B., Yang J. (2019). Mechanical properties and failure modes of hybrid fi ber reinforced polymer composites with a novel liquid thermoplastic resin, Elium ®, Composites Part A, 125:105523.

Kravtsova V., Minchenkov K., Gusev S., Evlashin S., Bondareva J., Alajarmeh O., Safonov A. (2024). Recyclability of unidirectional reinforced pultruded thermoplastic profiles into composite laminates, Composites Communications, 46:101843.

Minchenkov K., Vedernikov A., Safonov A., Akhatov I. (2021). Thermoplastic pultrusion: a review, Polymers, 13(2):1-36.

Obande W., Mamalis D., Ray, D., Yang L., Brádaigh C. M. (2019). Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites, Materials & Design, 175:107828.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

FISSURAÇÃO DE ARGAMASSAS DEVIDO À RETRAÇÃO RESTRINGIDA IMPOSTA PELO SUPORTE: INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE FIBRAS NATURAIS

Cinthia Maia Pederneiras [abc]; Maria do Rosário Veiga [a]; Jorge de Brito [c]

[a] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. cpederneiras@c5lab.pt; rveiga@lnec.pt

[b] c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Lisboa, Portugal.

[c] CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO

A fissuração de um reboco pode ocorrer devido a diversos fatores, sendo uma anomalia que pode afetar gravemente a sua estanqueidade e, consequentemente, a sua durabilidade. Uma das principais causas do aparecimento de fissuras nos revestimentos é a ocorrência de retração restringida. As argamassas de revestimento podem sofrer variações dimensionais por retração durante o seu processo de endurecimento. Como estão aderentes a um elemento em geral mais rígido, estas deformações podem ser impedidas ou limitadas pelo suporte, o que origina o desenvolvimento de tensões de tração sobre as argamassas. Caso as argamassas não sejam capazes de acomodar estas tensões, este fenómeno pode gerar fissuras no reboco.

Este estudo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à fissuração devida à retração restringida de argamassas de revestimento e a eficácia da incorporação de fibras recicladas no controlo desse tipo de fissuração. Para isso, foi utilizado um modelo de avaliação experimental desenvolvido e validado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em estudos anteriores. O método experimental adotado para essa avaliação consiste em restringir a deformação da argamassa, desde a moldagem até à estabilização, medindo e registando as tensões de tração induzidas. O ensaio permite quantificar a capacidade de relaxação da argamassa através da curva de força desenvolvida ao longo do tempo, durante o ensaio de retração restringida. Numa segunda fase, o dispositivo permite libertar a deformação da argamassa e realizar um ensaio de tração pura. Nessa fase, é analisada a energia de rotura por tração assim como as curvas de força-deslocamento durante o ensaio. Este ensaio permite avaliar a tendência à fissuração das argamassas de revestimento por retração restringida e medir as tensões induzidas em rebocos e transmitidos ao suporte.

Um dos métodos para controlar a fissuração provocada por este fenómeno consiste na incorporação de redes ou fibras disseminadas na pasta. No presente estudo, foram selecionadas argamassas à base de cimento, sem e com incorporação de fibras naturais recicladas. Os resultados obtidos mostraram que as argamassas com fibras naturais apresentaram uma menor suscetibilidade à fissuração, já que as fibras podem evitar ou retardar o crescimento das fissuras através do seu mecanismo de ponte. Esta melhoria de comportamento está também relacionada com a compatibilidade da fibra com a matriz da argamassa.

PALAVRAS-CHAVE

Argamassa; Fissuração; Retração restringida; Fibras naturais.

1 INTRODUÇÃO

As argamassas de revestimento têm como principal função proteger a parede de alvenaria e elementos de betão contra ações externas. Além da funcionalidade estética de acabamento, os revestimentos também têm de assegurar a integridade e durabilidade das estruturas construídas. Para isso, os revestimentos devem ter uma resistência à fissuração adequada para suportar as tensões de tração induzidas principalmente devido à retração restrita. Geralmente, as argamassas são aplicadas num suporte rígido o que dificulta a sua deformação, produzindo assim tensões de tração. A retração restringida das argamassas é considerada uma das principais causas de fissuração. A resistência à fissuração está correlacionada com a capacidade de deformação da argamassa e sua capacidade de absorver tensões. As argamassas devem dissipar as tensões impostas, reduzindo a suscetibilidade à fissuração.

A avaliação da suscetibilidade à fissuração é muito complexa, uma vez que depende de vários fatores que se alteram ao longo do tempo, ou seja, o desenvolvimento da retração restringida, a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração e a capacidade da argamassa para dissipar por relaxação as tensões geradas. Existem alguns ensaios para avaliar a magnitude das forças induzidas pela retração restringida: ensaio uniaxial restringido (Hong et al., 2023; Tan et al., 2024), ensaio de laje restringida (Baloch et al., 2023; Guo & Wang, 2023), ensaio de viga restringida ou ensaio de anel restringido (Afroz et al., 2023; Beushausen & Arito, 2018; Yang et al., 2019). O ensaio de anel restringido tem sido mais amplamente adotado do que os restantes, devido ao seu custo relativamente baixo, à sua capacidade de proporcionar uma restrição final uniforme, à sua simplicidade e versatilidade. Este teste mede os efeitos das variações dimensionais nas tensões de tração induzidas, o que pode indicar o potencial de fissuração da argamassa em condições de retração. No entanto, existem algumas desvantagens relativamente a este ensaio: por ser considerado um ensaio passivo, as tensões geradas pela restrição do anel podem ser incapazes de provocar a fissuração das argamassas de reboco. Além disso, o ensaio do anel apenas mede a redução de dimensões e não é utilizado em condições de expansão (Bentz et al., 2013). Assim, com o objetivo de obter um modelo preciso e eficiente para medir a retração restringida, Veiga (Veiga, 2000; Veiga et al., 2007) desenvolveu um método experimental que permite registar as forças geradas ao longo do tempo por retração restringida e também determinar a resistência à tração da argamassa. Através deste ensaio, é possível relacionar a energia de fratura com a tendência à fissuração ao longo do tempo. O presente estudo utilizou este modelo experimental inovador para medir a retração restringida das argamassas.

Neste estudo, aplicou-se este novo modelo experimental para investigar argamassas cimentícias (1:4) reforçadas com fibras naturais com teores de incorporação de 10% do volume total da argamassa. As fibras são resíduos de diferentes indústrias portuguesas e foram adicionadas com comprimento de 30 mm. A caracterização destas fibras foi publicada em trabalhos anteriores (Pederneiras et al., 2019, 2021). As fibras de lã são provenientes da tosquia das ovelhas, da fração que não foi utilizada no fabrico têxtil. As fibras de coco são resíduos do fabrico de painéis de isolamento. As fibras de linho são resíduos agrícolas, também da fração não utilizável na indústria têxtil.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Na produção das argamassas, foi utilizado o cimento Portland (CEM II/B-L 32.5 N, de acordo com a norma EN 197-1). O agregado fino utilizado foi areia silicosa. As fibras recicladas utilizadas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Fibras recicladas utilizadas no estudo

2.2 MÉTODOS

Neste estudo, foram realizados dois ensaios para determinar a retração das argamassas. Um deles é a variação dimensional livre após o endurecimento (CSTB Cahier 2669-4), que mede a retração sem restrições. O outro ensaio é um modelo experimental para avaliar a suscetibilidade à fissuração de argamassas reforçadas com fibras por retração restringida, desenvolvido por Veiga (Veiga, 1998).

O ensaio de retração livre avalia a retração livre em diferentes idades. O ensaio consiste em medir o comprimento inicial do provete prismático, logo a seguir à desmoldagem, pelo defletómetro com o eixo longitudinal na posição vertical, e depois repetir a medição periodicamente, para determinar as variações. Estas medições foram registadas às idades de 2, 3, 6, 7, 10, 14, 21, 28, 35, 41, 50, 56, 70, 80 e 90 dias. Foram utilizadas três amostras por argamassa. A variação dimensional é dada pela Equação 1, em que ε_i é a variação específica do comprimento do provete (i = 1, 2, 3, ..., n), ΔL_i a variação do comprimento entre o comprimento inicial e final do provete, e L_i o comprimento inicial do provete.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} x\ 100 \qquad \text{Equação 1}$$

O ensaio de retração restringida mede ao longo do tempo a tensão induzida devido à retração restringida desde a moldagem, considerando a capacidade de relaxação da argamassa. Quando não se verifica fissuração durante o ensaio de retração restringida, é realizado o ensaio de tração com o mesmo provete, produzindo uma rotura por tração. O equipamento permite registar as curvas força-deslocamento durante o ensaio de tração. A energia de rotura da argamassa é também registada. O equipamento é constituído por uma estrutura rígida e dois bordos de dimensões alargadas (Figura 2). Um dos bordos está fixo à estrutura e o outro tem um movimento longitudinal livre. Durante o ensaio de retração restringida, um transdutor de força para o deslocamento enquanto regista a força gerada pela restrição da retração.

O ensaio baseia-se na condição do aparecimento da primeira fissura, denominada Coeficiente de Segurança para a Abertura da primeira fissura, definido como $S = R_t/F_{rmax}$. Este coeficiente é obtido pela relação entre a resistência à tração da argamassa (R_t), determinada pelo ensaio de tração, e a força máxima gerada pela retração restringida (F_{rmax}), medida durante o ensaio de retração restringida. Quando $S < 1$ abre-se a primeira fissura logo durante o ensaio de retração restringida. Caso contrário, o mesmo provete é depois sujeito ao ensaio de tração e obtém-se um Rt superior ou igual a F_{rmax}, portanto $S \geq 1$. Outro critério que pode ser calculado a partir deste ensaio é o Coeficiente de Resistência à Evolução da Fissuração, que se define como $R = G/F_{rmax}$, em que G representa a energia de rotura e F_{rmax} a força máxima provocada pela retração restringida. Quando este coeficiente é elevado, é necessária uma maior quantidade de energia para o processo de evolução das fissuras na argamassa, diminuindo a probabilidade de fissuração.

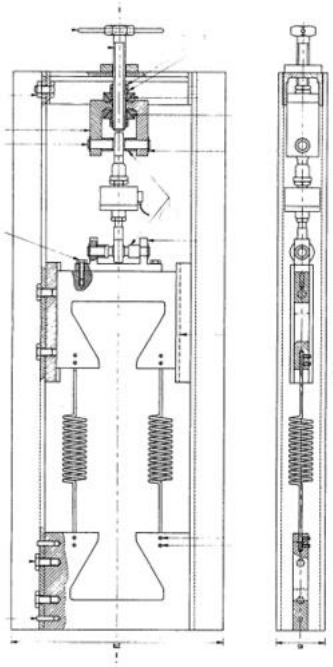


Figura 2 - Ilustração do equipamento usado para o ensaio de retração restringida

O procedimento adotado para a retração restringida consiste na moldagem da argamassa no equipamento. Os provetes são moldados na posição horizontal sobre placas de acrílico com óleo lubrificante, com 20 mm de espessura e mantêm-se em condições de temperatura de 23º ± 2 ºC e humidade relativa de 50% ± 5%.

As estruturas de suporte dos transdutores de deslocamento são aparafusadas e inicia-se as medições. Cerca de duas horas depois, quando a presa da argamassa o permite, são extraídos os varões laterais. Passadas 24 horas da moldagem (período suficiente para que o ponto de presa assegure a rigidez necessária), o aparelho é colocado na posição vertical, sendo depois retirada a base acrílica. O registo das tensões é realizado até à idade para o ensaio de resistência à tração, pré-definida em 14 dias, de acordo com estudos anteriores (Veiga, 1998; Veiga et al, 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Retração restringida

Os resultados do ensaio de retração restringida são apresentados na Figura 3. As curvas de força *versus* tempo obtidas no ensaio mostram a força devido à retração restringida (F_r) ao longo do tempo. Após o ensaio de retração restringida, não foram encontradas fissuras em nenhum dos provetes. Em geral, as curvas não apresentam tensões durante as primeiras 24 horas; durante este período, as forças devidas à retração restringida são praticamente nulas, uma vez que a argamassa é muito deformável. Cerca de 4 dias (96 horas) após a moldagem, nota-se um rápido aumento da força. Após este período, as tensões parecem praticamente estabilizadas. Aos 14 dias (336 horas) termina-se os ensaios de retração restringida e realiza-se os ensaios de tração. A carga de tração aplicada provoca um aumento instantâneo da força até se atingir a rotura.

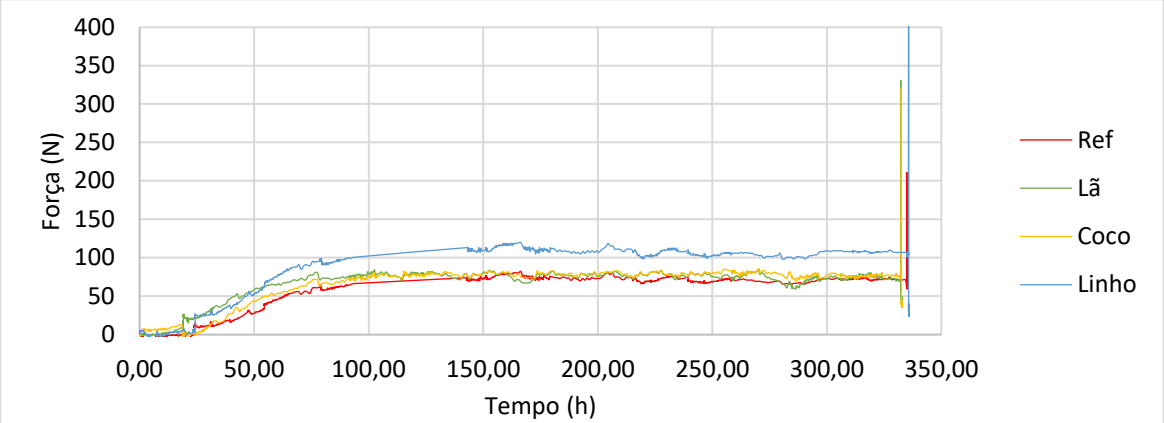


Figure 3 - Média das curvas obtidas no ensaio de retração restringida para argamassas

A Figura 4 mostra o provete da argamassa de referência após o ensaio de tração. Neste ensaio, o parafuso deve ser movido lentamente, produzindo uma força de tração no provete até aparecer a primeira fissura. O sistema continua a medir e a registar forças e deslocamentos. Após a abertura da primeira fissura, o movimento lento do parafuso é ajustado até que a resistência seja totalmente eliminada. A resistência à tração é dada pela força máxima atingida no ensaio de tração e ocorre geralmente imediatamente antes da abertura da primeira fissura.

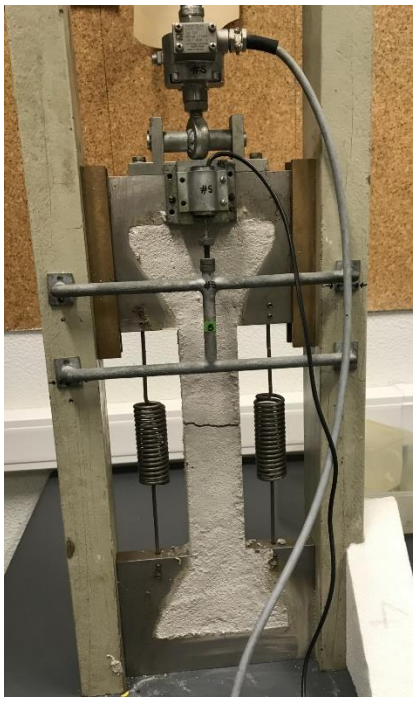


Figure 4 - Provete da argamassa de referência após ensaio de tração

Na Figura 5, apresenta-se as curvas força *versus* deslocamento obtidas nos ensaios de tração aos 14 dias para as quatro argamassas de cimento ensaiadas, realizados imediatamente após os ensaios de retração restringida. As argamassas reforçadas com fibras tiveram picos máximos superiores aos da argamassa de referência. Assim, conclui-se que a adição de fibras aumentou a resistência à tração das

argamassas para todas as fibras incorporadas. A partir destas curvas, é também possível calcular a energia de rotura das argamassas e avaliar a sua tenacidade. A energia de rotura é calculada pela área sob as curvas obtidas no ensaio. Verificou-se que as argamassas com fibras continuam a resistir a uma carga residual, mesmo depois de atingida a força máxima, o que não se observa para a argamassa de referência. Verifica-se também que as argamassas com fibras apresentam uma maior deformação na rotura, uma vez que o pico de resistência ocorre para um valor de deslocamento mais elevado. As curvas força / deslocamento das argamassas com fibras apresentaram maior absorção de energia tanto até à rotura como após a rotura, como também se apresenta na Tabela 1 (valor G). Estes valores representam um modo de rotura mais dúctil.

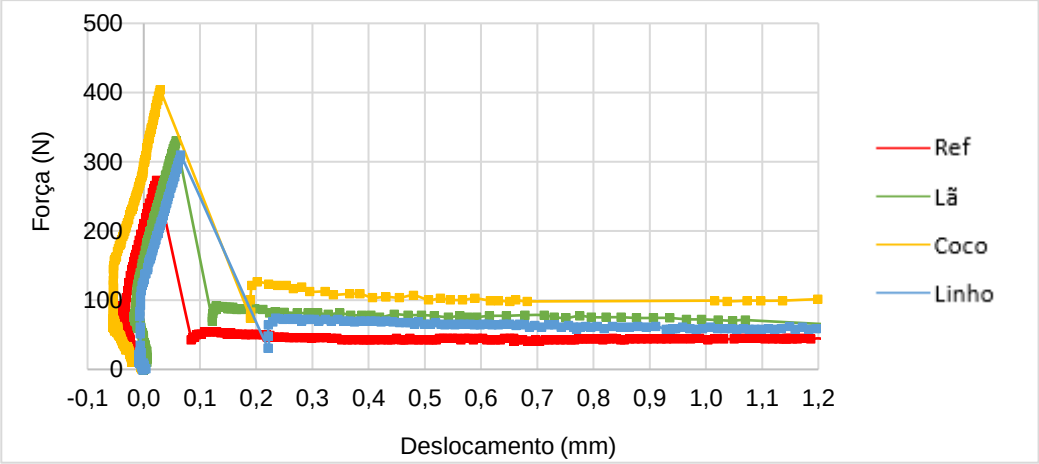


Figure 5 - Curvas de força *versus* deslocamento das argamassas

Os coeficientes do ensaio de retração restringida são apresentados no Tabela 1. Verificou-se que a incorporação de fibras aumentou a resistência à fissuração das argamassas. A argamassa de referência foi classificada como tendo uma suscetibilidade moderada à fissuração, devido ao parâmetro "R" - coeficiente de resistência à evolução da fissuração, que foi inferior ao das argamassas reforçadas com fibras, e também ao valor de S, que é inferior ao das argamassas reforçadas com fibras. De um modo geral, verifica-se que quer a resistência à tração quer a ductilidade das argamassas aumentam com a adição de fibras.

Tabela 1 - Coeficientes do ensaio de retração restringida

Argamassas	F_{rmax} (N)	Desvio-padrão	R_t (N)	Desvio-padrão	G (N.mm)	Desvio-padrão	S	R	Classificação quanto à suscetibilidade à fissuração
Referência	81.1	17.5	298.2	58.5	69.7	15.1	3.7	0.9	MODERADO
Lã	82.5	29.8	310.2	68.9	92.0	54.2	3.8	1.1	BAIXO
Coco	84.7	43.7	323.2	77.9	87.4	21.5	3.8	1.0	BAIXO
Linho	76.5	12.8	337.3	10.1	87.8	29.7	4.4	1.1	BAIXO

De acordo com a classificação, a incorporação de linho destacou-se como a argamassa menos suscetível à fissuração, apresentando os valores mais elevados em ambos os critérios.

3.2. Retração livre

A retração livre das argamassas foi analisada pela variação dimensional após o endurecimento. Os

provetes foram medidos ao longo do tempo, desde a desmoldagem (às 24 h) até aos 90 dias, e os resultados são apresentados na Figura 6. A argamassa com fibras de linho apresentou um comportamento semelhante na retração livre em comparação com a argamassa de referência. Por outro lado, a incorporação de fibras de lã e de coco aumentou a retração livre da argamassa. A maior variação dimensional dos provetes ocorreu nos primeiros dias de idade e, a partir daí, apenas houve ligeiras oscilações, essencialmente provocadas por variações de humidade ou de temperatura. Assim, a incorporação destas fibras foi responsável por um aumento muito significativo da retração livre das argamassas. No entanto, pelos resultados do ensaio de retração restringida, estas argamassas são mais deformáveis do que a argamassa de referência, podendo dissipar as tensões devidas à retração. Dessa forma, o modelo experimental adotado para medir a retração restringida é mais completo do que apenas a medição da retração livre, permitindo considerar a influência de outros parâmetros, como a deformabilidade e a relaxação.

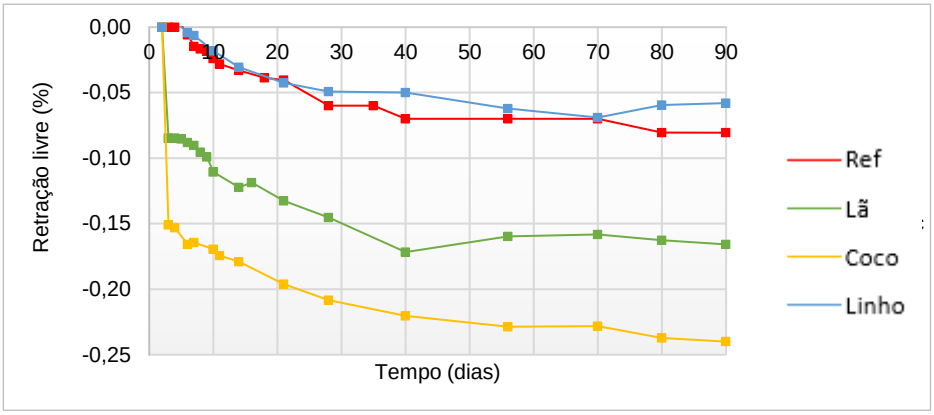


Figure 6 - Resultados do ensaio de retração livre das argamassas

Assim, faz-se de notar que o ensaio de variação dimensional não pode prever por si só a suscetibilidade à fissuração das argamassas, enquanto o modelo adotado permite avaliar o efeito da retração restringida possibilitando a obtenção de resultados mais precisos na avaliação da suscetibilidade à fissuração. O facto de as tensões induzidas pela retração restringida serem muito inferiores às correspondentes a uma deformação imposta da mesma magnitude aplicada instantaneamente mostra que elas dependem de parâmetros relacionados com a capacidade de relaxação da argamassa, que podem ser avaliados no ensaio de retração restringida.

4 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados, foi possível concluir que a adição de fibras naturais aumentou a resistência à fissuração das argamassas.

Relativamente ao ensaio de retração restringida, verificou-se que as argamassas de cimento reforçadas com fibras apresentaram uma baixa suscetibilidade à fissuração, enquanto a da argamassa de referência foi classificada como moderada, ainda que algumas das argamassas reforçadas com fibras tenham apresentado maior retração livre. De acordo com o coeficiente de resistência à evolução da fissuração, as argamassas reforçadas com fibras apresentaram valores mais elevados, o que indica que as fibras atuam como um mecanismo de ligação para impedir ou retardar o crescimento das fissuras. Estas argamassas apresentaram uma energia de rotura superior à da argamassa de referência, suportando assim as tensões impostas.

A partir dos resultados da retração livre, verifica-se que, nas primeiras idades, as argamassas modificadas que apresentaram maior variação dimensional foram, na sua maioria, as que obtiveram maiores forças geradas pela restrição de deslocamentos. Para uma análise mais aprofundada do comportamento à fissuração destas argamassas, o ensaio de retração restringida apresenta uma avaliação mais completa, levando em consideração a capacidade de relaxação das argamassas.

De uma forma geral, pode-se concluir que a incorporação de fibras naturais nas argamassas de cimento reduziu a sua suscetibilidade à fissuração. Além disso, o modelo experimental utilizado para avaliar a retração condicionada apresentou um método eficaz para avaliar a suscetibilidade à fissuração, tendo em conta uma multiplicidade de fatores que contribuem para a fissuração devido à retração restringida.

REFERÊNCIAS

Afroz, S., Nguyen, Q. D., Zhang, Y., Kim, T., & Castel, A. (2023). Cracking of limestone calcined clay blended concrete and mortar under restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, *386*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131599

Baloch, H., Grünewald, S., & Matthys, S. (2023). Assessment of shrinkage and bond behaviour of high performance cement-based composites as a repair mortar. *Developments in the Built Environment*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100203

Bentz, D. P., Weiss, W. J., Schlitter, J. L., & Weiss, W. J. (2013). Quantifying stress development and remaining stress capacity in restrained, internally cured mortars Article in ACI. In *ACI Materials Journal* (Vol. 110, Issue 1). https://www.researchgate.net/publication/235089451

Beushausen, H., & Arito, P. (2018). The influence of mix composition, w/b ratio and curing on restrained shrinkage cracking of cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, *174*, 38–46. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.099

Guo, Y. Q., & Wang, J. Y. (2023). Flexural behavior of high-strength steel bar reinforced UHPC beams with considering restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, *409*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133802

Hong, M., Lei, D., Zhu, F., Bai, P., & He, J. (2023). Experimental research on aggregate restrained shrinkage and cracking of early-age cement paste. *Cement and Concrete Research*, *172*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107246

Pederneiras, C. M., Veiga, R., & de Brito, J. (2019). Rendering mortars reinforced with natural sheep's wool fibers. *Materials*, *12*(22). https://doi.org/10.3390/ma12223648

Pederneiras, C. M., Veiga, R., & de Brito, J. (2021). Physical and mechanical performance of coir fiber-reinforced rendering mortars. *Materials*, *14*(4), 1–15. https://doi.org/10.3390/ma14040823

Tan, X., Du, J., Zhang, Q., Meng, W., & Bao, Y. (2024). Monitoring restrained shrinkage and cracks of ultra-high-performance concrete (UHPC) using distributed fiber optic sensors. *Construction and Building Materials*, *422*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135789

VEIGA, M. R., 1998 – Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. Lisboa: LNEC, 1998. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

VEIGA, M. R. (2000) - Influence of application conditions on the cracking susceptibility of renderings. RILEM Publications S.A:R.L., Concrete Science and Engineering, vol. 2, September 2000, p.134-140.

Veiga, M. R., Velosa, A. L., & Magalhães, A. C. (2007). Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, *40*(10), 1115–1126. https://doi.org/10.1617/s11527-006-9209-6

Yang, Y., Ma, L., Huang, J., Gu, C., Xu, Z., Liu, J., & Ni, T. (2019). Evaluation of the thermal and shrinkage stresses in restrained high-performance concrete. *Materials*, *12*(22). https://doi.org/10.3390/ma12223680

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

NATURAL WEATHERING OF A COMPOSITE PRODUCED WITH BASALT FIBRES AND PARTIALLY BIO-BASED UNSATURATED POLYESTER RESIN

Abu Toyob Shahid [a], Mário Garrido [b], João Ramôa Correia [c.]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, toyobshahid@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt

[c] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Growing concerns regarding environmental sustainability and the increasing use of fibre-polymer composites in a wide range of applications have been promoting the development of composite materials that are based on renewable resources, enabling lower environmental impacts compared to conventional counterparts. However, data regarding the long-term durability in service conditions of these novel composite materials is still very scarce, hindering their potential acceptance in various industries. In this context, the current study addresses the effects of natural weathering on the mechanical and thermomechanical properties of a basalt fibre-reinforced polymer (BFRP) composite produced with a partially bio-based unsaturated polyester resin (UPR). This resin contains renewably sourced building blocks, namely fumaric acid as unsaturated dicarboxylic acid, and 1,3-propanediol and isosorbide as bio-based diols (thus completely avoiding oil-based diols); styrene and 2-hydroxyethyl methacrylate are used in combination as reactive diluent. This allows reducing the amount of styrene, a carcinogenic monomer, to 20% (wt.% of the final resin), comparing to a usual range of 40-50% in typical oil-based UPR. The BFRP composite was produced by vacuum infusion, using a fibre layup comprising 5 layers of unidirectional fibres and 2 layers of bi-directional fibre mats, resulting in a nominal thickness of 4 mm and fibre mass content of 65%. As a benchmark, a conventional (oil-based) BFRP composite was also produced and assessed following the same methodology, adopting an off-the-shelf oil-based UPR as resin matrix. Both composites were exposed to a mild Mediterranean climate (Lisbon, Portugal) for periods of one and two years, after which the effects of this exposure on the composite materials were assessed through tensile, compressive, in-plane shear, and interlaminar shear testing, as well as through thermomechanical characterization by dynamic mechanical analysis. This study has been developed in the context of a broader ongoing research project, which also includes the assessment of additional mechanical properties, different types of fibre reinforcements and resin matrices, as well as longer natural exposure periods (up to ten years) and accelerated exposure environments.

Palavras-chave:

Basalt fibres; Bio-based unsaturated polyester; Fibre-polymer composites; Natural weathering; Durability

1 INTRODUCTION

Fibre reinforced polymer (FRP) composite materials are being increasingly used in civil engineering applications, ranging from retrofitting existing infrastructure, namely in their strengthening, to the execution of new structures. This is due to their significant advantages over conventional construction materials, related to their lightness, high specific strength, and good performance in harsh environments, to name a few (Bank *et al.* 2006; Correia 2023).

Meanwhile, climate change and global warming issues are also paving the way to consider sustainability in material selection and application across the globe. For instance, the net zero emission target by 2050 of the European Commission (European Commission 2020) is influencing the construction and composites industries, promoting lower emissions and the adoption of more environment-friendly materials for use and consumption.

In most applications, the main constituents of FRP composite materials, specifically lower-cost ones that are abundantly used, are glass fibre reinforcement and oil-based unsaturated polyester resins. Currently available alternatives, generally considered as more sustainable, include plant-based fibres and bio-based resins, respectively. However, plant-based fibres are no match for glass fibres for mainstream structural applications due to their lower mechanical performance and sensitivity to moisture, which hinders their long-term durability (Chang *et al.* 2020). Recently, basalt fibres have been found to have the potential to be a replacement option for glass fibres as they offer similar mechanical properties, better thermal performance and, most importantly, they are less harmful to the environment (Gutnikov *et al.* 2013; Weichand *et al.* 2015; Deák *et al.* 2015; Chakartnarodom *et al.* 2018). Additionally, bio-based resins are also being developed successfully by several researchers (Gonzalez *et al.* 2017, 2018; Suriano *et al.* 2021; Hofmann *et al.* 2022a, 2022b). Therefore, FRPs developed from bio-based resins and basalt fibres are a potentially interesting option for the development of more sustainable FRP composites.

In this study, basalt fibre-based FRP has been developed using a partially bio-based unsaturated polyester resin (UPR) recently synthesized by Hofmann *et al.* (2022a), incorporating renewably sourced fumaric acid, 1,3-propane diol, and isosorbide. In addition, carcinogenic styrene, which is generally used in unsaturated polyester resin, has been reduced and partially replaced with 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA). With respect to a conventional basalt-FRP (BFRP) composite (with oil-based UPR), this composite material developed from sustainable resources has demonstrated comparable short-term mechanical and thermo-mechanical performance (Hofmann *et al.* 2022c, 2023) and freeze-thaw durability (Shahid *et al.* 2023). Additionally, better environmental performance of the bio-based UPR has also been identified (Shahid *et al.* 2024).

As civil engineering structures are exposed to outdoor environments, they undergo exposure to the individual or (generally) combined effects of environmental agents, such as moisture, heat, solar radiation, oxygen, and environmental pollutants. The ultraviolet (UV) component of solar radiation mainly consists of UVA (95%) (315-400 nm wavelength) and UVB (5%) (280-315 nm wavelength), with UVB being potentially more damaging to polymeric bonds, given its higher photon energies and quantum efficiencies (Karbhari 2007). Several studies have investigated the effect of outdoor natural weathering on fibre-polymer composite materials through assessment of various properties, including mechanical, thermomechanical and aesthetical (colour, gloss) (Carra *et al.* 2014; Sousa *et al.* 2016, 2024; Hashim *et al.* 2020; Beura *et al.* 2021; Gualberto *et al.* 2024). Under outdoor exposure, photo-oxidation is considered to be the most damaging mechanism: the direct exposure to sunlight modifies the surface chemistry of polymer composites, which is further accelerated by UV irradiation in the presence of oxygen, resulting in the generation of functional groups containing oxygen, such as

carboxyl (-COOH), carbonyl (-CO-), and or peroxide (-O-). Several other reactions may occur, including chain scission, cross-linking, rearrangement of polymer chains, side group extraction, and branching, depending on the chemical structure of the polymer (Karbhari 2007). Photo-degradation is mainly concentrated on the surface of the material, affecting only a few microns (Hashim *et al.* 2020). However, this superficial degradation paves the way for other environmental agents, such as moisture, to diffuse more easily into the polymer composite structure and cause further degradation.

The damage caused by natural outdoor weathering on FRP composite materials is generally found to be a slow process. For instance, in the study of Sousa *et al.* (2016), the maximum reduction of tensile properties after 3.5 years of outdoor exposure in Lisbon was ~30%, while thermomechanical properties, such as the glass transition temperature (T_g), remained unaffected. In contrast, around 8% of T_g reduction has been reported by Gualberto *et al.* (2024) after one year of outdoor exposure in Rio de Janeiro, Brazil. Accelerated weathering comparing glass and basalt-based FRP composites also revealed better performance of the latter in terms of residual mechanical properties (Hashim *et al.* 2020). Although artificial weathering conditions are often used to accelerate the degradation, there is no direct correlation between field exposure and accelerated weathering (Sousa *et al.* 2016; Gualberto *et al.* 2024). Moreover, to date, no study has been reported regarding the natural weathering of basalt-FRP composite developed with bio-based UPR.

Therefore, to enable the use of FRP composites made with basalt fibres and partially bio-based UPR, it is of utmost importance to understand and quantify their performance in outdoor natural weathering conditions. Hence, the objective of this study is to assess the natural weathering durability of the partially bio-based FRP composite with basalt fibres developed earlier by the authors. The damage caused by the exposure to the outdoor environment in Lisbon in this material has been assessed through visual observation and from mechanical and thermomechanical standard characterisation techniques. Additionally, a comparison is made between the performance of the bio-based BFRP composite material with that of similar basalt-based counterparts developed with an oil-based UPR.

2 METHODOLOGY

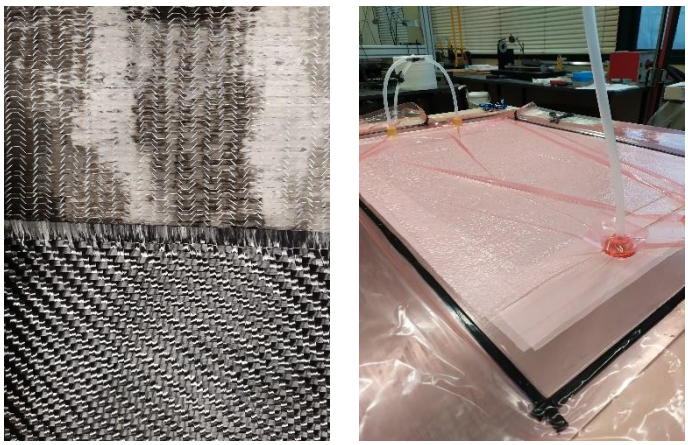
2.1 BIO-BASED RESIN SYNTHESIS

As mentioned, the partially bio-based UPR has been synthesized through a polycondensation reaction (Figure 1), described in detail in Hofmann *et al.* (2022a). The polymer chain of the UPR has incorporated bio-based fumaric acid together with oil-based phthalic anhydride as unsaturated and saturated dicarboxylic acid, respectively, thereby replacing completely fossil fuel-based maleic anhydride with fumaric acid. Additionally, oil-based diols have been replaced entirely with renewably sourced isosorbide and 1,3-propanediol. Furthermore, styrene, which is commonly used as a reactive diluent in UPR, has been reduced by 20% and replaced with HEMA. The final composition of the UPR adopted here (slightly different from that developed by Hofmann *et al.* (2022a)) consists of 50% unsaturated polyester polymer (derived from polycondensation reaction), 30% styrene, and 20% HEMA. The resin has been cured catalytically by adding 2% peroxide (methyl ethyl ketone peroxide) and 1% octoate cobalt as initiator. To compare the performance of the partially bio-based UPR, a commercial orthophthalic oil-based UPR has been obtained from Scott Bader (Crystic U 904LVKTM, Wollaston, UK).

Figure 1: Synthesis of the bio-based UPR.

2.2 PRODUCTION OF BFRP COMPOSITE

The two BFRP composites (bio and conventional) consist of two types of basalt fibre mats, unidirectional (U) and bi-directional (B), as shown in Figure 1(a), and their areal weights are 550 g/m^2 and 940 g/m^2, respectively. Both fibre mats were obtained from BASALTEX (Belgium). In the fibre layup of the BFRP composites, five layers of unidirectional and two layers of bi-directional fibre mats were arranged according to the following sequence: [U/U/B/U/B/U/U]. The composites were produced using a vacuum infusion process (Figure 2(b)). After 48 hours of curing at room temperature, the BFRP composites were post-cured at 100°C for four hours. This resulted in BFRP laminates with a nominal thickness of 4 mm.

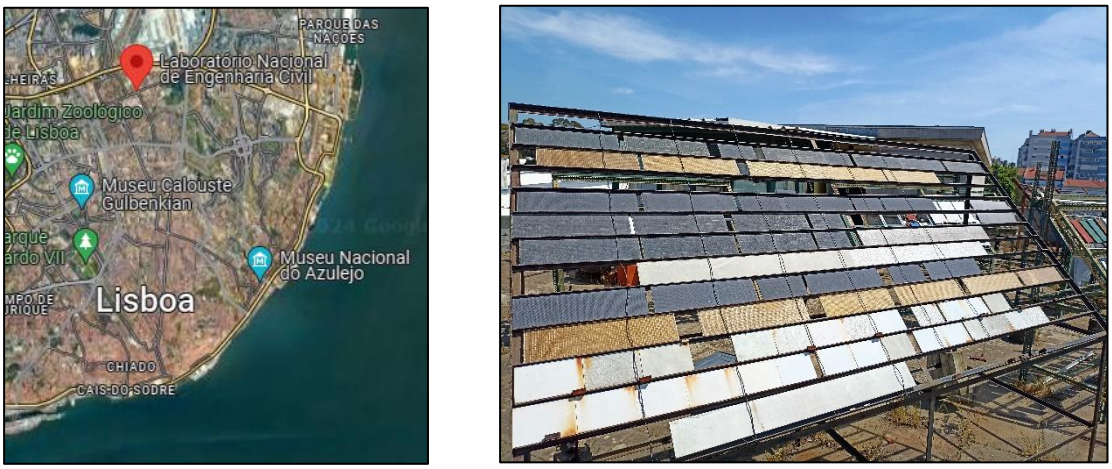


(a) (b)

Figure 2: (a) Unidirectional (top) and bi-directional (bottom) basalt fibre mats, and (b) BFRP laminate production using vacuum infusion process.

2.3 AGEING ENVIRONMENTS

The outdoor natural weathering of the BFRP composites has been accomplished by exposing them to the urban environment of Lisbon city centre (on the rooftop of the main building of "*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*"), which is located at 38.77°N latitude, and 9.13°W longitude, and 100 m altitude above the sea level, as shown in Figure 3(a). The plates have been placed in a steel frame structure (Figure 3(b)), facing south, with an inclination of 45°. The composite plates expose durations are 1, 2, 5, and 10 years, starting from May 2022. So far, for each type of BFRP, two batches of composite plates have been obtained after one and two years of outdoor natural weathering.



(a) (b)

Figure 3: Natural weathering: (a) satellite map of the outdoor exposure location (Google Maps), and (b) exposure of the composites to outdoor natural weathering.

2.4 EXPERIMENTAL PROCEDURES

After each period of outdoor exposure, the composite plates were collected and cut in a computer numerical control (CNC) milling machine to prepare test specimens according to the geometry of the respective test standards. The aged plates were tested within seven days of removal from the ageing environment. The direction of the unidirectional fibres was considered as the main axis of the composite plate, and all the specimens were cut along the main axis. The impact derived from the natural weathering has been assessed by means of mechanical characterization tests, including tensile (Figure 4(a)), compressive (Figure 4(b)), in-plane shear (Figure 4(c)), and interlaminar shear (Figure 4(d)) tests, following standards ISO 527-1,4, ASTM 6641/D6641 M, ASTM 5379/D5379 M, and ISO 14130, respectively. Tests were conducted in a Universal Testing Machine with 100 kN load capacity. The strains were measured using a video extensometer, which consists of a camera (*SONY FLIR BFS-U3-51S5M-C*), lens (*Fujinon HF25SA-1*), and *MatchID* software (v2022.2). Furthermore, changes in the thermomechanical behaviour was assessed through dynamic mechanical analysis (DMA), according to ISO 6721-1,5 standard. The DMA tests were conducted with equipment (Figure 4(e)) from *TA instruments*, model *Q800 TA (Newcastle, DE, USA*). During the DMA tests, a 15 µm strain was applied with a frequency of 1 Hz in a temperature range of -30 °C to 150 °C, with a heating rate of 2 °C/min. Two estimates of glass transition temperature were obtained: one from the onset of the decay of the storage modulus, and the other from the peak of the tan(δ) curve. For all types of

mechanical characterization tests, at least 5 replicates were tested per series, while 2 specimens per series were used for the DMA tests.

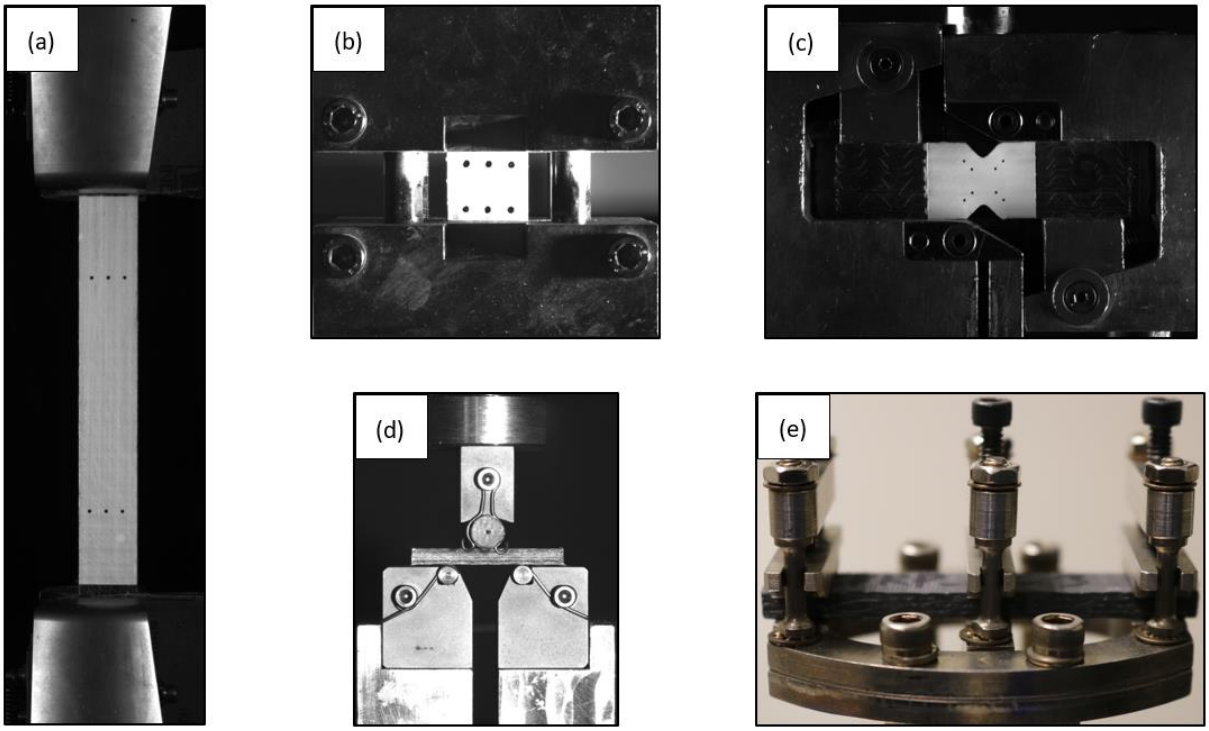


Figure 4: Mechanical and thermomechanical testing: (a) tensile, (b) compressive, (c) in-plane shear, (d) interlaminar shear, and (e) DMA.

3 RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 shows the aesthetic changes exhibited by the two composite materials due to natural weathering. It is evident from Figure 5 that both composites suffered from outdoor exposure, resulting in loss of gloss and colour, as well as fibre blooming. The bio-BFRP composite became brownish, while an equivalent colour change has also been noticed in the conventional counterpart.

Figure 6 presents the retention curves for bio-based and oil-based BFRP, depicting the changes in tensile properties, compressive strength, in-plane shear properties, interlaminar shear strength, and thermomechanical properties, in terms of glass transition temperatures based on the onset of the decay of storage modulus and the peak of the damping curves (tanδ). Meanwhile, Table 1 provides absolute values of the above-mentioned properties, together with the corresponding retention (R, %), standard deviation (SD), and coefficient of variation (CV, %).

It can be noticed from Figure 6 that the overall retention of mechanical and thermomechanical properties of the bio-BFRP after exposure to natural outdoor conditions is comparable to that of the conventional counterpart. The bio-based BFRP presents higher degradation of in-plane shear strength and interlaminar shear strength than the oil-based composite - both properties are matrix-dominated and, although for compressive strength the reduction is equivalent, this seems to indicate that the bio-based resin is more prone to weathering degradation than the oil-based one, likely due to moisture. This is consistent with findings from previous studies from our group (Shahid *et al.* 2023). On the other hand, the bio-based BFRP showed better performance than the oil-based counterpart in terms of

tensile strength and in-plane shear modulus, while similar retention was found in tensile modulus. This may indicate better fibre-matrix adhesion of the bio-BFRP than the conventional counterpart.

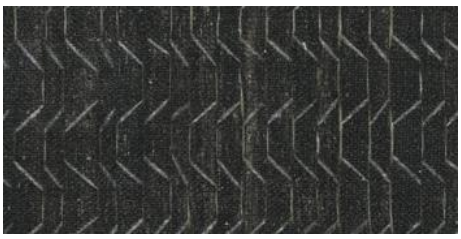
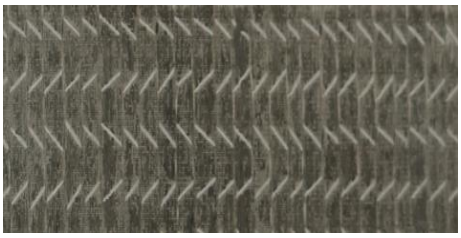
Materials	Bio-BFRP	Oil-BFRP
Unaged		
2 Years of Natural Outdoor Weathering		

Figure 5: Aesthetical changes and fibre blooming of bio- and oil-based BFRP composites.

In general, after two years of natural ageing, the retention of mechanical properties in both composites is above 80%. In this respect, it is worth referring that the 50-year moisture conversion factor set in CEN/TS 19101:2022 for outdoor exposure is 0.85 (85% retention) – results to be obtained later in this project will allow assessing the applicability of this factor to the bio-based BFRP composite. Another fact worth noting is that, in most cases, such as tensile strength and in-plane shear modulus, the majority of the reduction occurred during the first year of ageing, with a stabilization occurring after two years of natural ageing. For instance, the tensile strength retention of the bio-based BFRP is 95% and 93%, respectively, after one and two years of natural weathering, and that in the oil-based BFRP is 86% after one year and remains unchanged in the following year. On the contrary, a decreasing trend is noticed in compressive strength and interlaminar shear strength properties. For compressive strength, the damage caused by one year of natural weathering in the bio-BFRP is 3% and in the second year, the damage increased with a strength reduction of 16%. A similar ageing profile in terms of compressive strength is also noticed in the oil-based BFRP, where no significant damage occurs after one year of ageing (rather a 2% increase), while in the following year the compressive strength reduction is 15%. Furthermore, a reverse trend is also observed in the tensile modulus of both composites, depicting an initial reduction of 9% after one year of ageing, followed by a recovery in the subsequent year, resulting in a final property retention of around 98% in both BFRPs.

The thermomechanical properties increased compared to the unaged condition – as an example, for the bio-BFRP, the increase in terms of T_g (tanδ) was 11%, while that in the oil-BFRP was 4%. A similar increment (8%) also has been observed in T_g (onset E' decay) for both composites and this can be attributed to further matrix crosslinking during ageing (Karbhari 2007; Sousa *et al.* 2016, 2024).

In outdoor natural weathering conditions, all environmental agents, such as moisture, rain, sunlight, humidity, wind and dust take part in the damage process. Therefore, complex multiple damage mechanisms are involved in outdoor environmental ageing. However, the majority of the reduction in the outdoor ageing of FRP composites is attributed to moisture, which is facilitated by UV radiation present in the sunlight and oxidation with air oxygen (Carra *et al.* 2014; Sousa *et al.* 2016, 2024; Hashim *et al.* 2020; Beura *et al.* 2021; Gualberto *et al.* 2024). The organic polymer matrix is sensitive to the UV radiation, going through several photochemical transformations, resulting in a smaller polymer chain

deposited on the surface, resulting in a phenomenon called "chalking". Additionally, at some point, fibre blooming occurs on the surface, due to the photo degradation of the superficial layers of the polymeric matrix, resulting in colour change and gloss loss, as depicted in Figure 5. This mechanism may also create cracking of the surface, which enables the penetration of other environmental agents, namely moisture. The water diffused into the polymer composite structure may also damage fibre-matrix adhesion through hydrolysis reaction, although this mechanism is found to be less dominant. Therefore, properties with a higher contribution of the fibre reinforcement, such as tensile modulus and strength, are comparatively less affected with respect to more matrix-dominated properties, such as the compressive strength. UV radiation has also been reported to cause matrix hardening, which can explain the T_g increase, as well as the tensile modulus recovery. Additionally, strong hydrogen bonds formed with water molecules diffused during natural weathering (Beura *et al.* 2021) also might have contributed to the increment in the above-mentioned properties. Similar findings have also been reported by Carra *et al.* (2014) and Sousa *et al.* (2016).

Table 1: Average ($\overline{x}$), standard deviation (SD), coefficient of variation (CV, %), retention (R, %) of mechanical properties and T_g of unaged and outdoor natural weathering exposure.

Property	Parameter	Bio-Composite			Oil-Composite		
		Unaged	12 months	24 months	Unaged	12 months	24 months
Tensile strength (σ_t)	$\overline{x}$ [MPa]	537	511	502	583	501	500
	SD	26,4	27,2	12,0	11,9	29,8	10,4
	CV [%]	4,9	5,3	2,4	2,0	6,0	2,1
	R [%]	100	95	93	100	86	86
Tensile modulus (E)	$\overline{x}$ [GPa]	27,8	25,2	27,2	27,8	25,3	27,0
	SD	0,4	1,2	0,9	0,7	0,8	1,0
	CV [%]	1,3	4,6	3,5	2,4	3,3	3,6
	R [%]	100	91	98	100	91	97
In-plane shear strength (σ_{xy})	$\overline{x}$ [MPa]	43,8	36,3	36,0	42,8	47,5	41,0
	SD	0,7	1,4	1,1	1,8	2,5	1,2
	CV [%]	1,6	3,9	3,2	4,2	5,3	2,8
	R [%]	100	83	82	100	111	96
In-plane shear modulus (G_{xy})	$\overline{x}$ [GPa]	2,7	2,4	2,4	2,9	2,5	2,4
	SD	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
	CV [%]	4,9	5,4	5,9	5,2	3,6	5,6
	R [%]	100	90	89	100	86	83
Compressive strength (σ_C)	$\overline{x}$ [MPa]	143	138	120	157	160	133
	SD	8,0	13,3	14,8	19,2	7,9	9,1
	CV [%]	5,6	9,6	12,4	12,2	4,9	6,8
	R [%]	100	97	84	100	102	85
Interlaminar shear strength (σ_{ILS})	$\overline{x}$ [MPa]	16,0	14,8	14,2	17,5	18,7	16,4
	SD	0,8	0,4	0,6	1,6	0,6	0,6
	CV [%]	5,2	2,6	4,0	9,2	3,5	3,6
	R [%]	100	92	89	100	107	94
$T_{g,\ onset\ E'\ decay}$	[°C]	68,5	70,6	73,9	70,9	70,9	76,9
	R [%]	100	103	108	100	100	108
$T_{g,\ tan(\delta)}$	[°C]	98,6	98,9	109,1	93,7	94,1	97,1
	R [%]	100	100	111	100	100	104

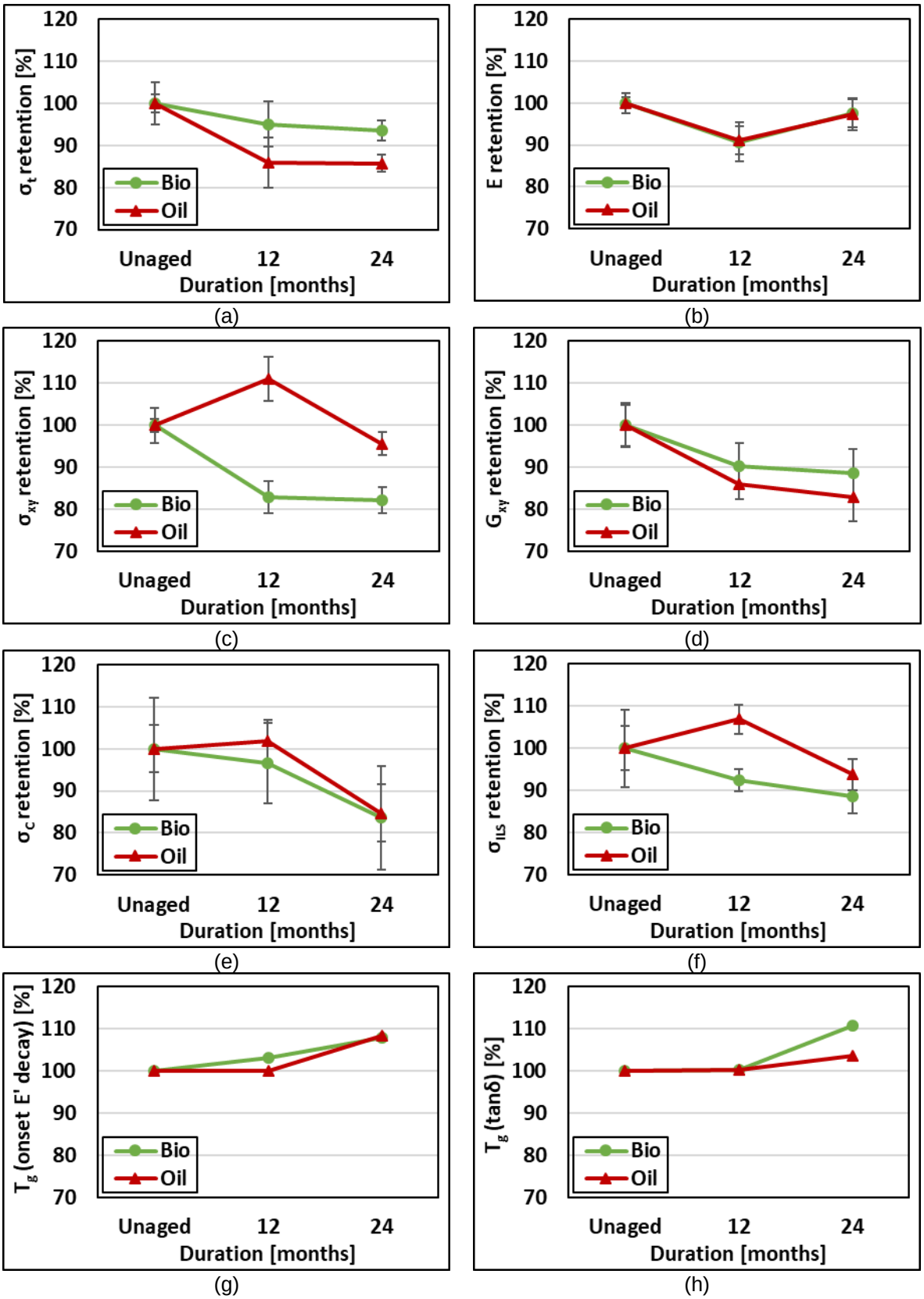


Figure 6: Retention in properties of bio- and oil-based BFRP composites: (a) tensile strength (σ_t), (b) tensile modulus (E), (c) in-plane shear strength (σ_{xy}), (d) in-plane shear modulus (G_{xy}), (e) compressive strength (σ_C), (f) interlaminar shear strength (σ_{ILS}), (g) T_g (onset E' decay), and (h) T_g (tanδ).

4 CONCLUSION

This paper described a study about the outdoor natural weathering durability of a basalt fibre reinforced polymer (BFRP) composite, produced by vacuum infusion, with a partially bio-based unsaturated polyester resin (UPR). For comparison, a reference BFRP composite was used, produced with oil-based UPR and having a similar fibre architecture. The two composites were exposed to natural weathering in the rooftop of LNEC, in Lisbon, in a mild Mediterranean climate, and the exposure durations are 1, 2, 5, and 10 years. This paper reports the results of the first 2 years of ageing. The damage caused by natural weathering was assessed through mechanical characterization tests (tensile, compressive, in-plane shear, interlaminar shear) and thermomechanical tests, namely dynamic mechanical analysis (DMA).

Overall, the bio-based BFRP composite was found to have comparable durability performance to the oil-based counterpart, when exposed to natural weathering. The property retention of both composites was above 80% for all mechanical properties. Some mechanical properties, such as tensile strength and in-plane shear modulus, presented an initial reduction (5% and 10%, respectively) during the first year and then stabilized in the second year. On the other hand, the compressive strength presented a continuously decreasing trend. On the contrary, the glass transition temperature (onset E' decay) is following an increasing trend, with 11% and 4% increase in the bio- and oil-BFRP, respectively, with respect to the corresponding unaged condition. Additionally, in both composites (bio and oil-based BFRPs), aesthetic and colour changes (browning) have been noticed, together with fibre blooming.

The damage mechanisms of (i) photo-oxidation of the organic polymer matrix in the presence of UV radiation and (ii) those associated with moisture ingress are identified as the main reasons for the reduction of mechanical properties.

The results obtained from this investigation, namely in future tests after 5 and 10 years, can be used (i) to establish correlations with accelerated tests (e.g. QUV), and (ii) to derive conversion factors for outdoor exposure for durability design, also allowing to assess if the value provided in CEN/TS 19101:2022 is applicable to the BFRP composites used in this research.

REFERENCES

Bank, L.C., (2006). Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. *John Wiley & Sons*, New Jersey.

Beura, S., Sahoo, S. R., Thatoi, D. N., Mohanty, U. K., & Chakraverty, A. P. (2021). Stability of GFRP Composites with Varied Fractions of Reinforcement Exposed to Ageing Processes Outdoors. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), 1485-1494.

Carra, G., & Carvelli, V. (2014). Ageing of Pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer Composites Exposed to Combined Environmental Agents. *Composite Structures*, 108, 1019-1026.

Chakartnarodom, P., Prakaypan, W., Ineure, P., Kongkajun, N., & Chuankrerkkul, N. (2018). Feasibility Study of Using Basalt Fibers as the Reinforcement Phase in Fiber-Cement Products. *Key Engineering Materials*, 766, 252-257.

Chang, B. P., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2020). Studies on Durability of Sustainable Biobased Composites: A Review. *RSC advances*, 10(31), 17955-17999.

Correia, J. R. (2023). Pultrusion of advanced composites. In Advanced Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications (pp. 137-177). *Woodhead Publishing.*

Deák, T., & Czigány, T. (2009). Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. *Textile Research Journal*, 79(7), 645-651.

European Commission (2020). Commission Staff Working Document – Impact Assessment Accompanying the Document "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions" – Stepping up Europe's 2030 Climate Ambition – Investing in a Climate-Neutral Future for the Benefit of Our People, SWD/2020/176-final.

Gonzalez, M. N. G., Börjesson, P., Levi, M., & Turri, S. (2018). Development and Life Cycle Assessment of Polyester Binders Containing 2,5-Furandicarboxylic Acid and their Polyurethane Coatings. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 3626-3637.

Gonzalez, M. N. G., Levi, M., & Turri, S. (2017). Development of Polyester Binders for the Production of Sustainable Polyurethane Coatings: Technological Characterization and Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 164, 171-178.

Gualberto, H. R., dos Reis, J. M. L., Calixto de Andrade, M., Costa, H. R. M., do Carmo Amorim, F., de Souza Faria, D. (2024). Effect of Outdoor Environmental Exposure on the Mechanical Behavior of Steel/GFRP Single-Lap Joints. *The Journal of Adhesion*, 1-24.

Gutnikov, S. I., Manylov, M. S., Lipatov, Y. V., Lazoryak, B. I., & Pokholok, K. V. (2013). Effect of The Reduction Treatment on the Basalt Continuous Fiber Crystallization Properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 368, 45-50.

Hashim, U. R., Jumahat, A., Jawaid, M., Dungani, R., Alamery, S. (2020). Effects of Accelerated Weathering on Degradation Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites. *Polymers*, 12(11), 2621.

Hofmann, M. A., Shahid, A. T., Garrido, M., Ferreira, M. J., Correia, J. R., Bordado, J. C. (2022a). Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(11), 3442-3454.

Hofmann, M., Garrido, M., Machado, M., Correia, J. R., & Bordado, J. C. (2022b). Development of High-Performance Partially Biobased Thermoset Polyester Using Renewable Building Blocks from Isosorbide, 1,3-Propanediol, and Fumaric Acid. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(42), e53029.

Hofmann, M., Shahid, A. T., Machado, M., Garrido, M., Bordado, J. C., Correia, J. R. (2022c). GFRP Biocomposites Produced with a Novel High-Performance Bio-Based Unsaturated Polyester Resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 161, 107098.

Hofmann, M., Machado, M., Shahid, A., Dourado, F., Garrido, M., Bordado, J. C., Correia, J. R. (2023). Pultruded Carbon Fibre Reinforced Polymer Strips Produced with a Novel Bio-Based Thermoset Polyester for Structural Strengthening. *Composites Science and Technology*, 234, 109936.

Karbhari, V. M. (2007). Introduction: The Use of Composites in Civil Structural Applications. In Durability of Composites for Civil Structural Applications (pp. 80-94). *Woodhead Publishing*.

Shahid, A. T., Hofmann, M., Garrido, M., Correia, J. R., Rosa, I. C. (2023). Freeze–Thaw Durability of Basalt Fibre Reinforced Bio-Based Unsaturated Polyester Composite. *Materials*, 16(15), 5411.

Shahid, A. T., Silvestre, J. D., Hofmann, M., Garrido, M., Correia, J. R. (2024). Life Cycle Assessment of an Innovative Bio-Based Unsaturated Polyester Resin and its Use in Glass Fibre Reinforced Bio-Composites Produced by Vacuum Infusion. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140906.

Sousa, J. M., Correia, J. R., Cabral-Fonseca, S. (2016). Durability of Glass Fibre Reinforced Polymer Pultruded Profiles: Comparison Between QUV Accelerated Exposure and Natural Weathering in a Mediterranean Climate. *Experimental Techniques*, 40, 207-219.

Sousa, J. M., Rosa, I. C., Correia, J. R., Cabral-Fonseca, S., Garrido, M. (2024). Synergistic Effects of Different Ageing Environments and Sustained Flexural Loading on the Durability of Pultruded GFRP Profiles. *Journal of Building Engineering*, 86, 108735.

Suriano, R., Gonzalez, M. N. G., Turri, S. (2021). Environmental Profile and Technological Validation of new High-Tg Unsaturated Polyesters from Fully Bio-Based Monomers and Reactive Diluents. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1122-1133.

Weichand, P., Gadow, R. (2015). Basalt Fibre Reinforced Sioc-Matrix Composites: Manufacturing Technologies and Characterisation. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(14), 4025-4030.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE BETÃO DRENANTE COM AGREGADO RECICLADO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

José Ximenes [a]*, José Aguiar [b], Jorge Pais [c], Carlos de Jesus [b], Carlos Palha [c]

[a] Faculdade de Engenharia Ciências e Tecnologia, Universidade Nacional Timor Lorosa'e, Hera, Timor-Leste

[b] CTAC – Centro do Território, Ambiente e Construção Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal. lebenei@yahoo.com, aguiar@civil.uminho.pt, cjesus@civil.uminho.pt

[c] ISISE – Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal. jpais@civil.uminho.pt, cpalha@civil.uminho.pt

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um betão de cimento poroso para pavimentos rodoviários utilizando agregados de demolição da construção que permita obter as principais características superficiais requeridas para pavimentos rodoviários, nomeadamente propriedades de drenagem, rugosidade, textura e atrito. O trabalho foi desenvolvido em laboratório através de uma série de provetes variando o teor de resíduo de 10% a 30%. O teor de cimento e a relação água/cimento foram mantidos constantes com base em estudos anteriores onde foi estudada a influência dessas variáveis. O desempenho dos betões de cimento poroso foi avaliado por meio de dois tipos de ensaios de permeabilidade, medidas a laser para rugosidade e textura e pêndulo britânico para fricção. A gradação dos agregados foi baseada, no PA12,5, onde a dimensão máxima do agregado é de 14 mm, e foi considerado um betão de referência sem agregados reciclados. Foram considerados os ensaios para avaliar o ensaio vêbê, resistência mecânica dos betões. Os resultados mostram que o betão com resíduos de demolição, pode ser considerado uma solução sustentável para resíduos de demolição.

Palavras-chave: Ensaios de betão drenante, porosidade, deslizamento, aderência, resistência à fricção.

1 INTRODUÇÃO

Normalmente, a medição da macrotextura do pavimento adota o método da mancha de areia, o medidor de vazão ou o medidor de textura circular (MTC) usando um perfil de textura bidimensional (2D) [1]. Indicadores como profundidade média da textura (PMT), profundidade média do perfil (PMP) ou profundidade média quadrática (PMQ) são normalmente aplicados para caracterizar a macrotextura do pavimento [2]. Além disso, a microtextura do pavimento é avaliada por dispositivos de medição de atrito indireto em baixa velocidade, como o ensaio portátil britânico (TPB), o ensaio de atrito dinâmico (TAD) e o trailer de derrapagem de roda travada.

Recentemente, a microtextura da superfície do pavimento foi medida com câmeras de alta resolução em laboratório para obter mais detalhes da textura [3]. Além disso, o dispositivo a laser avançado de alta resolução pode coletar convenientemente dados tridimensionais (3D) da textura da superfície do campo e obter precisão suficiente para caracterizar a micro e a macrotextura do pavimento [4]. A aquisição de informações de textura de superfície de alta resolução pode ajudar significativamente na investigação das contribuições de micro e macrotextura para a resistência à derrapagem [5].

Além disso, os parâmetros de textura de superfície 3D areal têm sido amplamente utilizados nas indústrias de manufatura modernas para controlar e avaliar o acabamento da superfície dos produtos [6]. Os parâmetros de textura areal 3D contêm aspetos de altura da superfície, informações espaciais, híbridas, funcionais e de recursos, enquanto os parâmetros tradicionais contêm apenas informações de altura [6]. Os parâmetros de textura areal podem caracterizar a funcionalidade da textura da superfície e entender as características da textura em diferentes perspetivas que o parâmetro de textura tradicional não consegue alcançar [7]. Portanto,

alguns estudos recentes tentaram avaliar a textura do pavimento usando parâmetros de área 3D e correlacioná-los com a resistência à derrapagem [8,9].

O estudo descrito neste artigo utilizou parâmetros de área 3D para avaliar as mudanças na textura do pavimento sob carga de tráfego.

Pavimentos de betão poroso permitem a recarga natural das águas subterrâneas e permitem que a água evapore do subsolo [10,11]. Além disso, os benefícios dos pavimentos porosos incluem absorção acústica [12], diminuição do aquecimento da superfície e do efeito de Ilha de Calor Urbano [13] e filtragem dos contaminantes na água [14].

As razões para a realização deste estudo são a utilização excessiva dos recursos naturais por meios em benefício próprio, que tem sido uma constante ao longo dos tempos, contribuindo inconscientemente para a degradação da sua envolvente e para a deterioração progressiva do ecossistema onde exerce a sua atividade.

A quantidade e o tipo de resíduos vêm aumentando de acordo com o crescimento normal da população, aumentando a urbanização e a industrialização.

O presente trabalho estuda o desenvolvimento de betão drenante para aplicação em pavimentos rodoviários utilizando Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na perspetiva de contribuir com o meio ambiente e a segurança dos movimentos de transporte, principalmente no período chuvoso.

O estudo consiste na avaliação das suas características mecânicas e funcionais, suportada por uma campanha de ensaios laboratoriais a três betões com agregados reciclados e betão de referência.

Para as propriedades mecânicas relacionadas ao desempenho de pavimentos rodoviários de betão, avaliam-se as resistências à compressão e à flexão, módulo dinâmico e resistência à fadiga. Para as propriedades funcionais, são avaliados teor de ar, permeabilidade, profundidades médias de textura, resistência ao atrito e macrotextura 3D e 2D.

Esta análise é essencial para a compreensão do dimensionamento do betão que permite um desempenho mecânico e funcional adequado quando aplicado na construção de pavimentos rodoviários.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERRIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados quatro tipos de materiais, nomeadamente, Cimento Portland de 42,5 R, areia, agregados normais e agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

O Cimento Portland (CEM I 42.5 R) [16] tem uma perda de ignição de 2,3 %, um peso específico de 3120 kg/m^3 e finura Blaine de 4072 cm^2/g. As resistências mecânicas do cimento aos 2, 7 e 28 dias são indicadas no Quadro 1.

Quadro 1- Propriedades mecânicas do cimento Portland CEM I 42,5 R [15]

Tempo (dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
2	5,6	31,8
7	7,5	47,0
28	8,5	55,5

Os agregados utilizados na produção do betão de cimento foram uma mistura de agregado miúdo 0/4 mm, agregado 4/10 mm e agregado 10/14 mm, que foi misturado com 10%, 20% e 30% de RCD, o que permitiu obter a partícula distribuição de tamanhos apresentada no Quadro 2, que segue as Especificações de Construção Portuguesas para pavimentos rodoviários [16]. Simultaneamente, foi produzido um betão

utilizando apenas agregados novos seguindo as gradações médias dos betões com RCD de referência e denominado REF e tem a distribuição de agregados apresentada no Quadro 2.

A distribuição dos agregados para a Referência (REF) e RCD está representada na Figura 1, onde é visível que todos os quatro betões apresentam a mesma gradação de agregados apenas com algumas diferenças no peneiro de 6,3 mm, mas tudo dentro dos limites propostos pelo Especificações portuguesas de betão [16].

As propriedades físicas dos agregados reciclados em termos de densidade e resistência à fragmentação são indicadas no Quadro 3 e Quadro 4. Para a densidade, é possível verificar que os agregados novos de uma pedreira de granito apresentam uma densidade em torno de 2,6-2,7 kg /m^3, que é típico para granitos, enquanto o RCD apresenta uma densidade em torno de 2,2-2,3 kg/m^3, que é relativamente baixa para agregados. Este é o resultado da mistura de diferentes proporções apresentados no RCD. Os agregados RCD são compostos de betão e argamassas de contrapeso, revestimento de agregado reciclado e mistura de betão estrutural, conforme pode ser observado na Figura 2. Apesar da menor densidade, o RCD apresenta boa resistência à fragmentação (36%) em relação ao agregado reciclados (20- 23%).

Quadro 2- Distribuição de tamanho de partícula agregada

	Passagem (%)					
Medida (mm)	Limite min.	Limite max.	REF	10% RCD	20% RCD	30% RCD
14.00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,50	100,00	100,00	99,00	100,00	100,00	100,00
10.00	90,00	100,00	91,00	95,27	90,54	90,81
6,30	47,00	64,00	47,50	62,33	56,54	50,76
4.00	27,00	39,00	27,00	31,30	27,24	27,21
2.00	22,00	32,00	22,00	21,27	22,00	21,94
1.00	15,00	28,00	15,00	17,96	16,50	15,49
0,50	13,00	25,00	13,00	13,52	13,95	13,00
0,063	7,00	11,00	7,00	9,10	9,00	7,98
0.00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

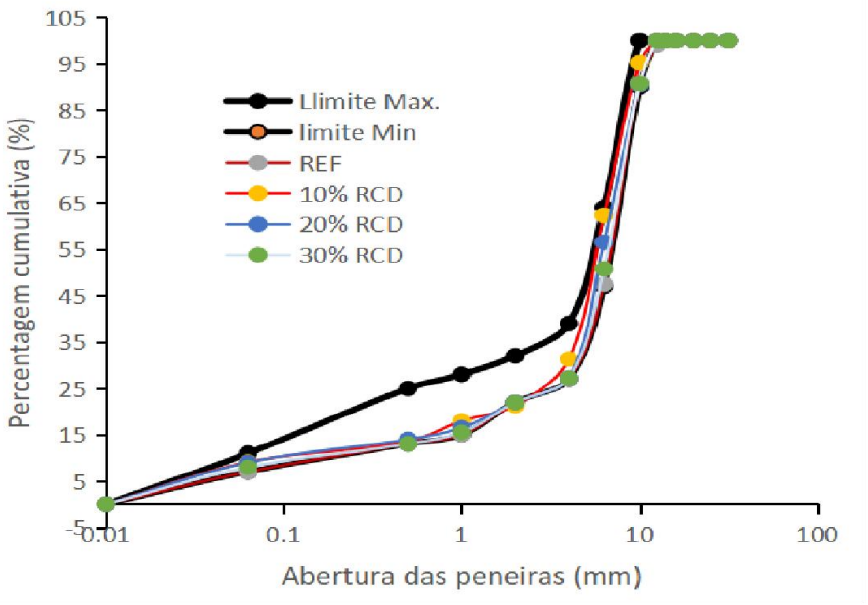


Figura 1- Distribuição de tamanho agregado de REF, 10%, 20% e 30% RCD betão de cimento poroso

Figura 2- Agregados reciclados utilizados neste trabalho

Quadro 3- Propriedades físicas dos agregados normais

Propriedade	Unidade	Padrão EN (Norma Europa)	Agregados		
			0/4	4/10	10/14
Densidade normal	kg/m3	EN 1097-6:2016 [17]	2670	2660	2620
Resistência ao fragmentação normal do agregado com (Los Angeles)	%	EN 1097-2:2011 [18]	-	20.64	23.17

Quadro 4- Propriedades físicas do agregado reciclado

Propriedade	Unidade	Padrão EN (Norma Europa)	Agregados	
			4/10	10/14
Densidade Reciclado	kg/m3	EN 1097-6:2016 [17]	2273	2242
Resistência ao fragmentação do agregado reciclado com (Los Angeles)	%	EN 1097-2:2011 [18]	36.10	36.90

O betão poroso foi preparado para uma relação A/C (Água/Cimento) de 0,30 e submetido à vibração por 40 segundos. Quatro betões foram produzidos. Um betão de referência sem RCD e três betões com RCD, nomeadamente com 10%, 20% e 30% de RCD. A composição desses provetes é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5- Composição do betão poroso

Designação de betão	Composição (kg/m^3)					
	CEM I 42,5	Água	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14	RCD 4/14
REF	300	90,0	22,0	1391,0	314,0	0
RCD 10%		90,0	22,4	1091,1	160,5	184,0
RCD 20%		90,0	22,6	929,6	136,8	368,0
RCD 30%		90,0	22,9	769,0	112,9	551,0

Para cada betão poroso foi produzida uma laje com 400×400×80 mm^3 para os ensaios de mancha de areia, ensaio de fricção do pêndulo britânico, e ensaios de textura. O aspeto (endurecidos) das lajes para ensaios de

laboratório pode ser observado na Figura 3, bem como a textura da superfície onde é visível a porosidade dos betões.

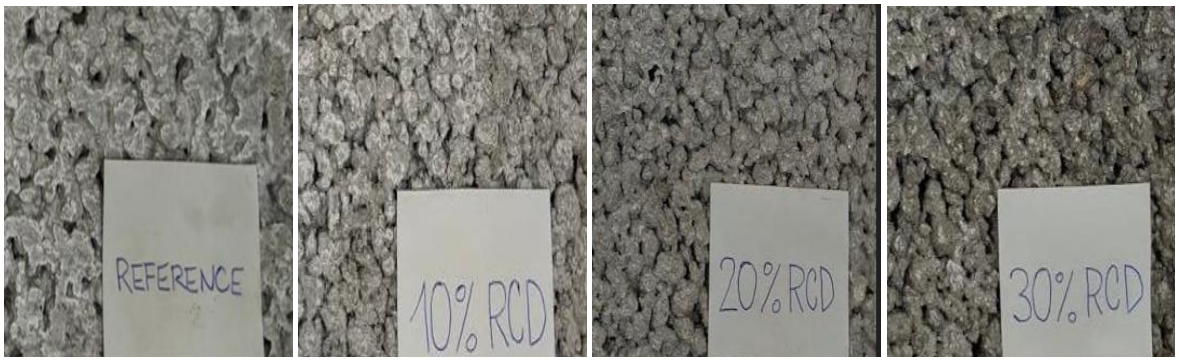


Figura 3- Aspeto da laje para ensaios laboratoriais

2.2 MÉTODOS

Neste trabalho foram estudados e comparados três diferentes da mistura de RCD de (10%, 20% e 30% de RCD) e um betão de referência, todos produzidos com relação A/C de 0,30 e submetidos à vibração por 40 segundos.

O programa dos ensaios consistiu em betão fresco e endurecido. Para betão fresco, a trabalhabilidade é avaliada com o ensaio de Vêbê baseado na norma EN 12350-3 [19]. Para os betões endurecidos, foram realizados ensaios funcionais e mecânicos para avaliar suas propriedades e comparar os resultados dos provetes de RCD com o betão de referência.

Antes de serem submetidos aos ensaios funcionais e mecânicos, todos os provetes foram submetidos à saturação em câmara de cura segundo a norma EN 12390-2 [20].

As propriedades funcionais foram avaliadas através dos seguintes ensaios:

• Permeabilidade do LCS (Laboratório la Caminhos Santander). Para o cálculo da permeabilidade dos betões de RCD, segundo a norma espanhola NLT-327/00 [21], foi realizado o ensaio de permeametria KLCS com provetes cúbicos de 150x150x150 mm e lajes de 400x400x80 mm, utilizando cubos e lajes de betão, em um total de seis cubos e quatro lajes em diferentes pontos de ensaio.

• Permeabilidade de FH (Falling Head). Para este ensaio foram confecionados dois cilindros dos betões, com dimensão de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para garantir que não haja vazamentos no lado transversal, os provetes foram selados dentro de uma luva extensível e encaixados em um tubo plástico fechado para que não ocorresse vazamento de água ao fluir axialmente através da amostra de acordo com ACI 522R-2010 [22].

• Porosidade por imersão para medição do teor de vazios NP 581/69 [23]. Este foi medido seguindo a norma EN 12350-1 [24] para verificar a recomendação de ter um teor de vazios entre 15% e 35% do volume total de betão.

• Mancha de areia. A medição da macrotextura, pelo método da altura da areia (ASTM E965-96) [25], consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado (espalhadeira de madeira com revestimento de borracha) sobre a superfície do pavimento, um volume conhecido de areia ou microesferas de vidro (25000mm^3 ± 150mm^3). O tamanho do patch é medido em 4 direções, e então, com a média, a altura da macrotextura, ou altura da areia, é calculada. Os provetes são placas de 400x400x80 mm.

• Ensaio de fricção do pêndulo britânico. Os ensaios foram realizados em todas as lajes medindo 400x400x80 mm. O princípio do ensaio de pêndulo incorpora um controle deslizante de mola feito de borracha padrão montado na extremidade de um braço de pêndulo. Ao liberar o braço do pêndulo de uma posição horizontal, a perda de energia conforme o conjunto deslizante passa sobre a superfície do provete é medida pela redução

no comprimento do movimento ascendente usando uma escala calibrada. O método fornece uma medida das propriedades de resistência ao deslizamento ou derrapagem de uma superfície no campo ou no laboratório. As amostras utilizadas foram produzidas em laboratório, não sofreram nenhum desgaste pela circulação do tráfego e foram ensaiadas nas mesmas condições.

• Ensaios de caracterização superficial para avaliação da macrotextura da superfície do betão. A macrotextura das superfícies pelo cálculo da profundidade média do perfil obtido com equipamento laser (Average Profile Depth, APD), segundo a terminologia anglo-saxônica profundidade média do perfil) [26]. A caracterização da superfície foi avaliada usando o equipamento a laser mostrado na Figura 4.

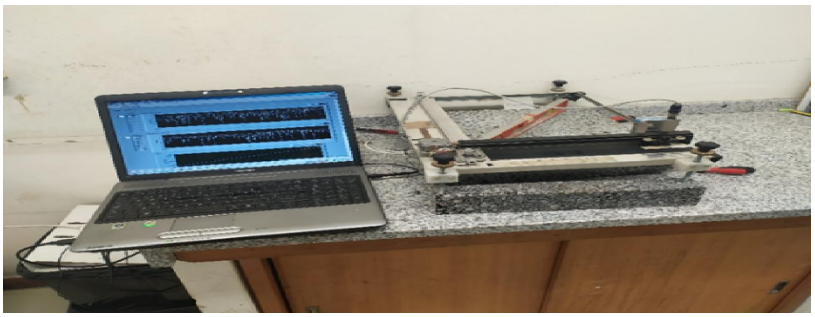


Figura 4- Aspeto do equipamento a laser para profundidade de perfil

As propriedades mecânicas foram avaliadas através da avaliação de:

• Resistência à compressão, equipamento hidráulico foi usado para determinar a tensão de rutura compressiva do betão. No caso deste ensaio, foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com o tamanho dos provetes de (150 x150x150 mm). Foram utilizados quatro tipos de provetes para cada betão, com base na norma EN 206:2013+A12017 [27].

• Ensaios de resistência à flexão. Espécimes de 400 × 100 × 100 mm^3 foram usados de acordo com os padrões EN 12390-1 e EN 12390-5 [28, 29]. Três provetes de cada betão foram utilizados nestes ensaios.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

3.1 BETÃO FRESCO

Para avaliar o betão fresco utilizou-se o ensaio de Vêbê [30]. Os resultados obtidos são da classe média de rígidos, caracterizados por terem um ensaio Vêbê com 5 a 10 segundos, conforme mostrado na Figura 5.

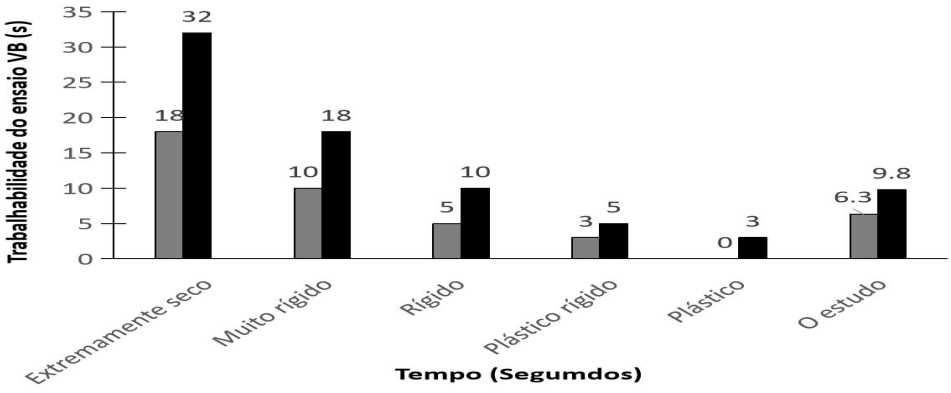


Figura 5 - comparação do ensaio de vêbê a e padrão de trabalhabilidade

Os betões produzidos com RCD apresentam resultados do ensaio de Vêbê próximos ao betão de referência. O mais próximo do ensaio de referência foi o betão com 20% de RCD. No entanto, aumentar o teor de RCD reduz

os resultados do ensaio de vêbê, significando normal e bom porque o ensaio de RCD em trabalhabilidade aumentou pouco, mas está no limite do betão rígido.

3.2 BETÃO ENDURECIDO

3.2.1 Permeabilidade e Porosidade

Os valores de permeabilidade à água medidos com o permeâmetro LCS devem estar entre 10 e 35 segundos. Caso ambos os percentuais de agregado utilizados atendam às especificações definidas em 14.03.2.4 para a mistura em questão, será adotado o menor [17].

Além dos procedimentos referidos no item 15.03.2.2-3, devem ser considerados os seguintes; aplica-se uma mistura de betão normal (REF) e três betões com diferentes percentagens de agregados graúdos reciclados, sendo a quantidade de cimento e vibração a mesma.

A permeabilidade e a porosidade do betões foram avaliadas pelo seguinte:

1. Porosidade por ensaio de imersão onde os resultados variam entre 18,6% e 21,9% (Figura 6.)

2. Os resultados obtidos estão dentro dos limites da norma, e os resultados de artigos publicados, como mostra na figura 7A, de comparação do ensaio de permeabilidade do LCS é 19 ,6 – 34,0 mm/s.

3. Os resultados dos ensaios de permeabilidade KFH para os cilindros de betão drenantes são mostrados na 7B; os ensaios são comparados com outros ensaios publicados e os resultados está entre 2,5 - 12 mm/s..

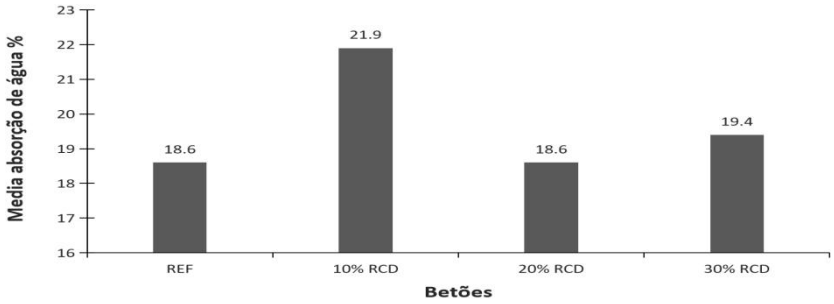
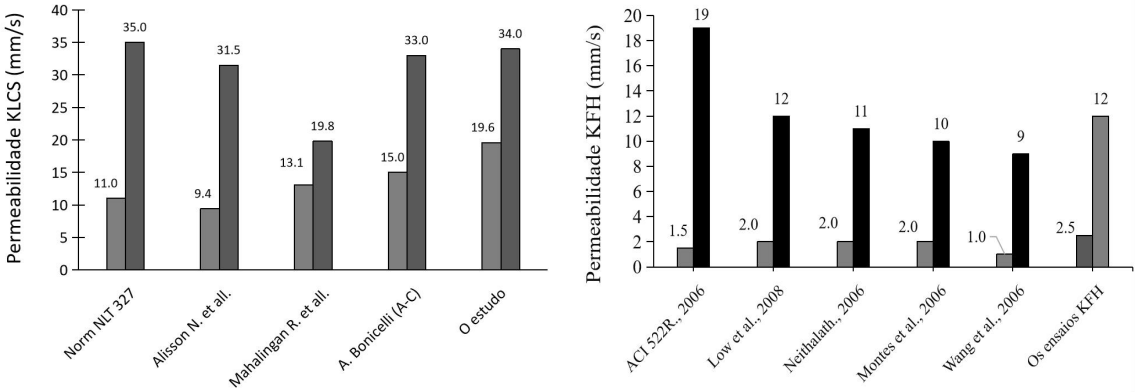


Figura 6 - Ensaio de absorção de água por imersão



A B

Figura 7 - A) Comparação do ensaio de permeabilidade do LCS [21, 31, 32 e 33] e B) permeabilidade FH [23, 27, 34, 35 e 13] com normas e Artigos publicados

Os resultados dos ensaios de permeabilidade KFH para os cilindros de betão drenantes são mostrados na 7B; os ensaios são comparados com outros ensaios publicados.

Os resultados dos ensaios de porosidade com os cubos de betão de (100x100x100 mm) são comparados com outros ensaios publicados na Figura 8.

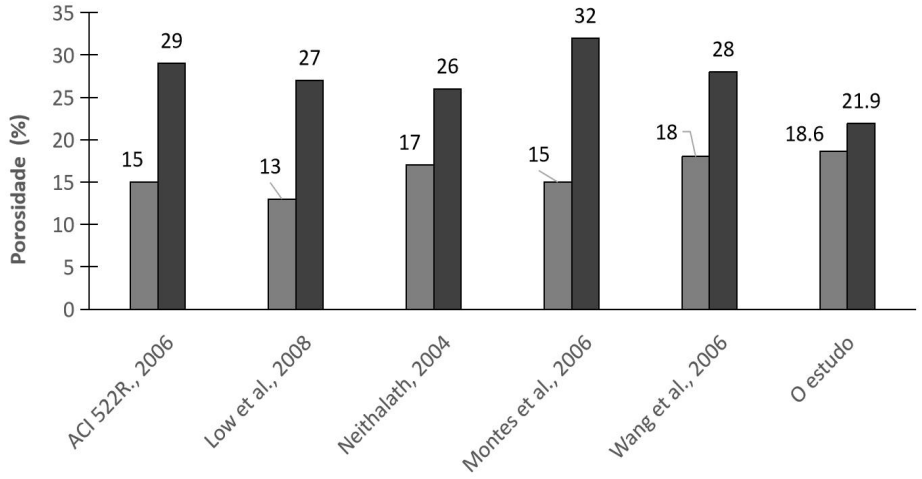


Figura 8 - Comparação da Porosidade por imersão com norma e Artigos [21, 28, 34, 35 e 12]

3.2.2 Ensaios de Mancha de areia, profundidades média de textura, Fricção do pêndulo britânico

As especificações portuguesas para pavimentos asfálticos porosos [36] especificam que a profundidades médias de textura PMT deve ser superior a 1,2 mm. Este valor é definido para betão asfáltico poroso, mas pode ser utilizado como referência para pavimentos de betões. Da análise das PMT dos resultados da Figura 9A e 9B, conclui-se que as misturas do tipo PA 12.5 (o betão REF e 10%, 20% e 30% RCD) não estão na faixa normal porque está acima de 1,2 mm do ensaio normal.

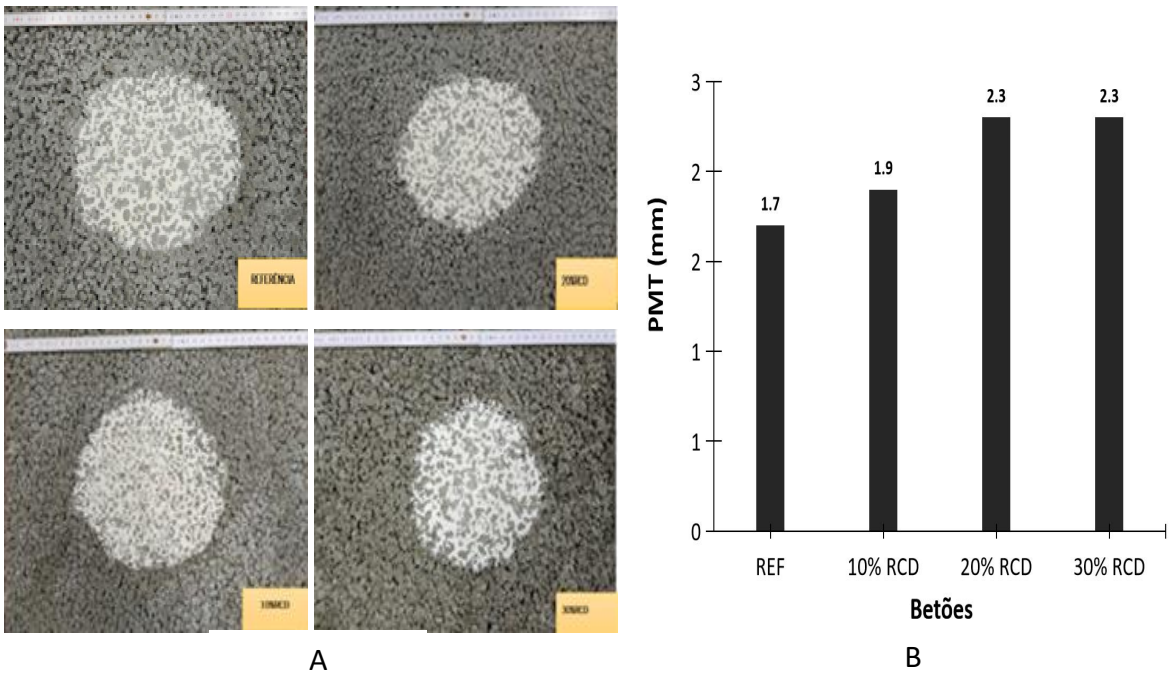
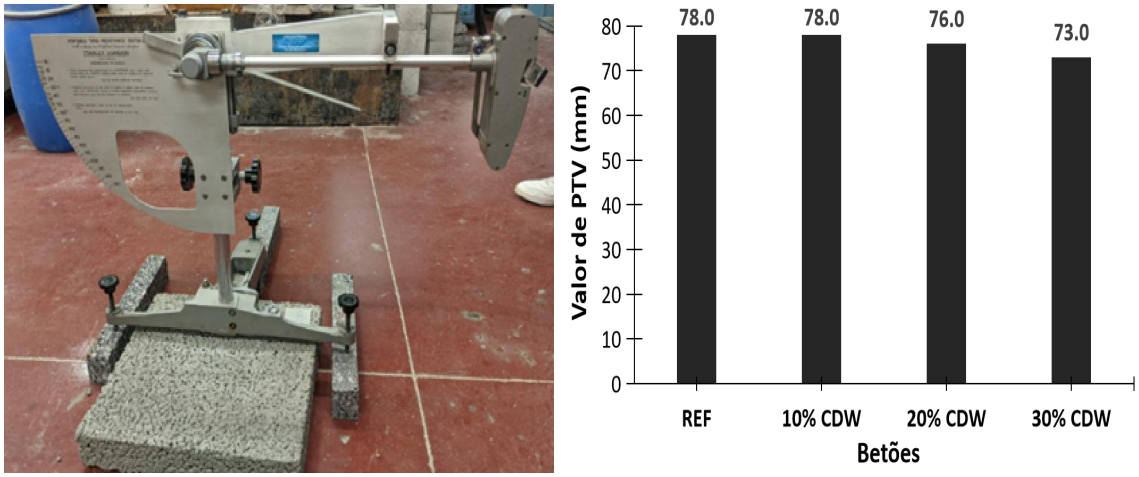


Figura 9 - A) Ensaios de mancha de areia e B) ensaios de profundidades médias de textura (PMT)

A resistência ao deslizamento/derrapagem é uma propriedade da superfície que limita o movimento relativo entre o contacto do pneu de um veículo e a superfície.



A B

Figura 10 A) Ensaios do Pêndulo Britânico e laje de ensaio, B) resultados dos ensaios

Ao analisar os ensaios da Figura 10A e 10B, verificou-se que os resultados mostram que a textura do betão é boa para fricção e evita aquaplanagem na estação chuvosa.

3.2.3 Ensaios de resistência à compressão e flexão

No Quadro 6 apresenta os resultados da resistência à compressão e flexão para cada betão. Com uma faixa de valores entre 8,9 a 21,7 MPa, os resultados mostram que os betões ensaiados atendem aos requisitos técnicos.

Quadro 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e flexão

Betões	Uso de RCD	Resistência (MPa)	
		Compressão	Flexão
REF	0% de RCD	21,7	4,3
10% RCD	10% de RCD	8,9	2,1
20% RCD	20% de RCD	18,6	3,7
30% RCD	30% de RCD	16,7	3,6

Este betão de RCD 10% não é suficiente para o pavimento de construção normal e pesada, mas pode ser utilizado para construção de pavimento para passagem de pessoas, bicicletas e motos. Neste estudo, uma conclusão média é que 20% de RCD está próximo do resultado de referência.

4 CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados no laboratório de engenharia civil, foi possível concluir que:

• Os resultados do ensaio de Vêbê, com A/C = 0,30 e vibração de 40 segundos, apresentam um valor de trabalhabilidade entre 6,25 e 9,75 segundos. Em relação ao teor de vazios, está entre 3,20 a 7,96 %, e a densidade do betão fresco está entre 1973,3 a 2139,0 kg/m^3. Os volumes vazios ou porosidade, os valores estão entre 18,59 a 21,94%, significa que está dentro dos limites da norma.

• A superfície porosa desta mistura de 10%, 20% e 30% de RCD e Referência tem a vantagem de não utilizar ranhuras na construção da superfície.

• Pelos resultados apresentados e discutidos neste artigo, o betão permeável foi identificado como otimizado devido ao seu desempenho mecânico, respeitando as especificações de permeabilidade.

• Com valores variando de 8,9 MPa a 21,7 MPa, foi comprovado que todos os betões foram ensaiados para atender aos requisitos de resistência à compressão do betão permeável. O resultado do ensaio de 8,9 MPa de 10% RCD não pode ser usado para a construção de veículos normais, mas pode ser usado para os pisos para o transporte de motocicletas, bicicletas e pessoas nas capitais e regiões metropolitanas.

• Analisando os resultados dos ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico e textura, foi possível confirmar que o uso de agregados reciclados geralmente induz uma redução na resistência, provavelmente como consequência do aumento do módulo de rigidez das misturas recicladas. Os vazios foram obtidos em toda a faixa de temperaturas e frequências. Este ensaio de betão poroso é para evitar a ocorrência de aquaplanagem na estação chuvosa.

REFERÊNCIAS

[1] Flintsch, G. W., et al., (2003). Pavement Surface Macrotexture Measurement and Applications. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (Vol. 1860, Issue 1, pp. 168–177). SAGE Publications. https://doi.org/10.3141/1860-19.

[2] Abe, H., et al., (2001). Measurement of Pavement Macrotexture with Circular Texture Meter. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (Vol. 1764, Issue 1, pp. 201–209). SAGE Publications. https://doi.org/10.3141/1764-21.

[3] Chen, J., et al., (2019). Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry. In Construction and Building Materials (Vol. 226, pp. 910–919). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.321

[4] Meegoda J.N., et al., (2015). Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement. In Journal Traffic Transportation Engineering (vol. 2 no.6 pp.382–390). English ed, online. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.09.001.

[5] Zuniga-Garcia N., et al., (2016). Contribution of Micro- and Macro-Texture for Predicting Friction on Pavement Surfaces. In Center for Highway Pavement Preservation (CHPP). Retrieved on December 30, 2022, accessed at https://www.chpp.egr.msu.edu/wp-content/ uploads/ 2018/03/CHPP-Report-UTA3-2017_Texture.pdf.

[6] Leach R. (2013). Characterisation of Areal Surface Texture. In Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York Dordrecht London [eBook] online https://doi.org.10.1007/978-3-642-36458-7.

[7] Li L., et al., (2016). Geometric texture indicators for safety on AC pavements with 1 mm 3D laser texture data. International Journal Pavement Research and Technology. (Vol. 9 no.1 pp. 49–62. Online https://doi.org./10.1016/j.ijprt.2016.01.004.

[8] Li Q., et al., (2017). Novel Macro- and Microtexture Indicators for Pavement Friction by Using High-Resolution Three-Dimensional Surface Data. In Transportation Research Record (Vol. 2641 pp164–176). https://doi.org./10.3141/ 2641-19.

[9] Zou Y., et al., (2021). Neural network-based prediction of sideway force coefficient for asphalt pavement using high-resolution 3D texture data. In International Journal Pavement Engineering. (Vol.1 pp. 1-10). https:// doi.org. / 10.1080/10298436. 2021. 1884862.

[10] Shaban, W. M., et al. (2019). Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. Construction and Building Materials, (Vol. 216 pp. 632–647). https://doi.org./10.1016/j.conbuildmat.2019.04.231.

[11] Wang, J., et al. (2020). Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. Construction and Building Materials, (Vol. 234, no. 117366). https://doi.org./10.1016/j.conbuildmat.117366.

[12] Shaban, W. M., et al., (2021). Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance. Construction and Building Materials. (Vol. 276 no. 121940. https://doi.org./101016/j.conbuildmat.2020.121940.

[13] Tam, V. W. Y., et al., (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. In Journal of Materials Science, (Vol. 42 no. 10 pp. 3592–3602. https://doi.org./10.1007/s10853-006-0379-y.

[14] Li, J., et al., (2009). Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. (Vol. 23, pp. 1287–1291) https://doi.org./10.1016/conbuildmat.2008.07.019.

[15] IPQ - NP EN 197-1. (2012). "Cimento. Parte 1: Composição especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes." No. Instituto Português da Qualidade, 2º edição de 39 p. Caparica, Lisboa Portugal.

[16] EP - Estradas de Portugal, S.A. (2014). Paving Material characteristics, Notebook. Charges. Type Work. 03 (2014) 125.

[17] NP EN 1097-6. (2000). Test for mechanical and physical properties of aggregate part 6: Determination of particles density and water absorption.

[18] NP EN 1097-2. (2002). Los Angeles Machine Wear Resistance Test Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa.

[19] NP EN 12350-3. (2009). "Fresh Concrete Tests Part 3: (Vee bee Test," pp. 12). Publisher; Comite Europeen de Normalisation.

[20] EN. 12390-2. (2009). "Tests of hardened concrete. Part 2: Execution and curing of specimens for mechanical strength tests".

[21] NLT-327. (2000). Permeabilidad in sítu de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS, España.

[22] ACI Committee 522R. (2010). Report on Pervious Concrete. American Concrete Institute (ISBN 9780870313646 pp. 40).

[23] "NP - 581 (1969). Aggregates for mortar and concrete (Determination of the density and water absorption of gravel and cobbles). Caparica Lisboa.

[24] NP EN 12350-1. (2009). "Fresh Concrete Tests Part 1: (Amostragem/ sampling," pp. 12). Publisher; Comite Europeen de Normalisation.

[25] ASTM International - ASTM E965-96 (1996). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique https://standards. globalspec.com/std/ 3806096/ASTM E965-96 10/11/1996.

[26] Low K., et al., (2008). Statistical characterization of the pore structure of enhanced porosity concrete. Published in Materials Science no ID 137461134. Proceedings in CD of the Concrete Technology Forum, Denver, National Ready Mix Concrete Association.

[27] NP EN, 206:2013+A1 (2017). "Tests Concrete specification performance, production and conformity and molds standard written in Portuguese Quality Institute".

[28] BS EN 12390-5. (2019) Hardened concrete test. Flexural strength of test specimens

https: //doi.org/10.3403/30360073 (publicado em 19/07/2019).

[29] EN, 12390-1. (2003). "Tests of hardened concrete part 1: Shape, dimensions and other requirements for testing specimens and molds standard written in Portuguesa".

[30] IPQ - NP EN 12350-3, “Ensaios do betão fresco Parte 3: Ensaio Vêbê,” p. 12, 2009.

[31] Alisson Nemuel IDALGO1 Juliana Aparecida de CASTRO2 Patricia Luisa de ALMEIDA3 Yandara Caroline da SILVA4 Marcelo Jacomini Moreira da SILVA 2018 DETERMINATION OF THE PERMEABILITY COEFFICIENT OF CONCRETE DRAINAGE ELEMENTS https://www.researchgate.net/publication/329791932

[32] Rama Mahalingam, Shanthi Vaithiyalingam Mahalingam 2016 Analysis of pervious concrete properties DOI: 10.14256/JCE.1434.2015 https://hrcak.srce.hr/file/238524

[33] A. Bonicelli, G. M. Arguelles and G. F. Pumarejo, “Improving Pervious Concrete Pavement for Achieving More Sustainable Urban Roads” Procedia eng., Vol. 161, PP 1568-1573, 2016.

[34] Neithalath N., et al., (2006). Predicting the Permeability of Porous Concrete. In Concrete international (Vol. 32 no 5 pp. 35-40). From Non-Destructive Electrical Measurements.

[35] Montes, F., et al., (2006). "Measuring Hydraulic Conductivity in Porous Concrete." Environmental Engineering Science (Vol. 23 no 6 pp 960–69). https://doi.org/10.1089/ees.2006.23.960.

[36] Martin W.D., et al., (2014). Impact of vertical porosity distribution on the permeability of porous concrete, Construction Building and Materials. (Vol. 59 pp. 78–84). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BLOCO (TIJOLO) DE VEDAÇÃO DESENVOLVIDOS A PARTIR DO DESCARTE DE PAPEL KRAFT (SACOS DE CIMENTO) – DESEMPENHO DE RESISTÊNCIA E AVALIAÇÃO TÉRMICA

Anderson Clayton da Silva Rodrigues[a]; Marcio Luiz Varela Nogueira de Moraes[a];

[a](Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Avenida senador Salgado Filho 1559, 59015-000, Natal, Brasil) anderson.clayton@ifrn.edu.br

[b](Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Avenida senador Salgado Filho 1559, 59015-000, Natal, Brasil) marcio.varela@ifrn.edu.br

RESUMO

A construção civil é um dos setores que contribui para a economia e desenvolvimento social, elevando renda e emprego. No entanto, não engloba apenas pontos positivos, pois, é considerada um dos setores que impactam o meio ambiente, isso relacionado ao consumo de recursos naturais para atender a demanda de matéria-prima para as construções. Dentre os resíduos, o papel Kraft múltiplas folhas (sacos de cimento) descartados incorretamente.

Esse é um resíduo de baixo índice de reciclagem, devido às embalagens, serem “contaminadas” por resquícios do produto ensacado. Esse motivo, a reciclagem torna-se ainda mais difícil, necessitando de procedimentos que o transformem em um novo material e propicie a sua reutilização. Nesse contexto, faz-se necessário uma destinação adequada aos resíduos da construção civil, seja com o desenvolvimento de novos métodos e produtos a partir dos materiais descartados, ou com a inserção de tais materiais nos métodos já utilizados. A pesquisa é direcionada à utilização de sacos de cimento como matéria-prima para a produção de blocos de vedação com baixo teor de cimento, visando à contribuição para a indústria construtiva e o meio ambiente, onde avaliaremos as propriedades técnicas, mecânicas, a fim de inseri-lo no mercado por sua viabilidade econômica e sustentabilidade.

.

Palavras-chave: Papel Kraft, Sacos de cimento, Bloco (tijolo), Resíduo sólido, sustentável

1 INTRODUÇÃO

Mediante ao crescimento das cidades, podemos observar os extremos das temperaturas se intensificando cada vez mais. Segundo o relatório de avaliação do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), o aumento da temperatura global ultrapassará 2°C dos níveis pré-industriais, isso caso se medidas urgentes não forem desenvolvidas para estabilizar as emissões dos gases do efeito estufa. Os maiores prejudicados por essas mudanças climáticas serão certamente os países tropicais, dentre eles o Brasil. Os relatórios do IPCC relatam que poderão acontecer uma série de inundações em consequência do aumento das temperaturas e dos tempos de seca.

Na maior parte do Brasil, obter um conforto térmico nas edificações é cada vez mais estudado e exigido nos projetos. Sendo assim, uma das soluções vistas foi o uso de equipamentos mecânicos no qual devem proteger os usuários das condições rigorosas da temperatura do clima. Refrigeradores e condicionadores de ar, mas esses liberam gases hidrofluorcarbono (HFC), que são mais fortes do que o dióxido de carbono (CO_2) no qual prende os gases do efeito estufa na atmosfera, causando o aquecimento global.

Para proporcionar um conforto térmico a NBR 15575, entrou em vigor em 2013, no qual empenha-se a respeitar as exigências e a duração da qualidade de um edifício não só na fase de construção, mas também ao longo da sua vida útil. Nela foca apenas os critérios de desempenho térmico em condições naturais de insolação, ventilação e outros fatores, como por exemplo a acústica e a iluminação.

É notório que a indústria da Construção Civil deve explorar novas abordagens sustentáveis para garantir a maior contribuição para redução desses impactos ambientais, elaboradas nas fases de projeto, implementadas na etapa construção e na ocupação das edificações. Uma das maneiras de alcançar um avanço sustentável é a incorporação de materiais reciclados, feitos a partir de resíduos. A declaração 307 do o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) explica que os resíduos da construção civil são todos os “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultados da preparação e escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, argamassa, gesso, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc. comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”. Referência Tessari (2006) sobre o desenvolvimento tecnológico e sustentável:

> O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico, sem dúvidas, trouxeram grandes benefícios à sociedade. Mas, associados à expansão populacional e a um comportamento de consumo inadequado, provocaram vários efeitos colaterais, ensejando a necessidade de adoção de um novo tipo de desenvolvimento: o desenvolvimento sustentável. (TESSARI; JANAINA, 2006, P.12)

Com base no que foi exposto, entende-se a necessidade de buscar e estudar materiais sustentáveis que possam ser aplicados no desempenho térmico de modo eficiente, acessível e ecológico. Em vista disso, esta pesquisa desenvolve a viabilidade técnica da utilização de sacos de cimento para a fabricação de blocos de vedação sustentáveis a base de celulose com baixo teor de cimento adicionado.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo de desempenhar a produção de blocos de vedação à base de celulose (papel Kraft) sem função estrutural e estudar a eficiência do desenvolvimento térmico e sua resistência à compressão em edificações.

3 MÉTODOS / MATERIAIS / EQUIPAMENTOS

O artigo é sobre o desenvolvimento térmico provenientes dos blocos de vedação a base de celulose. Este conjunto de blocos foram submetidos a uma série de estudos sobre as suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas por meio de ensaios exercidos de acordo com a norma, assim examinando se os seus comportamentos estão dentro dos padrões normatizados.

COLETA DOS SACOS DE CIMENTO - A primeira etapa (Figura 1) inicia-se com o recolhimento de sacos de cimentos para produção da polpa celulose. Esses sacos são recolhidos nas obras da região metropolitana de Natal-RN e devem estar isentos de impurezas como graxas, óleos, tintas ou produtos químicos. Após o recolhimento, o papel Kraft é devidamente armazenado em tonéis plásticos.

Figura 1 - Sacos de cimento

CONTROLE DE ÁGUA - O desenvolvimento das etapas para se obter o controle de água no papel Kraft, o valor necessário de água para atingir a saturação da celulose foi alcançado para que o processo de obtenção da polpa fosse produzido sem desperdícios de água. O ensaio apresentou uma absorção média de 65% até o ponto de saturação adequada para o desenvolvimento da pesquisa. A partir desse grau de saturação, foi definido que 8 litros de água para 1500g de papel seriam necessários para as demais etapas, como trituração dos sacos e formulação dos traços para fabricação dos blocos sustentáveis sem função estrutural.

POLPA CELULOSE E ARGAMASSA SUSTENTÁVEL – O processo de reciclagem dos sacos de cimento foi iniciado com a fragmentação manual do papel Kraft no triturador industrial de papel. Durante esse processo, é importante observar se há formação de cristais hidratados do aglomerante hidráulico, a fim de que o material não gere danos ao equipamento utilizado. Em seguida, 1500g do papel foi depositado em um recipiente contendo 8L de água, 0,14% de bactericida e 0,14% de fungicida (porcentagem em função da massa seca do papel) durante o período de 24 horas para a saturação do material. Posteriormente, o material passou a ser transportado para o liquidificador industrial como mostrado na Figura 2 e com o mesmo líquido utilizado na etapa de saturação, tendo em vista uma produção ecologicamente correta no uso dos recursos naturais, de modo que a água foi reutilizada, conforme a demanda do processo em questão. Dessa maneira, o material foi processado no liquidificador industrial por 5 minutos, para que em seguida fosse realizada a dispersão manual das fibras, obtendo-se, assim, a polpa celulose.

Figura 2 - Triturador e Liquidificador

TRAÇO UTILIZADO –Com a obtenção da polpa concluída, iniciou-se o processo de confecção do traço. Nesse processo, a polpa passou a ser homogeneizada pela betoneira(Figura 3) com 0,14% de impermeabilizante e 10% de cimento (porcentagem em função da massa seca do papel). Essa homogeneização dos insumos para fabricação da argamassa sustentável.

Figura 3 - betoneira

MODULAÇÃO E FABRICAÇÃO DOS BLOCOS – Finalizada a mistura dos materiais e produção da argamassa sustentável, manualmente, na bloqueira manual, através de 5 camadas de compactação, realizou-se manualmente a etapa de produção do bloco celulose. Inicialmente, o compósito foi depositado no molde com dimensões de 24x6,5x12cm do equipamento, tendo sido realizado por meio de 5 camadas de argamassa, as quais foram golpeadas 50 vezes, utilizando-se um soquete metálico para compactação e adensamento do compósito. Ao concluir a compactação da última camada, foi realizado o declive da mão-de-força da bloqueira, resultando na prensagem do bloco celulose. Por fim, o bloco, cuidadosamente, retirou-se do molde, sendo em seguida repousado em superfície plana durante o processo de cura seca (Figura 4), tendo ocorrido em área coberta e arejada no período de 28 dias para que as reações do cimento ocorram e alcancem sua resistência.

Figura 4 - Modulação e cura dos blocos

4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Na Diretoria Acadêmica de Construção Civil - DIACON foram realizados os ensaios nos laboratórios Materiais de Construção e Materiais e Produtos Cimentícios, conforme a NBR 8492:2013 para Tijolo de solo cimento - Análise dimensional determinação da resistência à compressão e da absorção e da água- método de ensaio.

De acordo com a NBR 8492/2013, a resistência à compressão foi avaliada através de carga aplicada sobre a área bruta dos blocos. Dessa maneira, 5 blocos com idade de 28 dias foram selecionados para execução deste ensaio conforme a norma estabelece. Repetiu-se este ensaio visando à obtenção de melhores resultados através de uma melhor compactação e adensamento.

Os blocos foram cortados ao meio perpendicularmente a sua maior direção com uma serra circular de bancada localizada no setor de manutenção do IFRN/CNAT. Em seguida, produziu-se uma argamassa de traço 1:2:0,65, sendo o agregado miúdo peneirado na #2,36, a fim de reduzir a granulometria e ter um melhor acabamento na regularização do capeamento. Segundo a norma 8492/2013, a altura das camadas deve ter espessura de 2 a 3 mm. Nas faces maiores dos blocos cortados, depositou-se uma fina camada dessa argamassa de regularização. Além da camada já mencionada, outras nos dois lados dos blocos foram empregadas.

Para a realização desse capeamento (Figura 5), foram necessários dois dias. No primeiro dia, executou-se o capeamento em uma das faces cortadas, área à qual foram ligadas as metades dos blocos, e, após 24 horas, efetuou-se a última camada na face superior material a ser ensaiado.

Figura 5 - Capeamento dos blocos

Após a cura do capeamento, os corpos de prova (CP's) foram transportados para o laboratório de Materiais e Produtos Cimentícios da DIACON, onde encontra-se a prensa elétrica hidráulica marca Contenco Pavitest, modelo I- 3025-B, capacidade 100 toneladas, digital. Na prensa (Figura 6), os CP's foram dispostos no prato inferior do equipamento, centralizando-o conforme a norma determina. A NBR 8492, deve ser aplicado sob os corpos de prova, uma carga uniforme e à razão de 500N/s (500kgf/s). Como também, orienta que a carga deve ser elevada gradativamente até ocorrer a ruptura do corpo de prova.

Figura 6 - Prensa dos blocos

5 ENSAIO TÉRMICO

A realização do ensaio de condutibilidade térmica dos blocos foi desenvolvida no laboratório da de instalações eletricas. Para isto, teve que produzir uma casa-maquete com dimensões 70x47x50cm, um lastro à base de madeira para demonstrar um piso. Neste apoio, quatros ferros corrugados de 5/16" e 19 cm de comprimento, foram postos fixados um em cada aresta e preencidas com argamassa. Para o assentamento dos blocos de vedação foi utilizado uma argamassa tradicional de assentamento traço 1:6 (cimento Portland e areia média) e as placas de fibrocimento como vedação horizontal, onde foram

instaladas no topo da maquete fragmentada em três, no qual duas placas que ficam nas pontas foram assentadas com argamassa colante e a do meio com silicone pois assim ela serviria de porta para ter acesso na parte de dentro da maquete.
Para a execução do ensaio foi preparada uma tática de um sistema elétrico com dois soquetes para duas lâmpadas de 500 watts, um interruptor e um plug macho para a tomada. Desse modo, iniciamos um ensaio térmico informal para examinar o comportamento dos blocos e o estudo de resultados. Foi colocado um termopar com dois sensores de temperatura, um na parte interior da maquete e o outro na parte exterior da mesma parede e na mesma altura e com um ângulo de inclinação, isso para adquirir os cálculos de forma coerente.

Figura 7 - Maquete

De acordo com a Tabela 1 abaixo as três primeiras medições foram calculadas no período de trinta minutos, porém as demais medições precisaram ser simuladas no intervalo de quinze minutos, dado que a temperatura subiu vertiginosamente. Segundo a norma vigente NBR 15220/2003, o período da realização do ensaio é de vinte e quatro horas, porém devido a disponibilidade do local, reduzimos o espaço amostral para doze horas. Todavia, enfrentamos outro problema no qual também não foi possível continuar com a realização do ensaio, isso pelo fato de que dentro da maquete começou a incendiar e assim o sensor interno fundiu com mais de quatros horas. Como sequela, o ensaio precisou ser interrompido e assim na elaboração de uma planilha com os dados dos resultados, notou-se que o ensaio foi concluído em quatros horas e trinta minutos.

Tabela 1 - Dados dos sensores

MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO ENSAIO TÉRMICO				
Ensaio realizado no laboratório de elétrica da DIACON no dia 09/08/2018				
MEDIÇÃO	HORA	T1° (interna)	T2°(externa)	T1°-T2°
1°	12:27	59,7	24,1	35,6
2°	12:57	113,3	31,3	82,0
3°	13:27	138,8	36,1	102,7
4	13:42	155	40,7	114,3
5	13:57	164,2	40,4	123,8
6	14:12	182,4	42,6	139,8
7	14:27	189,6	42,4	147,2
8	14:42	194,5	43,3	151,2
9	14:57	196,9	43,3	153,6
10	15:12	202,9	43,6	159,3
11	15:27	214,1	43,6	170,5
12	15:42	219,7	43,6	176,1
13	15:57	223,4	44,1	179,3
14	16:12	234,4	43,0	191,4
15	16:27	241,7	43,6	198,1
16	16:42	264,8	44,2	220,6
17	16:57	281,8	44,9	236,9
SOMATÓRIO		3277,2	694,8	2582,4
MÉDIA		**192,8**	**40,9**	**151,9**

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - O ensaio foi realizado nos laboratórios de Materiais de Construção e Materiais e Produtos Cimentícios, sendo utilizados para o preparo dos blocos e para a obtenção da resistência do material, respectivamente. Os 5 blocos ensaiados (Tabela 2) seguiram as recomendações da norma 8492:2013 de Tijolo de solo cimento, já que o compósito produzido para fabricação dos blocos ecológicos não possui normas e diretrizes próprias. Isso ocorre devido ao compósito ser um material novo, que ainda não dispõe de normas voltadas para sua produção.
No quadro a seguir, são apresentados a média de resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples dos blocos de vedação à base de celulose proveniente de sacos de cimento descartados nas construções.

Tabela 2 - Dados do Ensaio de Resistência

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DOS BLOCOS CELULOSE			
IDENTIFICAÇÃO	CARGA (Kgf)	ÁREA (mm^2)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
B1	2990	14581	2,2
B2	3050	14460	2,2
B3	2980	14460	2,1
B4	3020	14400	2,2
B5	3560	14581	2,6

Vale salientar que durante a execução do ensaio, nenhum dos blocos romperam. No entanto, deformaram-se até que o "fim de curso" da máquina, quando este alcançou o seu limite, movendo-se para cima e ocasionando o interrompimento da prensagem. Dessa forma, podemos classificar o bloco de celulose como um material moderadamente dúctil, já que sofreram deformação, mas não se romperam, ao contrário de materiais classificados como frágeis.

Nessa conjuntura, e através dos resultados apresentados no quadro 1, observou-se que os blocos à base de celulose apresentaram boa resistência quando submetidos à compressão axial. Mesmo não tendo sofrido rompimento ou não alcançado sua resistência final no ensaio, em consequência do interrompimento da prensagem, os blocos apresentaram resistência superior à resistência mínima à compressão exigida pela norma NBR - 10834/1994 de blocos de solo-cimento que é de 2,0 MPa.

O bom desempenho dos blocos à base de celulose quando solicitados a cargas de esforço normal, ocorre devido ao processo de hidratação dos compostos anidros presentes no material, que resultam em uma grande contribuição para a sua resistência mecânica.

Outro aspecto importante observado no ensaio de compressão axial consistiu na porosidade do material. Durante a prensagem, o bloco, ao invés de romper, como os blocos convencionais cerâmicos ou de solo-cimento, apenas comprimiu aduzindo a porosidade que materiais à base de fibra celulose possuem. Assim, o bloco produzido com argamassa sustentável revelou ser um possível isolante térmico e acústico, sendo o acústico já comprovado através de ensaio.

Com relação à deformação, os corpos de prova apresentaram uma peculiaridade que materiais dúcteis possuem: considerável absorção de energia. Na construção civil, materiais com essa característica, são muito importantes em termos de segurança, tendo em vista a fase de deformação ser longa, funcionando como um "alerta" e possibilitando tempo maior de evacuação em um empreendimento quando ocorrem terremotos, por exemplo.

Importante consignar que os blocos de celulose, assim como outros materiais classificados como dúcteis, não apresentam elevada resistência a cargas. Portanto, o bloco ecológico, objeto de estudo deste trabalho, deve ter sua utilização apenas para vedação, ou seja, sem função estrutural.

ENSAIO TÉRMICO - Para a verificação das medições das paredes internas e externas foi através do termopar no qual a sua verificação teve que ser determinada no tempo a cada trinta minutos. No entanto, a temperatura interna da maquete apresentou uma frenética alteração, assim precisou

estipular um novo tempo que por fim ficou em quinze minutos no qual mostrava uma interpretação clara dos dados alcançados. Logo, foi averiguado dezesseis referências e assim configurado pelo gráfico abaixo:

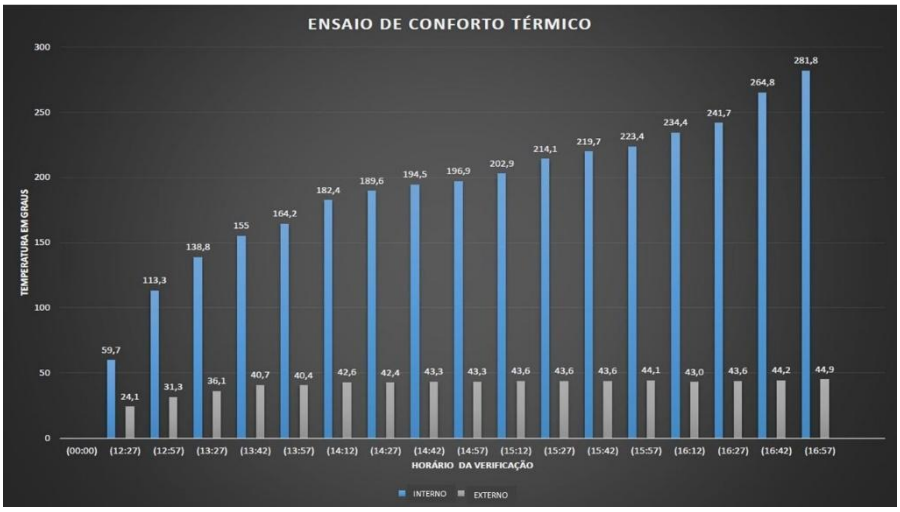


Figura 8 - Resultdo do Ensaio Termico

Vale ressaltar como o ensaio foi realizado dentro do laboratório de materiais da DIACON - IFRN/CNAT o ambiente tinha uma atmosfera ambiente de 24°C a 26°C em média pelo fato de ser um laboratório climatizado. Após quatros horas e trinta minutos de ensaio, a maquete apresentava uma fumaça na parte de dentro, logo o sensor interno do termopar apresentava-se derretido, ou seja, a temperatura foi tão grande que acabou danificando o termopar e assim precisou-se finalizar o ensaio térmico.
No fim do ensaio, as temperaturas da maquete apresentaram 281,8°C internamente e 44,9°C externamente. Isto enfatiza o quanto que o bloco a base de celulose demonstrou ser um excelente isolante térmico, isso porque a temperatura interna não atravessou a parede externa, sendo assim comprova que a transmitância térmica máxima das paredes foi extremamente baixa. Sendo assim, mesmo o ensaio não ter sido realizado no tempo no qual a norma NBR 15220/2003 estabelece, proporciona resultados positivos sobre o isolante térmico utilizado no material e que se pode ser empregado em projetos revolucionários futuros.

7 CONCLUSÕES

Esse artigo contribui para evidenciar a importância da aplicação do isolamento térmico em construções, procedimento esse que oferece muitas vantagens de conforto aos usuários. O presente estudo permitiu avaliar um novo material com a finalidade de isolamento térmico, debatendo conceitos importantes como a sustentabilidade, conforto térmico e eficiência energética, componentes que cada vez mais são importantes em projetos de edificações. Além do mais, há uma necessidade da evolução de materiais inovadores no qual consumam menos energia no seu rendimento. Diante o exposto, o papel Kraft vindo das embalagens dos sacos de cimentos, que são jogados nos canteiros de obras no cotidiano e assim geram uma poluição ao meio ambiente, ficou destacado o potencial das fibras junto com as características de resistência mecânica do cimento para a fabricação dos blocos. Dos resultados obtidos nos ensaios de condutibilidade térmica tanto nos blocos, feitos ecologicamente, apresentou uma barreira de calor impedindo uma grande transmitância térmica entre os ambientes internos e externos da maquete, o que aponta ser um isolante térmico em competência e acessível para projetos residenciais, viabilizando um conforto térmico. Além dos benefícios ao meio ambiente, esse procedimento garante uma grande economia para a construção

civil, em virtude que além de utilizar materiais sustentáveis (sacos de cimentos), o teor dos novos materiais que estão na formação tanto dos blocos é bastante baixo e o gasto com energia elétrica é irrelevante na sua fabricação, onde é feita utilizada na betoneira e no liquidificador, uma vez que a produção do bloco e placa foi feita manualmente.

Com base nas análises efetuadas, constata-se o grande potencial do material e a inovação tecnológica da pesquisa, é interessante e proposto a continuidade do estudo em outros aspectos desse elemento que aqui não foram abordados e que seriam de igual modo pertinentes para o aprimoramento desse elemento construtivo, desde aprimorar a técnica de obtenção, melhorando seus processos tornando-os o mais eficaz e sustentável possivel e outras propiedades a ser exploradas como por exemplo desempenho acustico, viabilidade economica, calculos mais aprofundados sobre a composição do material, como determinar o valor do coeficiente de transmissão termica ou o valor de sua condutibilidade térmica.

8 AGRADECIMENTOS

A todos os amigos que colaboraram direta ou indiretamente com atenção e disponibilidade, ao LASEM (Laboratório de Sistemas Estruturais e Metódos), a instituição IFRN-CNAT (Instituto federal de Educação, Ciênncia e Tecnologia do Rio Grande do Norte – Campus Natal – Central), a DIACON (Diretoria Acadêmica de Construção) pelo apoio do corpo docente e pelas instalções dos laboratórios, equipamentos e materiais a DIPEQ/CNAT (A Diretoria de Pesquisa e Inovação do Campus Natal Central) pelo incentivo e apoio para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

O relatório de avaliação do IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ano. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: dia, abril de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: Tijolo de solo cimento - Análise dimensional determinação da resistência à compressão e da absorção e da água- método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural, Rio de janeiro,2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-4: Desempenho térmico de edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-5: Desempenho térmico de edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da Construção Civil. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307 .Acesso em: 01 julho de 2019.

TESSARI, Janaina. Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil. 2006. 102f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

OBTENÇÃO DE PLACAS DE CELULOSE A PARTIR DE SACOS DE CIMENTO E UTILIZADAS COMO PREENCHIMENTO DE PORTAS CORTA FOGO

Anderson Clayton da Silva Rodrigues [a]; Marcio Luiz Varela Nogueira de Moraes [b];

[a] (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Avenida Senador Salgado Filho 1559, 59015-000, Natal, Brasil) anderson.clayton@escolar.ifrn.edu.br

[b] (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Avenida Senador Salgado Filho 1559, 59015-000, Natal, Brasil) marcio.varela@ifrn.edu.br

RESUMO

A construção civil é uma das principais contribuintes para o desenvolvimento do país, sendo uma área muito importante para economia e crescimento social brasileiro, por ser um setor que tem a eficácia de aumentar a taxa de emprego, produto e renda. Todavia, ela é considerada uma das grandes causas de impacto ambiental, onde gera muito resíduo no canteiro de obras. Nos materiais que são descartados, os sacos de cimentos, não são reaproveitados ou reciclados, causando assim uma grande quantidade de resíduos. Por ele ser um papel muito robusto, acaba trazendo grandes danos para o meio ambiente.

As fibras, encontradas no papel Kraft dos sacos de cimentos, são usadas há muito tempo na construção civil, mas, a carência desse conhecimento no mercado ainda é vasta. Essas fibras têm capacidade de absorver grandes cargas, pois junta com as características mecânicas do cimento formam um sistema polimérico de alta resistência. Com a presença da cal e do silicato de sódio na produção da massa, a durabilidade é assegurada.

A pesquisa foi realizada no intuito de produzir portas corta fogo utilizando as placas a base de celulose, onde contribui para a redução dos impactos causados pelos descartes inadequados dos sacos de cimentos.

Palavras-chave: Porta corta-fogo, reutilização, conforto térmico, construção civil.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo é fruto de uma pesquisa que se dar pela utilização da celulose adquirida através do descarte de sacos de cimento e o desenvolvimento de estudos sobre a sua utilização, dentro da própria construção civil, como forma de reutilização de um resíduo que atualmente e descartado e considerado sem utilidade.

O termo “verticalização” é amplamente utilizado por especialistas para se referir ao processo de crescimento vertical das cidades. Isto é, através de grandes edifícios residenciais. Esse fenômeno vem acontecendo no mundo todo desde o século XIX e oferece uma série de benefícios atrelados a ele quando bem-planejado.

Em virtude dessa verticalização existem dispositivos que são essenciais para a segurança dos empreendimentos que a depender da altura da edificação e da ocupação que a edificação tenha, há a obrigatoriedade da porta corta-fogo. Segundo instrução técnica n°11 do Corpo de Bombeiros, prédios residenciais com mais de 12 metros de altura, o que contempla os que tenham ao menos três a quatro pavimentos, devem ter porta corta-fogo.

A engenharia civil em uma das suas bases tem como objetivo o melhoramento do processo construtivo com pesquisa científica e inovação tecnológica, podendo desenvolver produtos, processos e elementos inovadores que solucionem, auxiliem e combatam, problemas decorrentes da modernização, esboçando assim uma melhora significativa no ambiente das ditas grandes cidades.

Diante disso o IFRN – CNAT (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – Campus Natal – Central) pelo LASEM (Laboratório de Sistemas Estruturais e Métodos) através de pesquisa desenvolve e vem aperfeiçoando um elemento construtivo, uma porta corta-fogo, sendo esse com propriedades térmicas, com apelo sustentável, desenvolvido a partir de uma argamassa ecológica se reutilizando o saco de cimento (papel Kraft múltiplas folhas) descartado da construção civil e conformando-o num elemento construtivo. Viabilizando este produto da pesquisa cientifica como apto a ser utilizado de acordo com a sua designação construtiva.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar tecnicamente e economicamente a produção de um protótipo de portas corta-fogo a partir do emprego do resíduo do tipo papel Kraft proveniente das embalagens de cimento descartadas na construção civil como uma alternativa sustentável para esse setor industrial.

3 MÉTODOS

O processo de transformação dos sacos de cimento em uma polpa de celulose será iniciado no anexo II (sala de reciclagem) do L.A.S.E.M com a fragmentação manual do papel Kraft múltiplas folhas e posteriormente no triturador industrial de papel.

Esse processo, também envolve a observação se existe a formação de partículas hidratadas de cimento, a fim de que esse material não gere danos ao equipamento utilizado. Se retira esses cristais passando uma escova na embalagem do cimento. Desenvolvemos o traço que melhor se apresenta para uma satisfatória conformação da placa, 1500g do papel em um recipiente contendo 8L de água saturada de cal, 0,14% de bactericida e 0,14% de fungicida (porcentagem em função da massa seca do papel) durante o período de 24 horas para a saturação do material dentro de um depósito hermeticamente fechado.

O material passou a será transportado para o liquidificador industrial com o mesmo líquido utilizado na etapa de saturação, tendo em vista, uma produção ecologicamente correta no uso dos recursos naturais, de modo que a proposta é de reutilizar a água, conforme a demanda do processo em questão. Dessa maneira, o material foi processado no liquidificador industrial por 5 minutos, para que em seguida fosse realizada a dispersão manual das fibras, obtendo-se, assim, a polpa celulose.

Durante o processo de confecção da placa, a polpa será homogeneizada com 0,14% de impermeabilizante e 15% de cimento (porcentagem em função da massa seca do papel). Essa homogeneização dos insumos para fabricação da argamassa sustentável executada no anexo I (sala da betoneira) do L.A.S.E.M e posteriormente a argamassa será prensada através de conformação mecânica hidráulica de ação manual a frio numa bloqueira modular Vimaq, chegando a uma placa que utilizaremos como preenchimento das portas corta fogo. Assim, encerrando essa etapa do projeto.

4 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Como matéria-prima utilizada e equipamentos a pesquisa fez uso de: sacos de cimentos coletados em obras de construção e reforma, fragmentadora industrial tipo faca, bombonas de tampa hermética, balança digital, liquidificador industrial, betoneira, prensa hidráulica de ação manual (tipo bloqueira), cimento, Cal e Silicato de Sódio (bactericida), fungicida. Em relação aos procedimentos adotados e etapas do beneficiamento do material, formulações de espessura e traço foram definidas previamente com base em estudos anteriores, produzir a placa, confeccionar porta-maquete em escala reduzida, realizando um estudo sobre suas propriedades térmicas por meio de ensaios para testar o produto em desenvolvimento, analisar e avaliar os resultados comportamentais obtidos pelos laudos. Elaborar um relatório de parâmetros comprovando a sua viabilidade de sua produção.
Confirmando a formulação que seja satisfatória para a quantidade de cimento empregado no traço e o produto está dentro dos parâmetros das normas vigentes, essa sendo uma das partes que possa garantir uma economia de material e tornando-o um produto viável quanto a sua produção e atestando a sua validação técnica do produto.

5 PRODUÇÃO DA PLACA

O beneficiamento do saco de cimento passa por várias etapas como enumerados no passo a passo, de acordo com a figura 1. Os sacos são acondicionamento em lugar seco e longe de umidade (01) e com a fragmentação manual do papel (02), para posterior ser introduzido na fragmentadora de papel industrial (03), nessa fase existe uma seleção visual do material e as partículas hidratadas de cimento são retiradas a fim de que essas partículas não gerem danos ao equipamento utilizado. O traço que apresentou uma conformação satisfatória da placa, foi de 1500g do papel triturado em um recipiente contendo 8L de água saturada de cal e silicato de sódio (04), de acordo com estudos apresentados por Fonseca (2021), a presença da cal e do silicato de sódio na produção da massa, onde as reações CaO livre + SiO_2 no decorrer do processo de hidratação do cimento são estabilizadas e assim a cal acaba atuando como bactericida (05), evitando a reprodução de agentes degradantes da celulose; 0,14% de fungicida (porcentagem em função da massa seca do papel) durante o período de 24 horas para a saturação do material dentro de um depósito hermeticamente fechado (06).
O papel Kraft múltiplas folhas é transportado para um liquidificador industrial (07) com a mesma água da etapa de saturação onde é processado por cinco minutos, obtendo assim a dispersão das fibras tornando uma polpa de celulose, essa polpa de celulose é retirada toda a agua (08) que é colocada em um recipiente e tornando-se um granulo de celulose (09), posteriormente transferida para a betoneira (10) onde será acrescido 15% de cimento (em função da massa seca do papel) homogeneizada com a mesma agua já utilizada em todo o processo e prensada em uma bloqueira hidráulica de ação manual (11) e finalmente a placa produzida fica em cura ao ar por 28 dias (12), onde posteriormente será o preenchimento da porta corta-fogo.

Figura 1 - Passo a passo da construção da placa

6 PRODUÇÃO DA PORTA

Para o processo de confecção do protótipo de porta corta fogo demonstrado abaixo na figura 2, foram utilizadas 3 placas a base da fibra de celulose com o tamanho de 23cm x 12cm x 4cm, cantoneira de perfil C de alumínio e revestido com folha de zinco.

Figura 2 - Produção do protótipo de porta corta-fogo

7 ENSAIO REALIZADO

O ensaio de condutibilidade térmica foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Diretoria Acadêmica da Construção Civil (DIACON) - IFRN/CNAT. O ambiente apresentava uma temperatura média de 26°C, durante o ensaio, devido a climatização artificial. Para executar o ensaio de condutibilidade térmica da porta corta-fogo, construída uma maquete com proporções de 70x47x56cm como demonstra a figura 3, sobre um andor com o lastro a base de madeira para simular um piso de madeira. Os blocos de vedação foram assentados aplicando uma argamassa tradicional de assentamento traço 1:6 (cimento Portland e areia média) e para o fechamento superior da maquete foram utilizadas placas de fibrocimento para simular um telhado. Essas placas foram posicionadas em cima da maquete, onde foi dividida em três partes, as duas placas nas pontas foram assentadas com a mesma argamassa que utilizou nos blocos, e a do meio com argamassa colante para ser retirada posteriormente e utilizada comporta, assim tendo um acesso no interior da maquete, caso existisse a necessidade.

Figura 3 - Maquete. Ensaio térmico

No interior da maquete foi elaborado uma estrutura de sistema elétrico com dois soquetes para duas lâmpadas de 500 watts, um plug macho para tomada e um interruptor. As medições de temperatura dentro e fora da maquete foram realizadas através de um termopar com dois sensores como na figura 4 abaixo, na qual um foi depositado na parte interior da maquete próximo a porta, e o outro instalado na parte externa da maquete no centro do porta fogo junto a uma espuma térmica, onde serve para proteger o termopar externo da temperatura ambiente para apenas captar a temperatura da porta, uma vez que, o resultado seria mais exato.

Figura 4 - Montagem dos sensores

As lâmpadas foram ligadas e as temperaturas interna e externa foram verificadas a cada 15 minutos, no qual deu início às 10 horas e 6 minutos da manhã. O ensaio teve a duração de 4 horas. Segundo a NBR 15220/2022, este ensaio deve ter uma duração de 24 horas, porém devido à indisponibilidade do laboratório, pois existe uma intensa procura por seu uso, o ensaio foi finalizado as 14 horas e 6 minutos. Esse tempo já se tornou suficiente para fazer uma considerável coleta de dados e analisarmos o comportamento do material ensaiado.

8 RESULTADO E DISCUSÕES

De posse das medições das temperaturas internas e externas da porta atingidas durante as 4 horas de ensaio, elaborou-se uma tabela 1, numerada de cada medição com hora, temperatura interna e temperatura externa e uma célula com o somatório da temperatura interna menos a externa e um gráfico 1, onde apresentam os 16 dados retirados durante todo o ensaio, ambos apresentados a seguir.

Tabela 1 – Medição dos sensores

MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO ENSAIO TÉRMICO				
Ensaio realizado no laboratório de materiais de construção da DIACON				
MEDIÇÃO	HORA	T1* (interna)	T2* (externa)	∑ T1-T2
1	10:21	80,6	30,7	49,9
2	10:36	94,6	37,8	56,8
3	10:51	105,6	44,4	61,2
4	11:06	112,8	49,3	63,5
5	11:21	120,2	53	67,2
6	11:36	125,6	55,7	69,9
7	11:51	128,8	57,4	71,4
8	12:06	133,4	58,2	75,2
9	12:21	137,8	59,2	78,6
10	12:36	139,7	59,6	80,1
11	12:51	143,1	60,3	82,8
12	13:06	147,3	61,1	86,2
13	13:21	148,5	61,7	86,8
14	13:36	152,6	62,6	90
15	13:51	153,6	63,9	89,7
16	14:06	156,7	65,7	91

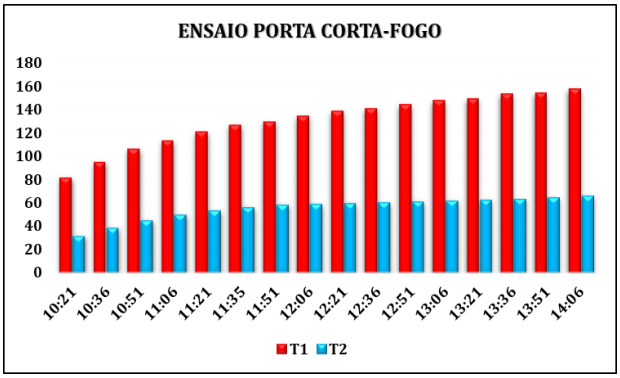


Figura 5 Comportamento da temperatura

Como pode ser analisado na figura 5, a elevação da temperatura na face interior da maquete, onde no início do ensaio a temperatura interna da maquete era de 26,8 ºC e nos primeiros 15 minutos de ensaio, o ambiente fica 80,6 ºC. No mesmo período de observação verifica-se que a elevação da temperatura na parte externa, onde foi de 4,4 ºC, variação muito inferior comparado com a temperatura interna. Na última avaliação de temperatura do ensaio, a maquete apresentava um ambiente interno igual a 156,7ºC e externo de 65,7ºC, uma diferença de 91ºC. Essa diferença de temperatura ocorre por causa que a porta é um excelente bloqueador térmico pois nela está presente uma apenas argamassa desenvolvida a base de celulose extraída dos sacos de cimento, compactados em forma de placas e preenchendo a porta, onde dificulta a dissipação do calor estabelecendo uma barreira de calor entre os dois meios. Essa analise inicialmente satisfatória mesmo sabendo-se que não existe uma temperatura específica para um incêndio em uma edificação, pois ela varia dependendo de vários fatores, desde o tipo de materiais combustíveis empregados entre tantos elementos construtivos, assim como ventilação e os espaços que a envolvem. Tivemos uma barreira inicial que

superou as expectativas da primeira tentativa do projeto de conseguir construir uma porta corta-fogo com um material inovador e de forma que auxiliar em resolver um problema de destinação de resíduo.

9 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica, verificou que a porta corta-fogo contendo fibras de celulose (papel Kraft), apresentou se como uma barreira de calor impedindo a dissipação do interior da maquete para o exterior, o que indica ser um isolante térmico em potencial inovador e viável para projetos industriais e residenciais e cria uma linha de pesquisa que apenas inicialmente foi estudada.

Em virtude dos materiais que estavam disponíveis no momento e foram utilizados para a estrutura da confecção da porta ser uma cantoneira tipo C de alumínio e as placas que a fechavam ser de zinco, que possuem uma grande absorção de calor, continuaremos a procurar outros materiais para executar uma porta de excelência como um todo, sendo essa o primeiro protótipo de porta corta-fogo já tivemos um resultado satisfatório, o que confere resultados e dados para se continuar a pesquisa. Incialmente achamos uma possibilidade de produto que ainda precisa de vários ensaios e estudos até a sua finalização como a determinação de propriedades termofísicas, descrição de transferência de calor, resistência e transmitância térmica com detalhados métodos de cálculo.

Contudo o objetivo de produzir portas corta-fogo sustentáveis utilizando como preenchimento placas a base de celulose (papel Kraft múltiplas folhas) extraídos de saco de cimento, contribui de forma positiva para a redução do descarte inadequado. Utilizando os conhecimentos da engenharia civil em várias disciplinas para tornar uma alternativa que coincide com os pilares da sustentabilidade socialmente responsável, ambientalmente correto e economicamente viável. Dessa forma se mostrou resultados satisfatórios e promissor para futuros estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os amigos que colaboraram direta ou indiretamente com atenção e disponibilidade, ao L.A.S.E.M (Laboratório de Sistemas Estruturais e Métodos), a instituição IFRN-CNAT (Instituto federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – Campus Natal – Central), a DIACON (Diretoria Acadêmica de Construção) pelo apoio do corpo docente e pelas instalações dos laboratórios, equipamentos e materiais a DIPEQ/CNAT (A Diretoria de Pesquisa e Inovação do Campus Natal Central) pelo incentivo e apoio para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11742: Porta corta-fogo para saída de emergência.** Rio de Janeiro, 2003

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. **Instrução Técnica 11 - Saída de Emergência.** Rio Grande do Norte, 2018.

FONSECA, Juliana M. M. da Fonseca. **Estudo da adição de silicato de sódio alcalino em componentes cimentícios.** 2021. 05 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2021.

MENEZES, J N; MACEDO, A. R. B; MORAES, M. L. V. FORMULAÇÃO, MODULAÇÃO E FABRICAÇÃO DE PLACAS DE FORRO, UTILIZANDO RESÍDUO DE CELULOSE, PROVENIENTE DA CADEIA PRODUTIVA DA

CONSTRUÇÃO CIVIL COM BAIXO TEOR DE CIMENTO. **Anais da I Semana de Ciência, Tecnologia e Extensão do IFRN**, Santa Cruz-RN, v.1, n.1,p.2045-2050, dez/2015. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1558>. Acesso em: 15 jul. 2015.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS MITIGADORES DE RETRAÇÃO PLÁSTICA E SEU EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Alice Pochyly[a]; João Armando[b]; Mara Pereira[c]; Arthur Silva[d]; Valdirene Capuzzo[e]

Graduando na Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília-DF, Brasil, [a]alicepochyly@gmail.com, [b]jope.armando@gmail.com

Pós-graduando na Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília-DF, Brasil, [c]maramonaliza19@gmail.com, [d]eng.aviz@gmail.com

[e]Docente na Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília-DF, Brasil, valdirenemaria@unb.br

RESUMO

O concreto é amplamente usado na construção civil devido a sua versatilidade, resistência e custo acessível. No entanto, a retração durante o processo de endurecimento pode causar fissuras, comprometendo sua durabilidade e resistência final. Nesse contexto, o presente artigo teve como objetivo analisar o comportamento desse material considerando a influência do aditivo redutor de retração (ARR), polímero superabsorvente (SAP) e o superplastificante nas propriedades dos estados fresco e endurecido. Produziu-se quatro traços: um sem adições, um com ARR, um com SAP, e um com superplastificante. Verificou-se as propriedades no estado fresco e as propriedades mecânicas do concreto. Os ensaios realizados demonstraram a eficácia evidente das adições, tanto do ARR e do superplastificante, quanto do SAP, no combate à retração quando comparados ao traço de referência uma vez que não apresentaram fissuração. Entretanto, observou-se que o incremento do polímero superabsorvente reduziu a resistência à compressão e à tração nas idades analisadas, afetando significativamente apenas a resistência à compressão. Em suma, este estudo não apenas destaca a importância de compreender e abordar a retração no concreto, mas também ressalta a contribuição significativa dos aditivos como ferramentas essenciais na busca por materiais mais duráveis e resilientes na construção civil.

Palavras-chave: Retração plástica, aditivo redutor de retração, concreto, polímero superabsorvente, propriedades mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das práticas mais antigas da humanidade, remontando aos tempos pré-históricos, quando as primeiras edificações eram erguidas utilizando materiais naturais, como pedra, argila e madeira. Ao longo dos séculos, avanços técnicos e o aprimoramento de tecnologias possibilitaram a construção de estruturas cada vez mais amplas e sofisticadas.

O concreto é uma dessas tecnologias. Amplamente utilizado no âmbito da construção civil, esse material consiste na mistura de cimento, água, agregados (como areia e brita) e, em alguns casos, aditivos que juntos formam uma mistura que pode ser moldada em praticamente qualquer forma antes de endurecer. No entanto, em algumas ocasiões, durante o processo de endurecimento, acontece a fissuração das peças de concreto. Esse efeito é uma consequência da movimentação da água no interior do próprio material e desse para o exterior, em processos de exsudação e evaporação ou de ambas as formas, atuando conjuntamente (Recena, F. 2014). O aparecimento de fissuras, resultado da retração, é influenciado por vários fatores, dentre eles, a velocidade de retração, a rigidez do material e o nível de confinamento da peça (Rato, V. 2006). O processo de deformação plástica de materiais cimentícios pode ser separado em duas fases bem definidas. Primeiramente, o material se deposita de modo que água do traço tender a ir para superfície, esse é o assentamento plástico (Shi, Zhang, Li, Chong, Xie 2016). Em seguida, a água do processo de exsudação começa a evaporar, criando meniscos de água entre as partículas sólidas causando um acúmulo de pressão capilar, assim, se iniciam os processos de retração plástica (Etxeberría, Vazquez, Marí, Barra 2007). Caso esse acúmulo de pressões atinja um nível crítico, ocorre a fissuração da peça.

A fissuração precoce tem altas chances de gerar um impacto permanente nas características mecânicas de uma estrutura de concreto (Etxeberria, Vázquez, Marí, Barra 2007). Além disso, essas fissuras podem aumentar durante o processo de endurecimento desse concreto, permitindo a entrada de agentes agressivos, podendo ocasionar um processo de corrosão da estrutura metálica embutida e degradação precoce do componente estrutural (Bayasi, McIntyre 2002; Swaddiwudhipong, Lu, Wee 2003).

O uso de aditivos para o controle da retração em peças de cimento é algo extensivamente retratado na literatura. O SAP para tecnologia do concreto foi desenvolvido com foco de agir na cura interna para mitigar a retração autógena em concretos de alta resistência (Friedrich, 2012). Esse material apresenta elevada absorção de água, a qual posteriormente é devolvida à matriz cimentícia, favorecendo a realimentação de água na estrutura porosa. O aditivo redutor de retração é um componente químico adicionado ao concreto para minimizar a quantidade de retração que ocorre à medida que o concreto endurece e seca. Esse aditivo atua de diversas formas, controlando a evaporação de água, modificando as tensões internas, melhorando a coesão da matriz cimentícia. O aditivo superplastificante é uma substância química adicionada ao concreto com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade da mistura sem aumentar o teor água/cimento da mistura, contribuindo para a manutenção das propriedades mecânicas do traço.

Desse modo, o presente artigo visa comparar as três adições: o aditivo redutor de retração (ARR), o superabsorvente (SAP) e o aditivo superplastificante, tanto na capacidade de avaliar a retração plástica em uma peça controlada de concreto, quanto nas propriedades mecânicas do concreto. É importante notar que o SAP é usado para mitigar a retração autógena, e que nesse trabalho avaliou-se a sua influência na retração plástica.

2 METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV - ARI, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018). Atualmente, esse tipo de cimento possui um dos maiores teores de clínquer disponíveis no mercado e, portanto, tem uma influência mínima de materiais cimentícios suplementares na mistura. A caracterização do aglomerante está apresentada no Quadro 1. A caracterização química foi obtida através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), utilizando um instrumento EX 720 da marca Shimadzu.

Quadro 1 - Caracterização física e química do cimento Portland.

Propriedades		Resultados Mínimos	CPV - ARI	Método de Teste
Tempo de Pega Inicial (min)		≥ 60	140	ABNT NBR 16607 (2018)
Tempo de Pega Final (min)		≤ 600	180	
Massa Específica (g/cm³)		-	3,10	ABNT NBR 16605 (2017)
Diâmetro abaixo do qual estão 10% das partículas (D10) (µm)		-	1,30	Granulometria a Laser
Diâmetro abaixo do qual estão 50% das partículas (D50) (µm)			13,10	
Diâmetro abaixo do qual estão 90% das partículas (D90) (µm)			31,76	
Resistência à Compressão (MPa))	1 dia	≥ 14	21,5	ABNT NBR 7215 (2019)
	3 dias	≥ 24	39,3	
	7 dias	≥ 34	44,4	
Composição Química em Óxidos (%)	SiO_2	-	15,76	Fluorescência de Raios-X (FRX)
	CaO	-	71,01	
	MgO		-	
	Al_2O_3	-	3,62	
	Fe_2O_3	-	2,84	
	K_2O	-	1,16	
	TiO_2	-	0,34	
	ZnO	-	0,01	
	SO_3	≤ 4.5%	4,40	
	MnO	≤ 6.5 %	0,11	
Perda ao fogo (%)		≤ 6.5 %	6,12	

2.1.2 Agregado miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado na presente pesquisa foi a areia lavada de rio, à base de quartzo, e extraída do Rio Corumbá, na região de Brasília, no Distrito Federal. A caracterização do agregado miúdo mostrou uma massa específica igual a 2,65 g/cm³ e módulo de finura de 2,36. O agregado graúdo escolhido foi obtido a partir da britagem de rochas calcíticas de calcário, com dimensão máxima de 19 mm. Os testes de caracterização para o agregado graúdo mostraram uma massa específica igual a 2,71g/cm³ e um módulo de finura igual a 3,31.

2.1.3 Aditivos

Em busca do principal objetivo da pesquisa, foram utilizados três aditivos: o aditivo redutor de retração, o superplastificante e o polímero superabsorvente. O aditivo redutor de retração (ARR) utilizado, de nome comercial "Eclipse", foi produzido pela Grace Brasil. De acordo com o fabricante, o ARR utilizado é de base química glicol, não contém água, porém em doses elevadas seu volume deverá ser considerado no ajuste da água final, e sua massa específica é de 0,91 g/cm³. O aditivo superplastificante utilizado foi o Master Glenium 51, da marca Master Builders Solutions. Esse aditivo é um aditivo redutor de água tipo 2 (hiper plastificante), de pega normal, líquido e livre de cloretos. É feito à base de éter policarboxílico modificado, que possui como mecanismo de atuação reduzir consideravelmente a água necessária para dosagem do concreto, e é considerado de terceira geração. Conforme o fabricante, esse material possui uma aparência líquida branca turva, uma densidade variando de 1,067 a 1,107 g/cm³, com um pH variando de 5 a 7, um teor de sólidos igual a 28,5 a 31,5 %, e uma viscosidade menor que 150 cps. Por fim, utilizou-se também o SAP, que foi desenvolvido e fornecido pelo Professor e pesquisador Ole Mejlhede Jense, da Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). É um material do tipo ácido acrílico/acrilamida, com ligações cruzadas covalentes. Esse material foi utilizado em pó, com características secas, de coloração branca, e possui um teor de absorção igual a 18g/g. Além disso, suas partículas são esféricas e foi desenvolvido especialmente para a utilização em ambiente alcalino elevado.

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL

O método de dosagem utilizado para a produção do concreto analisado foi o chamado Método Helene & Terzian (1993). Esse método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca, através de um traço intermediário dos demais materiais previstos. Além disso, a mistura foi realizada com o objetivo de obter uma consistência no valor de 120 ± 20 mm, como representado na Figura 1.

Figura 1 - Representação do ensaio do abatimento do tronco de cone realizado nas misturas.

Para tal metodologia, realizou-se quatro misturas, utilizando um teor de argamassa fixo igual a 54% e os traços estão representados no Quadro 2.

Quadro 2 – Dosagem das misturas realizadas no estudo.

Misturas	Materiais (g/m³)						
	Cimento	Areia	Brita	Água	Superplastificante	ARR	SAP
REF	1000	2240	2760	600	0	0	0
SUP	1000	2240	2760	500	2,94	0	0
ARR	1000	2240	2760	580	0	20	0
SAP	1000	2240	2760	663	0	0	3,50

Conforme indicado no Quadro 2, para as misturas REF, utilizou-se uma relação água/cimento (a/c) igual a 0,6, enquanto que a mistura ARR utilizou-se uma relação a/c de 0,58 devido ao adito redutor de retração ter sido adicionado em substituição à água, para não ultrapassar o valor da consistência desejada. Já na mistura SUP, avaliou-se a ação do superplastificante com uma relação água/cimento igual a 0,5, com o intuito de reduzir a quantidade de água na mistura sem comprometer o limite estabilidade da consistência. Por fim, na mistura SAP, a ação do polímero superabsorvente em dosagem de 0,35% foi avaliada a partir de um a/c de 0,6 mais 0,945 litros de água extra para que os parâmetros de consistência fossem atingidos. É importante notar que para todas as misturas foi atendido o valor de consistência estabelecido, sendo que para o traço REF foi necessário inserir mais água, já que não se utilizou nenhum tipo de aditivo químico, enquanto o traço SAP foi necessário inserir a água extra devido as características deste material.

2.3 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

2.3.1 Massa específica

A massa específica foi aferida baseando-se na ABNT NBR 13278 (2005), que consiste na medição da massa do concreto e o volume dessa massa necessário para que seja preenchido um recipiente de volume conhecido. Em seguida, calculou-se a razão entre a massa e o volume, obtendo o valor da densidade no estado fresco do material.

2.3.2 Retração plástica

Para a avaliação da retração plástica, foi utilizado um molde de teste específico para a pesquisa, e monitoramento de fissuras por retração plástica do concreto. Conforme estabelecido pela ASTM C1579 (2013), construiu-se um molde de comprimento igual a 600 mm. Figura 2 está representado o molde utilizado.

Figura 2 - Representação do molde utilizado para avaliação da retração plástica

Para auxiliar o desenvolvimento de fissuras associadas à retração plástica utilizou-se um ventilador como estabelecido pela norma. Ajustou-se a velocidade para alcançar a velocidade mínima do vento, sendo controlado a uma velocidade de 4,7 m/s. Dessa forma, facilitou-se a evaporação de água, e consequente formação de fissuras. Além disso, a temperatura e umidade do ambiente foram controladas por meio de um termo-higrômetro digital, como representado na Figura 3.

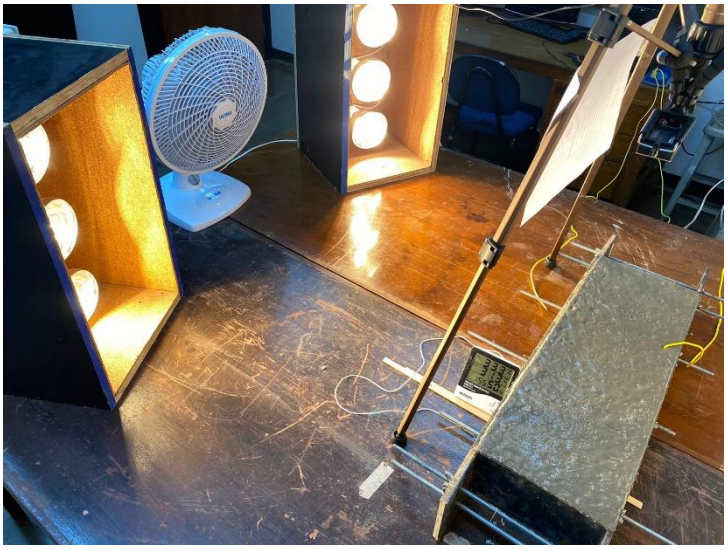


Figura 3 - Representação da experimentação com controle da umidade e temperatura da amostra

2.3.3 Análise das imagens por meio da Avaliação de Superfície

Segundo as diretrizes da ASTM C1579 (2013), é possível empregar uma variedade de ferramentas, como microscópios ópticos portáteis, comparadores de fissuras ou sistema de análise de imagens, para conduzir a análise de fissuras. Com base nesse princípio, adotou-se o método conhecido como Avaliação de Superfície Inteira, uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Esse método implica na avaliação completa da amostra, utilizando documentação fotográfica para capturar uma imagem que represente todo seu aspecto.

O método de Avaliação da Superfície Inteira é uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Essa abordagem permite uma visualização integral das fissuras presentes, possibilitando uma avaliação abrangente de sua distribuição, tamanho e padrões (Palma e Silva, 2022). Ao capturar uma imagem que englobe toda a superfície, essa metodologia facilita a identificação de áreas críticas e a compreensão da extensão de fissuras, o que é essencial para avaliação da integridade do material, nesse caso a amostra de concreto. Além disso, essa técnica oferece a vantagem de ser relativamente rápida e de fácil implementação, sendo interessante para estudos de caracterização de fissuras em diversos contextos.

Nesse estudo, realizou-se a análise de fissuras por meio da captura de fotografias em alta resolução em intervalos de 20 minutos, registrando o comportamento de toda a amostra. Em seguida, analisou-se as imagens por meio do software especializado para dimensionamento e mensuração da área das fissuras, ainda seguindo a ASTM C1579 (2013). O programa utilizado para tal análise foi o Fiji/ImageJ.

As fotografias foram consistentemente capturadas a uma distância fixa de 30 cm da amostra, com o objetivo de melhorar a precisão na avaliação do tamanho das fissuras, tornando-o mais apropriado para análises comparativas. A captura de imagens foi realizada por vinte quatro horas, garantindo a solidificação da amostra. A Figura 4 representa a amostra logo no início do ensaio.

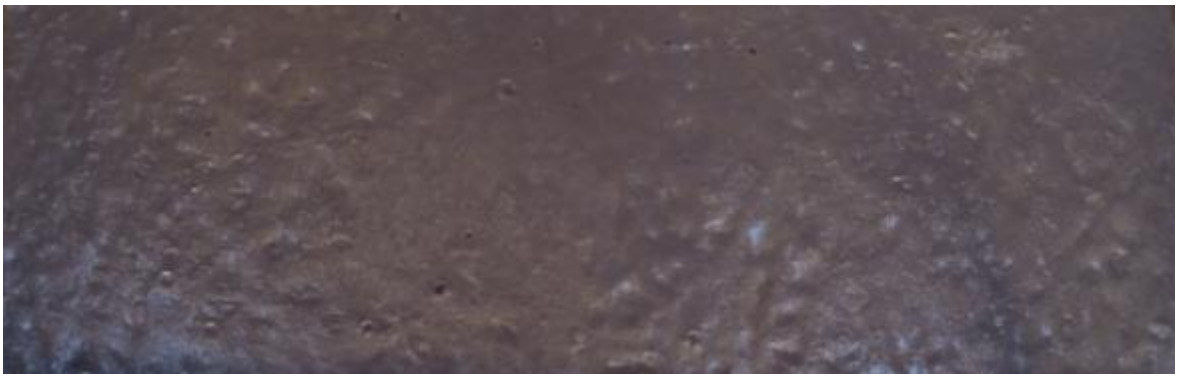


Figura 4 - Representação da superfície da amostra no início do ensaio

Com o objetivo de melhorar a visualização das fotografias realizadas, converteu-se a para 8-bit, retirando a coloração e transformando em preto e branco. Além disso, foi introduzido o filtro de redução de ruído não local nas imagens que está disponível como um plugin do Fiji/ImageJ. Ademais, corrigiu-se a coloração das imagens por meio da correção do histograma, ajustando as faixas de coloração cinza, como representado na Figura 5.

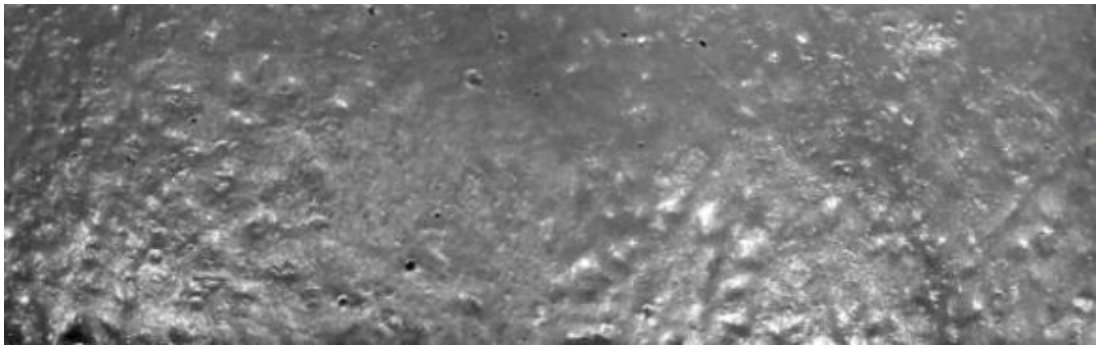


Figura 5 - Representação da amostra de concreto com ajustes nas propriedades da imagem

Para realizar a medição das fissuras, também se utilizou o software Fiji/ImageJ. Realizou-se a segmentação da imagem também por meio do plugin fornecido. Em seguida, com o objetivo de facilitar a identificação e segmentação das fissuras nas imagens, utilizou-se o plugin Trainable Weka Segmentation. Esse plugin combina a segmentação manual com algoritmos. Assim, ele oferece resultados mais precisos para reconhecimento e segmentação de fissuras. Por fim, foi possível uma visualização clara das fissuras formadas ao final do ensaio, como representado na Figura 6.

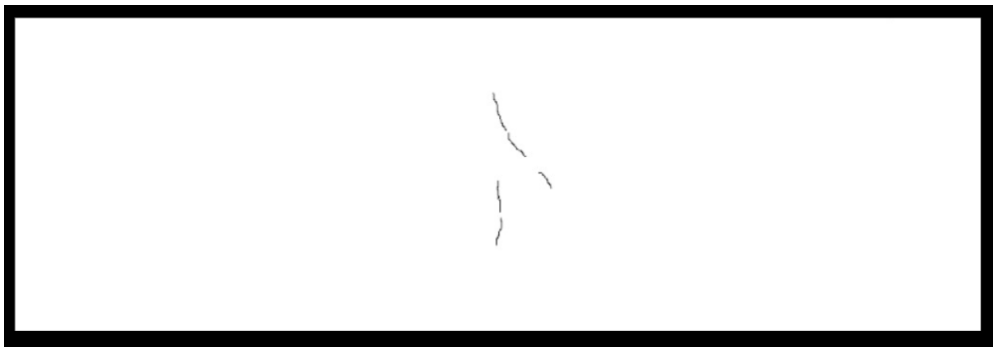


Figura 6 - Representação da fissura na amostra de concreto analisada

Para os resultados da avaliação das fissuras por meio da Avaliação da Superfície Inteira, as fissuras foram quantificadas através da porcentagem da área total da amostra. Em seguida, os percentuais de área fissurada encontrados foram correlacionados com a área total da amostra em milímetros quadrados (mm²). Assim, essa análise garantiu uma escala consistente da evolução e mensuração das fissuras.

2.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Para estudar a influência dos aditivos utilizados nas propriedades mecânicas do concreto, foram realizados os ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias. Para a realização do ensaio, foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensões iguais a 100 x 200 mm, seguindo as diretrizes normativas da ABNT NBR 5739 (2018). Os concretos foram curados em câmara úmida a partir do primeiro dia de desmoldagem até a idade do ensaio.

2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Seguindo as diretrizes da NBR 7222 (2011), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos foi conduzido em conformidade com os procedimentos padronizados após 28 dias de cura. Assim, os corpos de prova foram cuidadosamente posicionados na máquina de ensaio, onde foram aplicadas cargas progressivas de forma uniforme até a fratura.

2.4.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias foi realizado seguindo as prescrições da ABNT NBR 8522 (2008). Os corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm foram submetidos a quatro ciclos de carga e descarga, com uma velocidade controlada de 0,45 ± 0,15 MPa/s. Durante esses ciclos, as deformações foram registradas com extensômetros posicionados em locais opostos. Após a obtenção dessas medidas, os corpos de prova foram novamente carregados até a ruptura, e o módulo de elasticidade foi calculado em GPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

3.1.1 Massa específica

A massa específica foi determinada logo após a confecção dos concretos, em que um recipiente de volume conhecido foi preenchido com duas camadas de concreto, adensadas com vibrador, e em seguida, obteve sua massa registrada. Os resultados da massa específica de cada mistura estão representados na Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados de massa específica para todas as misturas

MISTURA	REF	SUP	ARR	SAP
Massa Específica (g/cm³)	2,39	2,42	2,38	2,33

Observa-se a partir dos resultados que a mistura com o superplastificante apresentou a maior massa específica quando comparado com os demais traços, enquanto a mistura com SAP apresentou a menor

massa específica. No entanto, essa flutuação é esperada em um procedimento experimental, e não foi considerada significativa.

3.1.2 Avaliação da Superfície Inteira

A avaliação da amostra de concreto por Avaliação da Superfície Inteira foi realizada por 24 horas. Observou-se que as misturas ARR, SAP e SUP não apresentaram qualquer fissuração na superfície de concreto, enquanto a mistura sem nenhum tipo de aditivo, a mistura REF, apresentou em sua superfície fissuras localizadas principalmente na região central da amostra. Para facilitar a visualização da evolução da fissuração, realizou-se um gráfico representado na Figura 7, que mostra a porcentagem da área fissurada em relação à área total da superfície do concreto.

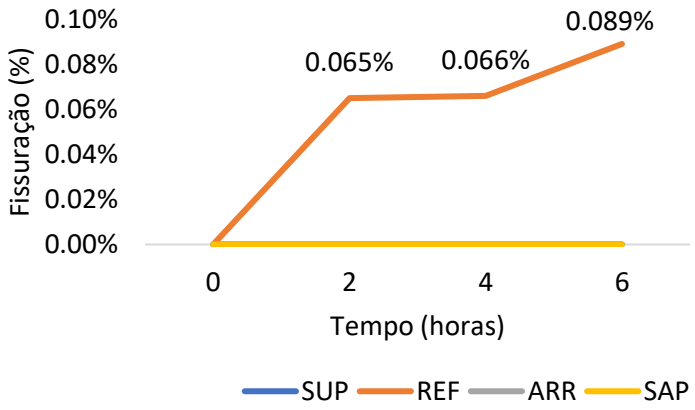


Figura 7 - Representação da evolução da fissuração da mistura REF

Observou-se que a maior evolução das fissuras do traço REF se desenvolveu durante as primeiras duas horas do experimento, passando de uma superfície não fissurada para 0,065% de fissuração, ou seja, com 78,0 mm² de área de fissura. Notou-se ainda uma estabilização das fissuras após as duas horas de duração, que aumentou de 0,065% para 0,066%, ou seja, apenas 1,2 mm² de área em duas horas. E, por fim, com seis horas de experimento apresentou 106,8 mm² de área fissurada. Observou-se que após seis horas de experimento a área fissurada não evoluiu e pode-se inferir que esse tempo representa o tempo de fim de pega do concreto presente na amostra. É importante destacar a eficácia do aditivo redutor de Retração, do superplastificante e do SAP. As misturas que foram adicionadas esses aditivos não apresentaram qualquer sinal de fissuração na superfície das amostras durante a experimentação e o porcentual de fissuração ficou estagnado e igual a zero.

A eficácia do SAP na liberação da água é notável. Durante a experimentação, a mistura que incluiu o SAP mostrou uma melhoria significativa na retenção de água, prevenindo a formação de fissuras mesmo com uma alta relação água/aglomerante. Essa característica dessa adição é crucial, pois permite a manutenção da integridade estrutural do concreto em condições adversas.

A eficiência do ARR foi claramente observada ao longo do experimento, uma vez que a amostra em que foi utilizado não apresentou qualquer sinal de fissuração superficial, destacando sua capacidade de minimizar a retração plástica do concreto.

Para mitigar a retração plástica, a terceira estratégia adotada foi reduzir a relação água/aglomerante e utilizar o superplastificante para compensar a consistência do concreto. Observou-se que o uso dessa

adição não só melhorou a trabalhabilidade do concreto, mas também contribuiu significativamente para a redução do risco de fissuras.

3.2 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 Resistência à compressão simples

Para a avaliação das propriedades mecânicas realizou-se o ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias, e os resultados dos traços avaliados estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Resultados de resistência à compressão de cada mistura

A partir do gráfico representado na Figura 8, observa-se que a presença do aditivo superplastificante aumentou a resistência à compressão, quando comparado aos demais. Quando analisada a resistência a 1 dia e aos 7 dias, os resultados apresentaram a mesma tendência de acréscimo, com valores de 48,1% e 22,4% respectivamente. Aos 28 dias, a mistura em sua presença revelou um acréscimo de 28,9% na resistência a compressão do concreto em relação ao traço de referência. Isso pode ser explicado pela presença do aditivo produzir uma hidratação mais eficaz, sendo possível reduzir a relação água cimento, gerando uma estrutura mais homogênea que produz uma certa melhoria da resistência (Mayta Rojas, 2014).

Ainda com base no gráfico apresentado, observa-se que o ARR causou um decréscimo na resistência à compressão, quando comparado aos demais. Quando analisada a resistência aos 7 dias, o decréscimo de resistência é ainda maior, representando uma perda de 11,6%. Aos 28 dias, enquanto a mistura REF obteve uma resistência de 29,51 MPa, a mistura ARR apresentou resistência de 27,91 MPa, o que representou uma perda de 5,4%. O aditivo redutor de retração tem como seu mecanismo de ação a redução da tensão superficial da água do poro. Conforme Brooks et al. (2020), isto faz com que ocorra um retardo da aglomeração das partículas e, consequentemente, um retardo do desenvolvimento das reações de hidratação. Esse retardo das reações aumenta a porosidade do material, e, consequentemente, provoca a diminuição da resistência mecânica da mistura.

Ao analisar a ação do SAP, observa-se que o traço contendo este material foi o mais prejudicado. Aos 28 dias, a resistência foi medida em 27,08 MPa, representando uma redução de 8,2% em comparação com o traço de referência. Analisando a resistência aos 1 e 7 dias, observou-se uma diminuição de

7,5% e 8,7%, respectivamente. Esses resultados podem ser explicados pela utilização de água extra na mistura realizada.

Dessa forma, o aditivo superplastificante é o mais vantajoso quando se trata da resistência à compressão do concreto. A presença desse aditivo resultou em melhorias significativas na resistência mecânica do material em todos os intervalos de tempo avaliados, bem como no controle completo do aparecimento de fissuras, tanto um quanto o outro podem ser atribuídos ao fato de o aditivo superplastificante possibilitar a redução do teor água/cimento do traço. Por outro lado, tanto o aditivo redutor de retração quanto o polímero superabsorvente apresentaram resultados negativos.

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7222:2011 e os resultados obtidos estão representados na Figura 9.

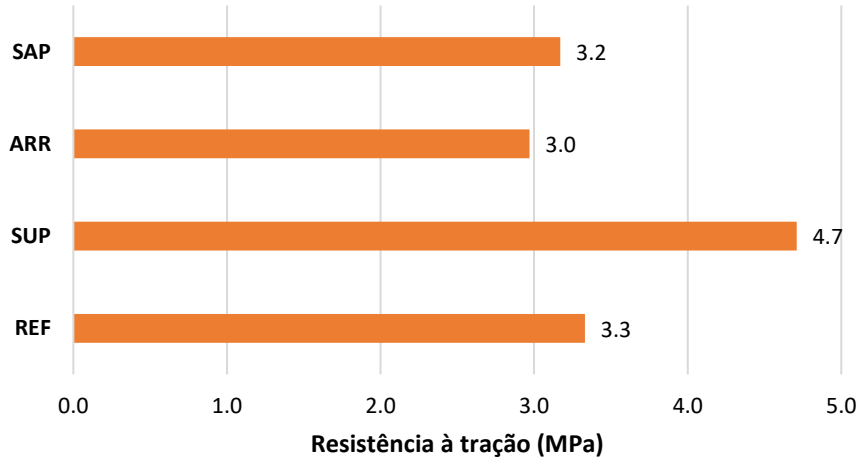


Figura 9 - Resistência à tração por compressão diametral de cada traço de concreto

Baseando-se nos dados obtidos, o traço SUP demonstra um aumento de 42,4% em relação ao traço de referência. Essa tendência de melhoria também se refletiu na resistência à compressão. Por outro lado, o traço ARR exibe uma redução de 9,1% ainda em relação ao traço de referência, sugerindo uma menor resistência, o que também se observou na resistência à compressão, e uma menor capacidade de suportar cargas sem sofrer danos. É importante notar que o traço com a presença do polímero superabsorvente apresenta uma diminuição em aproximadamente 3,0 % em relação ao traço de referência, e essa mesma redução foi observada na resistência à compressão. Dessa forma, infere-se que o aditivo superplastificante foi o que apresentou um melhor resultado em relação aos demais aditivos, tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração.

3.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi avaliado em três corpos de prova na idade de 28 dias e os resultados médios para os quatro traços realizados estão representados Figura 10.

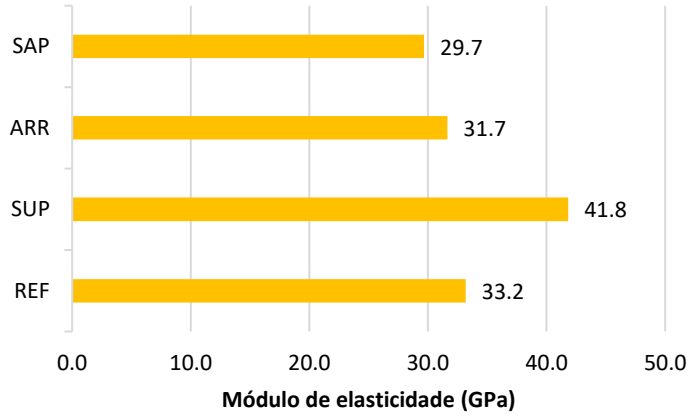


Figura 10 - Módulo de elasticidade de cada mistura realizada

Ao analisar o módulo de elasticidade, observou-se que, da mesma forma que ocorreu com a resistência à compressão, a presença do aditivo superplastificante causou um aumento no módulo de elasticidade. Aos 28 dias, a mistura de referência obteve um módulo de elasticidade de 33,2 GPa, enquanto a mistura com superplastificante alcançou 41,8 GPa, representando um acréscimo de 26,0%. Isso é comparado com um aumento de 28,9% para a resistência à compressão. Embora os valores adicionais às propriedades mecânicas do concreto sejam muito próximos, nota-se que a resistência à compressão apresentou um acréscimo maior.

Verificou-se que, assim como ocorreu na resistência à compressão, a presença do aditivo redutor de retração causou uma diminuição no módulo de elasticidade, porém menos acentuada. Aos 28 dias, a mistura de referência obteve um módulo de elasticidade de 33,2 GPa, enquanto a mistura contendo o redutor de retração igual a 31,2 GPa, representando uma perda de 4,6%. A queda do módulo de elasticidade já era esperada, haja vista que essa propriedade está relacionada com a resistência à compressão do material. Além disso, observa-se que os porcentuais da perda de resistência à compressão e do módulo de elasticidade, 5,4% e 4,6%, respectivamente, estão muito próximas.

Ao analisar os resultados do módulo para o aditivo SAP, observou-se que ele se comportou conforme o esperado, com seu valor também reduzido, e seguindo a mesma tendência da resistência à compressão. Aos 28 dias, a mistura com o SAP obteve um módulo de elasticidade igual a 29,7 GPa, representando uma perda de 10,5%. Além disso, constatou-se que o SAP foi o aditivo que mais impactou negativamente o módulo de elasticidade do material. Kovler e Jensen (2010) colocam que, nas idades precoces, a maioria dos trabalhos relata uma redução no módulo de elasticidade e demais propriedades mecânicas dos materiais contendo esse polímero, fatores estes associados ao aumento da porosidade e umidade. Assim, a porosidade mais acentuada causa uma maior redução no valor do módulo de elasticidade.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos dos ensaios realizados para avaliar as características do concreto no estado fresco e suas propriedades mecânicas, pode-se inferir algumas conclusões importantes. Os resultados obtidos no presente estudo revelam a capacidade significativa de controle da retração plástica dos três aditivos avaliados. A adição do ARR, do SAP e do superplastificante resultaram em uma redução completa da ocorrência de fissuração por retração plástica. No entanto, o impacto gerado pelo ARR e o SAP nas capacidades mecânicas do concreto torna necessária a avaliação das

necessidades de projeto, pois ocorre uma redução significativa nesse aspecto. De modo geral, o aditivo que apresentou a melhor combinação de características, tanto no controle da fissuração quanto nas propriedades mecânicas finais do traço foi o aditivo superplastificante. Com a sua utilização foi possível reduzir a relação água/cimento utilizada obtendo as características desejadas no estado fresco, sem fissuração por retração plástica, e isso gerou um aumento significativo em todas as propriedades mecânicas avaliadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de Brasília (UnB), ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAPDF (CHAMADA 03/2024 – FAPDF PARTICIPA).

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13278:2014 - Argamassa - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR 7215: Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. NBR 16607; Cimento Portland—Determinação dos Tempos de Pega. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR NM 53: Coarse aggregate – determination of the bulk specific gravity, apparent specific gravity and water absorption (in Portuguese), Rio de Janeiro, 2009.

Andrade, J. A. G. 2023. Determinação da influência de dois fatores na resistência do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Paraíba. João Pessoa – PB.

Aboufoul, M.; Garcia, A. 2017. Factors affecting hydraulic conductivity of asphalt mixture. Materials and Structures, 50. Shirazian, S., Ghayamghmian, M.R., and Nouri, G.R., 2011, “Developing of

ASTM C 1579. 2013. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fibre Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). West Conshohocken: ASTM International.

D. Ravina, R. Shalon. 1968. Plastic shrinkage cracking, ACI J. 65 (4) 282–294.

E. Roziere, R. Cortas, A. Loukili. 2015. Tensile behaviour of early age concrete: new methods of investigation, Cem. Concr. Compos. 55, 153–161.

Etxeberría, M.; Vazquez, E.; Marí, A. 2006. Microestructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. Magazine of Concrete Research. v. 58.

Etxeberría, M. Vazquez, E.; Marí, A.; Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research, v. 37.

Friedrich, S. Superabsorbent Polymers (SAP). In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 3, 2012.

Helene, P.; Terzian, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo, p. 349, 1993.

Kovler, K.; Jensen, O. M. Internal curing of concrete: state of the art report of RILEM Technical committee TC 196-ICC. Springer. ed. [S.l.]: RILEM, v. 41, 2007.ou, S. C.; Poon, C. S. 2010. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 32.

Kou, S. C.; Poon, C. S. 2010. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 32.

Kou, S. C.; Poon, C. S. 2010. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 32.

Mayta Rojas, J. W. 2014. Influencia del aditivo superplastificante en el tempo de fraguado, trabajabilidad y resistencia mecânica del concreto, el la ciudad de Huancayo. Huncayo – Perú.

Palma e Silva, A. A. (2022). Microconcretos de alta resistência contendo polímero superabsorvente e metacaulim, Publicação E.DM – 01A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.

R. Landgren. 1964. Water–vapor adsorption–desorption characteristics of selected lightweight concrete aggregates, in: Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1964, pp. 830–845.

Rato, V. 2006. Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.

Ravina, D., Shalon, R. 1968. Plastic shrinkage cracking, ACI J. 65 (4) 282–294.

Silva, A., Neves, R., De Brito, J. (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 50:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

Schmidt, Jéssica. Estudo comparativo das resistências mecânicas do concreto de alta resistência inicial com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2016.

Shi C.; Li Y.; Zhang J.; Li W.; Chong L.; Xie Z. 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. Journal of Cleaner Production, v. 112.

Swaddiwudhipong, H.R. Lu, T.H. Wee. 2003. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, Cem. Concr. Res. 33 (12) 2077–2084.

Z. Bayasi, M. McIntyre, Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, ACI Mater. J. 99 (4) (2002) 337–344.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA NA ABSORÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Marcelo Miranda Farias [a,b*]; Eduardo Pereira [a]; Marcelo Henrique Farias de Medeiros [b]

[a*] (Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, CEP 84030-900, Ponta Grossa, Brasil), mirandafariasmarcelo@gmail.com

[b] (Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, CEP 81530-000, Curitiba, Brasil)

RESUMO

A absorção dos materiais cimentícios está diretamente relacionada com a sua durabilidade. Nesse contexto, pesquisadores vêm estudando adições que possam reduzir a absorção e a permeabilidade de materiais como argamassas e concretos, como é o caso da celulose nanofibrilada (CNF). O objetivo desta pesquisa foi avaliar como a adição de CNF influencia na absorção de argamassas de cimento Portland curadas por 30 e 60 dias, assim como sua influência na resistência mecânica desses materiais. Para entender esse comportamento, foram preparados corpos de prova com adições de 0%, 0,05%, 0,10% e 0,15% de CNF em relação à massa de cimento, mantendo-se, para todas as argamassas, a mesma consistência. Nas argamassas foram realizados ensaios de absorção por capilaridade, por imersão e ensaios de resistência à compressão e tração, conforme as normativas brasileiras. Os ensaios de resistência mecânica mostraram que a CNF não influenciou na resistência à tração e compressão das argamassas. Já os resultados de absorção mostraram que o teor de 0,10% de CNF foi capaz de reduzir em até 29% a absorção por capilaridade das argamassas e em 9% a absorção por imersão, visto que o nanomaterial tem a capacidade de refinar a matriz cimentícia. Assim, concluiu-se que a celulose nanofibrilada pode modificar a estrutura de poros das argamassas, diminuindo sua absorção sem comprometer suas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Celulose nanofibrilada; Absorção; Durabilidade

1 INTRODUÇÃO

Os avanços técnicos e científicos referentes ao estudo da interação de materiais cimentícios com o ambiente no qual esses estão inseridos permitiram um aprofundamento no entendimento de processos que alteram suas propriedades e que, consequentemente, reduzem a durabilidade desses materiais.

A absorção dos materiais é uma das propriedades que está intrinsicamente ligada à durabilidade de materiais à base de cimento Portland. Trabalhos de Elahi *et al.* (2021) e Fode *et al.* (2023) demonstraram como o uso de adições, como a metacaulim, reduzem a absorção de água dos materiais cimentícios e, consequentemente, aumentam a sua durabilidade e resistência à ataques ácidos e aos sulfatos. Nesse contexto, pesquisadores vêm estudando a viabilidade do uso de adições que possam aprimorar as propriedades do concreto, melhorando seu desempenho estrutural e aumentando sua durabilidade. Além da metacaulim, dentre essas adições, pode-se citar também o uso de cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz (Munhoz, 2007; Wang; Wu; Mei, 2019; Endale *et al*., 2022).

Outros materiais que também vêm ganhando destaque são os chamados agentes de cura interna. Esses são materiais pré-umedecidos que, quando utilizados em matrizes cimentícias, funcionam como uma fonte de água extra, possibilitando a formação de cristais em idades posteriores de cura, aumentando, assim, o grau de hidratação do cimento. Esse aumento de grau de hidratação permite a formação de

matrizes mais densas e com menor permeabilidade (Onuaguluchi; Panesar; Sain, 2014; Fu *et al.*, 2017; Kolour *et al.*, 2018). Dentre esses materiais, pode-se citar a celulose nanofibrilada (CNF), que consiste de uma fibra biodegradável, obtida a partir da separação da lignina e da parede celular de materiais lignocelulósicos que, por se apresentar na escala nanométrica, tem alta área superficial e grande potencial como reforço devido às suas propriedades mecânicas (Hassan, 2010).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi analisar a influência da adição de celulose nanofibrilada em argamassas de cimento Portland, verificando mudanças na absorção e nas propriedades mecânicas. Ao analisar esses parâmetros, almeja-se compreender se a CNF é capaz de modificar a microestrutura desses materiais, em especial reduzindo sua absorção. Essa investigação não apenas expandirá o conhecimento sobre os efeitos da CNF em materiais cimentícios, mas também servirá como uma base para estudos subsequentes que visem explorar como essa redução na absorção pode potencialmente melhorar a durabilidade desses materiais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Celulose nanofibrilada

A relação entre a absorção e a durabilidade de materiais cimentícios é crucial para o entendimento da sua performance. A absorção afeta significativamente a durabilidade de materiais à base de cimento, sendo que essa propriedade está diretamente relacionada com fatores como fator água/cimento, inserção de adições e a estrutura de poros (Wang *et al.*, 2022). Vale ressaltar que a absorção afetará a resistência à compressão, a permeabilidade e em mecanismos de deterioração, como ataque por sulfatos, difusão de íons cloreto e reação álcali-agregado (Zhang; Zong, 2014; Beyene *et al.*, 2017; Fonseka, Nanayakkara, 2022).

Nesse contexto, observa-se a importância do estudo de adições capazes de alterar os mecanismos de transporte no interior de materiais cimentícios. Dentre as adições, pode-se citar materiais como a celulose nanofibrilada. A celulose é usada industrialmente principalmente para a produção de papel, sendo também uma interessante fonte de biocombustíveis e considerada como praticamente uma inesgotável fonte de matéria-prima (Klemm *et al.*, 2005; Lavoratti, 2015).

O uso de materiais nanométricos para a melhoria de propriedades e da durabilidade do concreto vêm se destacando, principalmente quando se refere aos biocompósitos de alta performance denominados nanomateriais celulósicos (Jennings *et al.*, 2008; Sanchez; Sobolev, 2010; Hisseine *et al.*, 2019). O uso desses materiais se destaca pela sua baixa toxicidade e baixos riscos ambientais durante a produção, além de apresentarem baixo custo de produção (Habibi; Dufresne, 2008; Moon *et al.*, 2011). Segundo Kargarzadeh *et al.* (2018), o termo nanocelulose enquadra materiais fibrosos que, em uma de suas direções, tenha entre 1 e 100 nm. Os nanomateriais celulósicos mais comuns são as fibras celulósicas, a celulose nanocristalina e a celulose nanofibrilada, as quais são classificadas de acordo com seus respectivos tamanhos, morfologia e superfície específica (Hisseine *et al.*, 2019).

A celulose nanofibrilada é um nanomaterial obtido por meio de refinamento mecânico e químico da polpa de celulose. Na CNF são observadas porções amorfas, com cristalinidade variando entre 51 e 69% (Moon *et al.*, 2011). Essas nanofibras são flexíveis e formam redes entrelaçadas entre si (Isogai; Saito; Fukuzumi, 2011; Moon *et al.*, 2011; Moon, Schueneman; Simonsen, 2016; Barnat-Hunek *et al.*, 2019), com módulo de elasticidade que pode variar de 65 a 150 GPa (Eichhorn *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2021).

Devido aos processos químicos e mecânicos utilizados durante a produção de CNF, favorece-se a formação de um nanomaterial com alta interatividade química, grande capacidade de se combinar com

a água, com dispersão uniforme e com grande potencial para ser utilizado como reforço em materiais cimentícios (Pei *et al.*, 2013; Jiao *et al.* 2016; Goncalves *et al.*, 2019).

2.3. Celulose nanofibrilada em matrizes cimentícias

De forma geral, a incorporação da CNF em matrizes cimentícias influencia em propriedades como a cinética de hidratação, propriedades reológicas e desempenho mecânico (Hisseine; Omran; Tagnit-Hamou, 2018).

Quando utilizada em argamassas, a celulose nanofibrilada pode influenciar na resistência à flexão e compressão. Conforme o trabalho de Cengiz, Kaya e Bayramgil (2017), a utilização teores da ordem de 1% de CNF em relação à massa de cimento, aumentaram em três vezes a resistência à flexão desses materiais. Esse teor também causou aumentos de resistência à compressão na ordem de 11%, como observado por Peters *et al.* (2010).

Goncalves e colaboradores (2019) observaram que a adição de CNF em até 0,5% em volume também permite melhorias na resistência de argamassas. Para concretos, resultados semelhantes também são observados. No trabalho desenvolvido por Barnat-Hunek *et al.* (2019) foi observado que teores de 0,5% e 1% de CNF em massa de cimento foram promissores como reforço de concretos, sendo observado que o teor de 1% levou a um aumento de 34,5% na resistência à flexão e de 23,3% na resistência à compressão, reduzindo também em 47% a absorção do material. O teor de 0,5% também levou à uma diminuição significativa na absorção do concreto, reduzindo essa em até 26%.

3 DADOS E MÉTODOS

Para que fosse possível compreender os efeitos da CNF na absorção e na resistência mecânica das argamassas, foi elaborado um procedimento experimental que englobasse ensaios de análise de absorção por capilaridade, imersão, assim como ensaios para análise da resistência à compressão e tração. Os materiais e métodos utilizados estão descritos nesta seção.

3.1 MATERIAIS

Como agregado miúdo, utilizou-se agregado com massa específica, absorção de água (NBR NM 16916:2021), massa unitária e índice de vazios (NBR 16972:2021) apresentados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1- Caracterização física e química do agregado

Caracterização física										
Massa específica na condição seca (g/cm³)			Massa específica na condição saturada superfície seca (g/cm³)			Massa unitária (g/cm³)			Absorção de água (%)	
2,61			2,65			1,56			2,16	
Caracterização química por FRX										
CO_2(%)	Na_2O (%)	MgO (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	P_2O_5 (%)	SO_3 (%)	K_2O (%)	CaO (%)	TiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)
3,03	3,25	3,77	14,00	53,90	0,66	0,06	4,45	5,04	1,12	10,4

Utilizou-se como aglomerante o cimento Portland composto por clínquer e fíller carbonático classificado como CPII-F 32 (NBR 16697:2018), equivalente ao cimento CEM II/B-L 32N (EN197-1:2011) e ao cimento tipo GU (ASTM C1157, 2021). A caracterização físico-química do cimento é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física e química do agregado

Chemical tests								
Loss on ignition (%)	CaO (%)	SiO_2 (%)	SO_3 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Equivalent alkalies (%)	Insoluble residue (%)
12.50	72.6	14.1	4.08	3.21	2.79	1.85	0.65	1.41

Physical tests											
Specific Mass g/cm³	Hot Exp. (mm)	Beginning of setting time (h:min)	Ending of setting time (h:min)	Normal Cons. (%)	Blaine (cm²/g)	Retained on #200 (%)	Retained on #325 (%)	1 day (MPa)	3 days (MPa)	7 days (MPa)	28 days (MPa)
2.93	0.61	203	268	26.1	3.388	1.59	9.97	14.4	27.9	32.8	41.1

A celulose nanofibrilada foi obtida através da desfibrilação tipo *grinding* da polpa branqueada de *Eucalyptus sp*. em moinho Masuko Sangyo SuperMassColloider MKCA6-2. Foram realizadas 10 passagens da polpa entre os discos do moinho à uma velocidade de 1500 rpm e uma folga de 0,5 mm, seguindo as experiências prévias do grupo de pesquisa (Franco *et al.*, 2019). Posteriormente à moagem, uma suspensão de NFC com uma concentração de 2% foi obtida, com fibras apresentando um diâmetro médio de 99 ± 49 nm e cristalinidade média de 56%. A Figura 1 mostra a suspensão de CNF obtida após o processo de refinamento. A mesma apresenta consistência de gel e cor esbranquiçada.

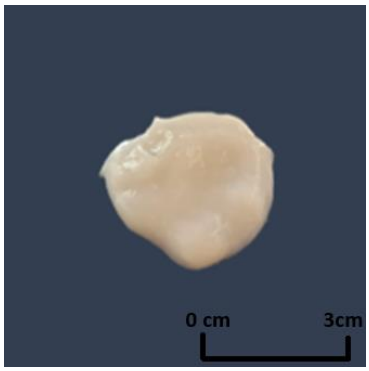


Figura 1 - Suspensão de celulose nanofibrilada

3.2 MISTURA

Visto que a consistência da argamassa afeta diretamente a distribuição de poros, a permeabilidade e a absorção, e que a CNF reduz drasticamente o índice de consistência desses materiais, em um primeiro momento foi realizado um estudo de trabalhabilidade das argamassas. Para esse estudo, foi utilizado um traço único de 1:2,25:0,47. Foi utilizado aditivo superplastificante para que uma mesma consistência fosse mantida para todas as argamassas com diferentes teores de CNF.

As argamassas foram confeccionadas com um abatimento igual (± 5%) ao da argamassa Referência, mesma metodologia proposta por Goncalves e colaboradores (2019). Foi utilizado o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1180 da MC-Bauchemie, o qual, conforme dados do próprio fabricante, apresenta teor de sólidos de 35% e é à base de policarboxilato.

Nessas argamassas foram adicionados teores de CNF de 0%, 0,05%, 0,10% e 0,15% em massa de cimento, as quais foram denominadas, respectivamente, de REF, 0.05CNF, 0.10CNF e 0.15CNF. Esses

teores foram adotados a partir de valores de adição da literatura (Onuaguluchi; Panesar; Sain, 2014; Jiao *et al.*, 2016; Mejdoub *et al.*, 2017).

Como a CNF é um nanomaterial que tende a sofrer processos de aglomeração, foi necessária a realização da dispersão da suspensão na água de amassamento. A suspensão de CNF foi adicionada à água de amassamento das argamassas, e o conjunto foi então levado para agitação em um agitador mecânico de modelo *Ultra Turrax T18 Basic* da marca IKA. A dispersão foi realizada por um período único de 5 minutos, em velocidade de 6000 rpm.

Após esse procedimento, realizou-se a mistura da dispersão com os demais constituintes. A quantidade de água presente na suspensão de CNF e no superplastificante foi descontada da quantidade de água de amassamento, para que assim fosse mantida a relação água/cimento. A mistura da argamassa foi feita seguindo as diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 2019).

A Tabela 3 resume as proporções de cada um dos constituintes utilizados para a confecção das argamassas. Deve-se notar o teor de superplastificante adicionado às argamassas 0.15CNF, que, por apresentarem maior quantidade de CNF, demandaram uma maior adição de aditivo superplastificante para que uma consistência próxima à da argamassa Referência fosse obtida.

Tabela 3 - Proporções dos constituintes das argamassas de cimento

Teor (%)	Cimento (g)	Agregado miúdo (g)	Teor sólido de CNF (g)	Suspensão de CNF (g)	Superplastificante (g)	Água adicionada (g)
REF	1000	2250	0	0	0,5	469,68
0.05CNF	1000	2250	0,5	25	1,5	444,53
0.10CNF	1000	2250	1,0	50	3,5	418,73
0.15CNF	1000	2250	1,5	75	50	364,00

3.3 AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

Para a avaliação física e mecânica das argamassas, procedeu-se a etapa de moldagem de corpos de prova. A moldagem de corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura foi realizada conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). A cura foi feita de forma selada por 30 e 60 dias. O procedimento consiste na selagem do corpo de prova com plástico filme pelo período determinado de cura, conforme proposto por Kolour (2019).

Para a avaliação das mudanças nas resistências, procedeu-se de ensaios de resistência mecânica. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), e resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram utilizados 5 (cinco) corpos de prova de argamassa para cada tipo de determinação, cada teor de CNF e cada tempo de cura. Para o rompimento das amostras, utilizou-se de uma prensa hidraúlica de 100 (cem) toneladas força de capacidade.

Para a avaliação da absorção, realizaram-se ensaios de absorção por capilaridade (ABNT NBR 9779, 2012), e absorção por imersão (ABNT NBR 9778, 2009). Para os ensaios foram utilizados 4 (quatro) corpos de prova para cada tipo de análise (por imersão e por capilaridade).

Por fim, para se compreender os efeitos da adição da CNF no grau de hidratação dos materiais cimentícios aos 30 dias, foram realizados ensaios de termogravimetria em pastas de cimento com o mesmo traço das argamassas, porém sem a adição do agregado miúdo. O ensaio foi realizado em

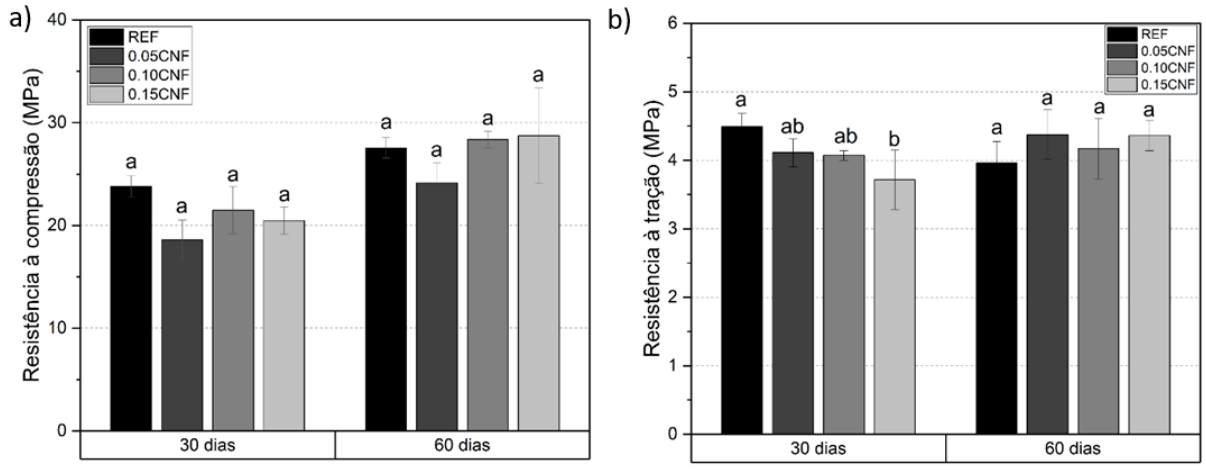
equipamento de modelo SDT 2960 da marca TA Instruments, na qual a amostra em pó (aproximadamente 10 mg) foi aquecida em uma taxa de 10°C/min até uma temperatura final de 1000°C, em uma atmosfera artificial. A partir da análise térmica, foi possível calcular o grau de hidratação (α) das pastas, de acordo com o descrito no trabalho de Wang *et al.* (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2a estão indicadas as resistências à compressão das argamassas após 30 e 60 dias de cura selada. Analizando-se as argamassas com as mesmas idades de cura, independentemente do teor de CNF adicionado, não foram observadas mudanças de resistências à compressão.

Aos 60 dias de cura, ocorre um incremento nas resistências de todas as argamassas, quando comparadas com as argamassas de 30 dias. Os aumentos foram de 15,6%, 29,6%, 32,5% e 40% para as argamassas REF, 0.05CNF, 0.10CNF e 0.15CNF, respectivamente. Esse aumento de resistência está relacionado com a continuidade do processo de hidratação do cimento, já que o aumento também é notado nas argamassas Referência.

Por outro lado, a partir das porcentagens apresentadas, pode-se verificar um aumento mais expressivo de resistência para as argamassas com CNF em sua composição. Isso pode estar relacionado com um possível aumento do grau de hidratação das argamassas aos 60 dias de cura, proporcionado pela presença da CNF. Esse mesmo mecanismo foi observado por Mejdoub *et al.* (2017) e Santos *et al.* (2021). Segundo os autores, o aumento do grau de hidratação está ligado com a capacidade da CNF em aumentar a quantidade de água quimicamente ligada, produzindo assim mais portlandita, etringita e C-S-H.



Nota: médias seguidas de mesma letra não diferem no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Figura 2 – a) Resistência à compressão; b) Resistência à tração: argamassas curadas por 30 e 60 dias

Desse modo, observa-se que argamassas com CNF, aos 60 dias, proporcionam um maior aumento relativo de resistência à compressão que a argamassa REF, quando comparados às argamassa de 30 dias. Apesar disso, mesmo com esse aumento, a resistência à compressão final atingida não difere entre argamassas com e sem celulose nanofibrilada em sua composição.

Na Figura 2b estão representadas as resistências à tração por compressão diametral das argamassas curadas por 30 e 60 dias. Observa-se que diferenças estatísticas estão presentes apenas nas argamassas curadas por 30 dias. As argamassas 0.05CNF e 0.10CNF não apresentaram mudanças de

resistência à tração. Por outro lado, as argamassas com 0.15% de CNF em sua composição apresentaram reduções da ordem de 17,2%.

Na Figura 3 é demonstrado o grau de hidratação (α) das pastas curadas por 30 dias, obtido por meio de ensaio de termogravimetria. Pode-se observar que o grau de hidratação das pastas Referência, 0.05CNF e 0.10CNF se mantiveram próximos, num valor médio de 54%. Por outro lado, as pastas 0.15CNF apresentaram uma redução de 20% no grau de hidratação, porcentagem próxima da redução de 17,2% observada para as resistências à tração. Nesse contexto, fica evidente que a redução de resistência está relacionada com o elevado teor de superplastificante adicionado às pastas com 0,15% de CNF, conforme discutido no item 3.2 metodologia.

Isso ocorre porque os superplastificantes à base de policarboxilato são adsorvidos na superfície das partículas de cimento, mecanismo que dificulta a dissolução da alita e do C_3A. Este processo pode ocorrer tanto através de um processo de adsorção quanto através do consumo de íons Ca^{2+} da solução dos poros. Assim, o aditivo acaba por afetar a cinética de hidratação do cimento (Jansen et al., 2012). O aditivo superplastificante também pode afetar o processo de endurecimento da matriz cimentícia. Segundo Mollah *et al.* (2000), a interação do superplastificante com o Ca^{2+} pode formar filmes de hidrocarbonetos que afetam o processo de cristalização durante o endurecimento do material cimentício. Além disso, devido à baixa concentração de cálcio na solução, pode também interferir na nucleação da portlandita ($Ca(OH)_2$).

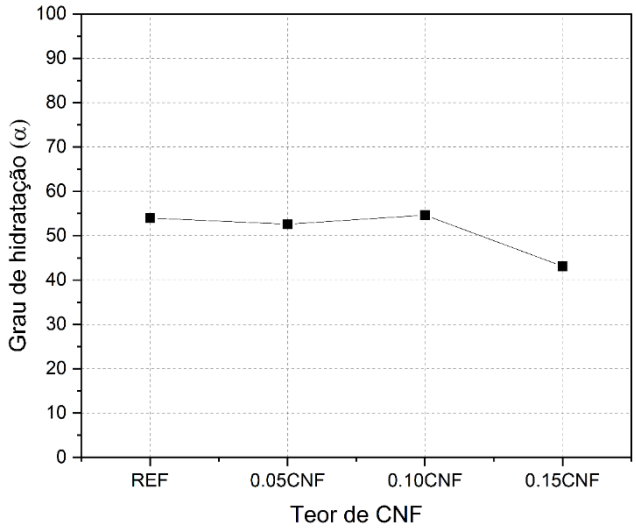


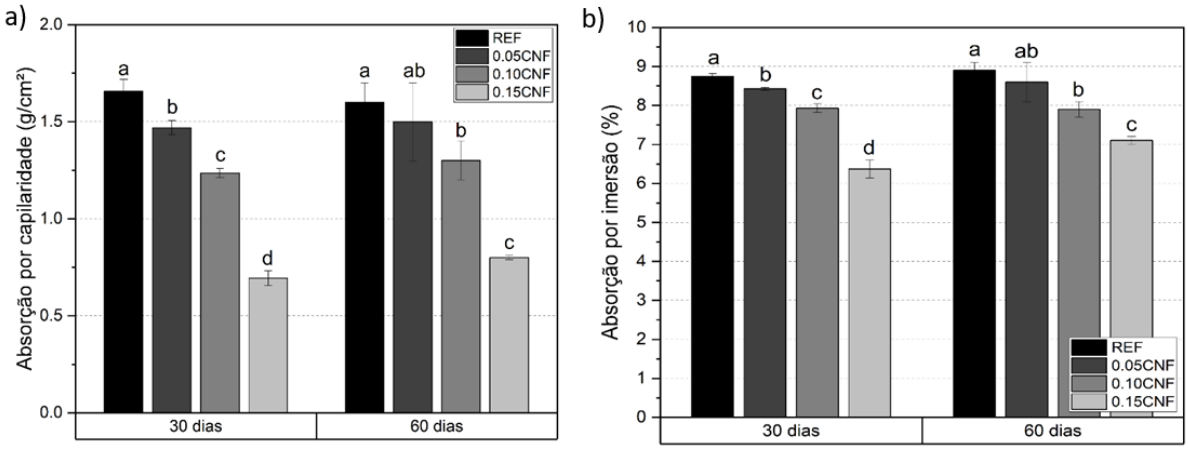
Figura 3 - Grau de hidratação das diferentes pastas obtido por meio do ensaio de termogravimetria

Ao mesmo tempo, nota-se, na Figura 2b que, aos 30 e 60 dias de cura, a CNF não foi capaz de alterar a resistência à tração das argamassas, quando adicionada até um teor que não demandasse elevada inclusão de superplastificante na mistura. Assim, conclui-se que a CNF não tem capacidade de alterar a resistência mecânica das argamassas, porém pode influenciar no grau de hidratação da pasta que envolve o agregado miúdo.

A Figura 4a ilustra a absorção capilar para as diferentes argamassas nos diferentes tempos de cura selada. Comparando os valores de absorção nos diferentes tratamentos, fica evidente que o aumento do tempo de hidratação não resultou em alterações na absorção por capilaridade. Pode-se observar, porém, uma clara tendência de redução de absorção com o aumento do teor de CNF nas argamassas. Essa tendência pôde ser observada em ambos os tempos de cura, de 30 e 60 dias. Aos 30 dias, as

argamassas com 0.10% de CNF obtiveram redução de 29% na absorção por capilaridade. Já aos 60 dias, essa redução passou para 19%.

Esse fenômeno de absorção reduzida pode estar relacionado à capacidade da CNF em refinar a matriz cimentícia, conforme também observado no trabalho de Goncalves *et al.* (2019). Esse efeito acaba sendo evidente para as argamassas devido à dispersão das nanofibras causadas pela presença dos agregados miúdos que, durante o processo de mistura, aumentam as forças de cisalhamento no interior da argamassa, levando à uma melhor dispersão e mesclagem das fibras, assim como uma maior homogeneidade da matriz. Esses eventos também foram descritos nos trabalhos de Hisseine, Omran e Tagnit-Hamou (2018) e Balea *et al.* (2019).



Nota: médias seguidas de mesma letra não diferem no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Figura 4 – a) Absorção por capilaridade; b) Absorção por imersão: argamassas curadas por 30 e 60 dias

A Figura 4b demonstra como a absorção por imersão se alterou com a adição de CNF e com o tempo de cura das argamassas. Aos 30 dias, as argamassas 0.10CNF apresentaram redução de 9% na absorção, quando comparadas às argamassas Referência. Essa redução passou a ser de 11% aos 60 dias. É possível também concluir que a tendência é a mesma observada para as absorções por capilaridade.

Assim, a adição de CNF às argamassas influencia o grau de hidratação e a absorção de água dos materiais, mas não demonstra um efeito consistente na resistência à compressão e tração, sugerindo que seu principal benefício pode estar relacionado à melhoria da matriz cimentícia e à redução da absorção de água sem, no entanto, alterar as resistências mecânicas. A redução da absorção de água em argamassas pode desempenhar um papel crucial na melhoria da durabilidade desses materiais. Essa relação entre absorção e aumento de durabilidade já foi constatado em trabalhos de diversos autores, como Mehta e Monteiro (2008), Beyene *et al.* (2017) e Goncalves *et al.* (2019). Essa redução está intimamente ligada à diminuição da permeabilidade da matriz cimentícia, o que, por sua vez, pode ter um impacto significativo em mecanismos de degradação, como a reação álcali-agregado (RAA) e o ataque por sulfatos (ISA).

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentados, as seguintes conclusões podem ser resumidas sobre as alterações causadas pela adição da celulose nanofibrilada em argamassas de cimento Portland:

- A adição de CNF, independentemente do teor, não é capaz de alterar a resistência à compressão e à tração das argamassas;
- A presença de elevados teores de aditivo superplastificante afeta a resistência à tração das argamassas aos 30 dias de cura. Esse fenômeno ocorre porque o superplastificante afeta diretamente a hidratação inicial do cimento e o seu processo de endurecimento;
- A CNF reduz a absorção por imersão e por capilaridade das argamassas. Isso ocorre nas argamassas por causa do refinamento dos poros pela presença das nanofibras.

Com base nas conclusões apresentadas, evidencia-se a redução significativa na absorção de água das argamassas com a adição de celulose nanofibrilada (CNF). Essa redução abre caminho para estudos mais aprofundados sobre a influência da CNF na durabilidade dos materiais cimentícios. Considerando que a absorção de água está diretamente relacionada à permeabilidade da matriz cimentícia e, por consequência, à sua durabilidade, tais estudos podem fornecer insights valiosos para o desenvolvimento de técnicas construtivas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1157-08:2021 – Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972 – Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 16916 – Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Balea, A., Fuente, E., Blanco, A. and Negro, C. (2019). Nanocelluloses: Natural-Based Materials for Fiber-Reinforced Cement Composites. A Critical Review. Polymers, 11(3):518. https://doi.org/10.3390/polym11030518.

Barnat-Hunek, D., Szymańska-Chargot, M., Jarosz-Hadam, M. and Łagód, G. (2019). Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete. Construction and Building Materials, 223:1–11. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145.

Beyene, M.A., Munoz, J.F., Meininger, R.C. and Di Bella, C. (2017). Effect of Internal Curing as Mitigation to Minimize Alkali-Silica Reaction Damage. ACI Materials Journal, 114(3). doi:https://doi.org/10.14359/51689562.

Cengiz, A., Kaya, M. and Pekel Bayramgil, N. (2017). Flexural stress enhancement of concrete by incorporation of algal cellulose nanofibers. Construction and Building Materials, 149:289–295. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.104.

Eichhorn, S.J., Dufresne, A., Aranguren, M., Marcovich, N.E., Capadona, J.R., Rowan, S.J., Weder, C., Thielemans, W., Roman, M., Renneckar, S., Gindl, W., Veigel, S., Keckes, J., Yano, H., Abe, K., Nogi, M., Nakagaito, A.N., Mangalam, A., Simonsen, J. and Benight, A.S. (2010). Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. Journal of Materials Science, 45(1):1–33. https://doi.org/10.1007/s10853-009-3874-0.

Elahi, M.M.A., Shearer, C.R., Naser Rashid Reza, A., Saha, A.K., Khan, M.N.N., Hossain, M.M. and Sarker, P.K. (2021). Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. Construction and Building Materials, 281:122628. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628.

Endale, S.A., Taffese, W.Z., Vo, D.-H. and Yehualaw, M.D. (2022). Rice Husk Ash in Concrete. Sustainability, 15(1):137. https://doi.org/10.3390/su15010137.

European Standard EN197-1:2011 – Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

Fode, T.A., Jande, Y.A.C. and Kivevele, T. (2023). Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite – Comprehensive review. Heliyon, 9(7):e17924. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17924.

Franco, T.S., Potulski, D.C., Viana, L.C., Forville, E., de Andrade, A.S. and de Muniz, G.I.B. (2019). Nanocellulose obtained from residues of peach palm extraction (Bactris gasipaes). Carbohydrate Polymers, [online] 218:8–19. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.035.

Fu, T., Moon, R.J., Zavattieri, P., Youngblood, J. and Weiss, W.J. (2017). Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials. Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites, 455–482. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100957-4.00020-6.

Goncalves, J. R. A. Effect of Cellulose Nanofibrils on Some Common Durability Issues of Cement-Based Systems. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural) – University of Alberta, Alberta, 2019.

Goncalves, J., El-Bakkari, M., Boluk, Y. and Bindiganavile, V. (2019). Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems. Cement and Concrete Composites, [online] 99:100–111. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005.

Habibi, Y. and Dufresne, A. (2008). Highly Filled Bionanocomposites from Functionalized Polysaccharide Nanocrystals. Biomacromolecules, 9(7):1974–1980. https://doi.org/10.1021/bm8001717.

Hassan, M.L., Mathew, A.P., Hassan, E.A., El-Wakil, N.A. and Oksman, K. (2010). Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties. Wood Science and Technology, 46(1-3):193–205. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0373-z.

Hisseine, O.A., Omran, A. and Tagnit-Hamou, A. (2018). Influence of Cellulose Filaments on Cement Paste and Concrete. 30(6). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002287.

Hisseine, O.A., Wilson, W., Sorelli, L., Tolnai, B. and Tagnit-Hamou, A. (2019). Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. Construction and Building Materials, 206:84–96. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042.

Isogai, A., Saito, T. and Fukuzumi, H. (2011). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. Nanoscale, 3(1):71–85. https://doi.org/10.1039/c0nr00583e.

Jennings, H.M., Bullard, J.W., Thomas, J.J., Andrade, J.E., Chen, J.J. and Scherer, G.W. (2008). Characterization and Modeling of Pores and Surfaces in Cement Paste. Journal of Advanced Concrete Technology, 6(1):5–29. https://doi.org/10.3151/jact.6.5.

Jiao, L., Su, M., Chen, L., Wang, Y., Zhu, H. and Dai, H. (2016). Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement. PLOS ONE, 11(12):0168422. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168422.

Kargarzadeh, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J. and Lin, N. (2018). Advances in cellulose nanomaterials. Cellulose, [online] 25(4):2151–2189. https://doi.org/10.1007/s10570-018-1723-5.

Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P. and Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. ChemInform, 36(36). https://doi.org/10.1002/chin.200536238.

KOLOUR, H.H. An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofifibrils on the Performance of Cement Based Composites. 2019, 113f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – The University of Maine, Orono, 2019.

Kolour, H.H., Ahmed, M., Alyaseen, E. and Landis, E.N. (2018). An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofibrils on the Performance of Cement Paste and Concrete. Advances in Civil Engineering Materials, 20180048. https://doi.org/10.1520/acem20180048.

LAVORATTI, A. Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos poliéster/nanocelulose. 2015, 79 f. Dissertação (Mestrado em Processos e Tecnologias) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

Mejdoub, R., Hammi, H., Suñol, J.J., Khitouni, M., M'nif, A. and Boufi, S. (2016). Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties. Journal of Composite Materials, 51(17):2491–2503. https://doi.org/10.1177/0021998316672090.

Mollah, M.Y.A., Adams, W.J., Schennach, R. and Cocke, D.L. (2000). A review of cement–superplasticizer interactions and their models. Advances in Cement Research, 12(4):153–161. https://doi.org/10.1680/adcr.2000.12.4.153.

Moon, R.J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. and Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. Chemical Society Reviews, [online] 40(7):3941. https://doi.org/10.1039/c0cs00108b.

Moon, R.J., Schueneman, G.T. and Simonsen, J. (2016). Overview of Cellulose Nanomaterials, Their Capabilities and Applications. JOM, 68(9):2383–2394. https://doi.org/10.1007/s11837-016-2018-7.

Munhoz, F. A. da C. Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato. 2007, 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

N. H. I. C. Fonseka, Nanayakkara, A. (2022). Assessment of Concrete Durability by Surface Resistivity and Initial Surface Absorption. Lecture notes in civil engineering, 603–620. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_43.

Onuaguluchi, O., Panesar, D.K. and Sain, M. (2014). Properties of nanofibre reinforced cement composites. Construction and Building Materials, 63:119–124. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.072.

Pei, A., Butchosa, N., Berglund, L.A. and Zhou, Q. (2013). Surface quaternized cellulose nanofibrils with high water absorbency and adsorption capacity for anionic dyes. Soft Matter, [online] 9(6):2047–2055. https://doi.org/10.1039/C2SM27344F.

Peters, S.J., Rushing, T.S., Landis, E.N. and Cummins, T. (2010). Nanocellulose and Microcellulose Fibers for Concrete. Transportation Research Record, 2142(1):25–28. doi:https://doi.org/10.3141/2142-04.

Sanchez, F. and Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. Construction and Building Materials, 24(11):2060–2071. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014.

Santos, R.F., Ribeiro, J.C.L., Carvalho, J.M.F. de, Magalhães, W.L.E., Pedroti, L.G.P., Nalon, G.H., de Lima, G.E.S. (2021). Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: A review. Construction and Building Materials, 288:123122–123122. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123122.

Wang, H., Wu, D. and Mei, Z. (2019). Effect of fly ash and limestone powder on inhibiting alkali aggregate reaction of concrete. Construction and Building Materials, 210:620–626. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.219.

Wang, L., Guo, F., Lin, Y., Yang, H. and Tang, S.H. (2020). Comparison between the effects of phosphorous slag and fly ash on the C-S-H structure, long-term hydration heat and volume deformation of cement-based materials. 250:118807–118807. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118807.

Wang, Y., Li, L., An, M., Sun, Y., Yu, Z. and Huang, H. (2022). Factors Influencing the Capillary Water Absorption Characteristics of Concrete and Their Relationship to Pore Structure. Applied Sciences, [online] 12(4):2211. https://doi.org/10.3390/app12042211.

Zhang, S.P., Zong, L. (2014). Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials. Advances in Materials Science and Engineering, [online] 2014:1–8. https://doi.org/10.1155/2014/650373.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DURABILITY OF VACUUM INFUSED GFRP COMPOSITES EXPOSED TO NATURAL WEATHERING

Tarikul Hasan[a], João R. Correia[a], M. Garrido[a], S. Cabral-Fonseca[b], José Sena-Cruz[c], Marco Jorge[c]

[a]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, tarikul.hasan@tecnico.ulisboa.pt, joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt, mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt

[b]Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, sbravo@lnec.pt

[c]Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE)/Institute of Science and Innovation for Bio-Sustainability (IB-S), University of Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, jose.sena-cruz@civil.uminho.pt, marco@civil.uminho.pt

ABSTRACT

The existing literature on the effects of natural weathering on fibre reinforced polymer (FRP) composites has several limitations: (i) the test data are scarce, especially for relatively long periods, (ii) the scatter in data is quite significant; and, (iii) very few studies were performed on relatively thick vacuum infused composites, among other aspects. In this context, this paper presents the preliminary results of an ongoing study on the effects of natural weathering on relatively thick (6.5 mm) glass-FRP composites. The laminates were produced by vacuum infusion, with isophthalic polyester and vinyl ester resins, and exposed to natural weathering in four outdoor locations in Portugal, namely Elvas, Lisbon, Serra da Estrela and Viana do Castelo, for periods of 12 and 24 months. After each ageing period, the changes in mechanical and thermomechanical properties have been evaluated through different methods: tensile, compressive, flexural, in-plane shear, and interlaminar shear tests and dynamic mechanical analysis. Across the different ageing environments, the maximum degradation ranged between 3-4% in tensile strength, 4-9% in compressive strength, 9-14% in flexural strength, and 1-2% in in-plane shear strength, while interlaminar shear strength suffered no reduction. Despite of the (still) limited ageing duration, the results were compared with the 50-year conversion factor for outdoor exposure provided in CEN/TS 19101:2022.

KEY WORDS

Vacuum Infusion, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composites, Thermomechanical and Mechanical Properties, Natural Weathering, Degradation.

1 INTRODUCTION

Compared with conventional construction materials, fibre reinforced polymer (FRP) composites offer numerous benefits, including higher specific strength, lightness, durability in aggressive environments, high corrosion resistance, and low maintenance throughout their service life (Bai 2003, Correia 2015). However, when used in the construction sector, especially in outdoor applications, FRP composites are exposed to different environmental agents, such as moisture, temperature (including thermal and freeze-thaw cycling), UV radiation and chemicals. These agents can have detrimental effects on the mechanical and thermomechanical properties of FRP composites, especially when acting in combination and/or together with mechanical loads, in which case synergistic effects may also occur. Therefore, it is particularly important to properly understand and evaluate the extent of these effects during the service life of composite structures and to derive appropriate conversion factors that can be used in design.

The degradation in FRP composites due to natural ageing can occur through several degradation mechanisms, often acting simultaneously on the materials. Moisture can cause both physical (usually reversible) and chemical (irreversible) degradation. Physical degradation occurs in the form of plasticization, swelling and relaxation, while chemical degradation involves hydrolysis of the polymer matrix (Anton and Koenig 1980, Mijovic and Lin 1985). Moisture can also introduce damage at the fibre-matrix interface (Karbhari 2007, Pritchad 1998). Exposure to extreme temperatures (low and high) can cause fibre-matrix debonding due to the discrepancies in thermal expansion coefficients between the fibre reinforcement and the polymeric matrix, which can be exacerbated in the case of thermal cycling. Under extremely low temperatures, the polymer matrix hardens, leading to a higher propensity to cracking (Karbhari 2007, Pritchad 1998). Ultraviolet radiation initiates oxidation in the polymer matrix, which results in breaking of chemical bonds in the material surface leading to loss of gloss and eventually fibre blooming (Karbhari 2007, Chin *et al.* 1997, Sousa *et al.* 2016). In the presence of moisture, the occurrence of freeze thaw-cycling can cause further damage due to the presence of water in the material's voids and its expansion upon freezing (Karbhari 2004). Alkaline and acidic solutions, likely to be found in some industrial applications where FRP composites are often used, can also cause severe degradation in FRP composites, breaking down the polymer chains (Kim *et al.* 2006). These degradation mechanisms can act individually or simultaneously at any particular time of natural exposure, depending on the naturally occurring environmental conditions.

The impacts of individual agents (*e.g.*, moisture, temperature, UV radiation or chemical) have been studied by several researchers. Some studies have been done on the impact of natural ageing on thermomechanical and mechanical properties as well (Keller *et al.* 2007, Sousa *et al.* 2016). However, the literature has several limitations, namely: (i) the test data are scarce, especially for extended periods of exposure; (ii) the scatter in data is quite significant; and (iii) very few studies were performed on relatively thick composites produced by vacuum infusion.

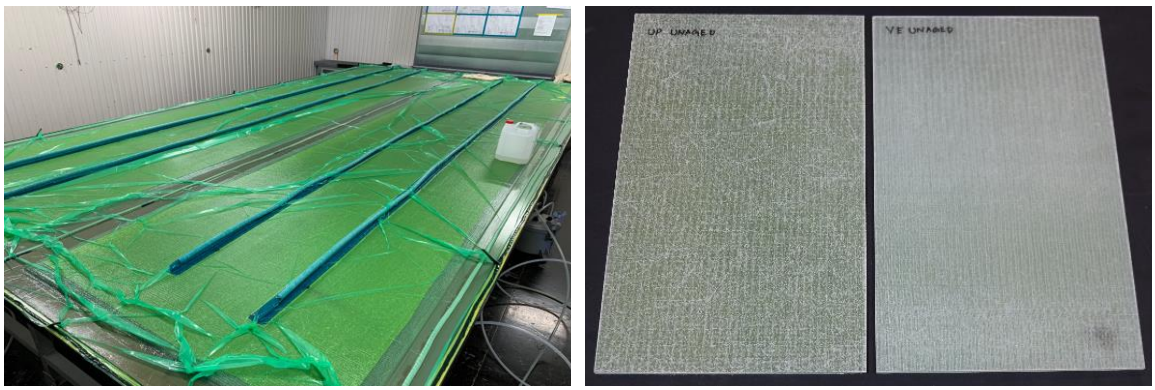
Considering these limitations, this paper presents the results of an ongoing study on the impacts of natural ageing on relatively thick (6.5 mm nominal thickness) glass fibre reinforced polymer composites (GFRP). The GFRP composites used in this study were produced in laminate shapes by vacuum infusion from two alternative resin systems, unsaturated polyester and vinyl ester. The plates were exposed to indoor and outdoor weathering in five different locations in Portugal: (i) Indoor environment at 20 °C, as reference; (ii) Elvas (inland Alentejo); (iii) National Laboratory for Civil Engineering (Lisbon, in an urban area, next to the Atlantic Ocean); (iv) Serra da Estrela (mountainous area), and (v) Viana do Castelo (coastal environment), without load, for periods of 12 and 24 months (additional ageing periods up to 240 months are planned). After each ageing period, the effects of

outdoor exposure on thermomechanical and mechanical properties were measured through, respectively, dynamic mechanical analysis (DMA) and tensile, compressive, flexural, in-plane (IP) shear tests and interlaminar shear tests. The obtained results were also compared with the conversion factor provided in CEN/TS 19101:2022 (European Committee for Standardization 2022) for outdoor exposure.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 MATERIALS

Large GFRP plates (5000 mm × 1250 mm) with nominal thickness of 6.5 mm were produced by vacuum infusion (Figure 1a) and cut into smaller 700 mm × 250 mm plates, suitable for each test batch from different ageing environments and exposure periods. The laminates were made using two different resin systems, unsaturated polyester (GFRP-UP) and vinyl ester (GFRP-VE) (Figure 1b), while maintaining the same layup containing 14 layers of glass fibre reinforcement (volume fraction of ~57%). The purpose of keeping the same fibre architecture was to enable a direct comparison between GFRP-UP and GFRP-VE. The fibre architecture included eight layers of unidirectional fabrics (UD, 0°, 625 g/m^2), four quadriaxial fabrics (QA, 0°/+45°/90°/-45°, 835 g/m^2), and two outer layers of chopped strand mat (CSM, 300 g/m^2). The fibre stacking sequence was as follows: [CSM/ $(UD)_2/(QA)_2/(UD)_2]_S$. Polylite 720-691 resin (50-54% isophthalic polyester and 46-50% styrene) was used to produce the GFRP laminate with unsaturated polyester (GFRP-UP); this resin mixture included 1.5% (wt.%) of methyl ethyl ketone peroxide (MEKP, Ketanox B180). The resin used for producing the vinyl ester-based composites (GFRP-VE) was Derakane 411-200 (52% epoxy vinyl ester resin and 48% styrene), and this resin mixture included 1.5% (wt.%) of MEKP (Ketanox B180), 0.025% (wt.%) of dimethylaniline, 0.3% (wt.%) of cobalt octoate (with 1% cobalt), and 0.025% (wt.%) of 2,4-pentanodione. Following production, both types of composite laminates were post-cured at 80 °C for a period of 12 hours.



a) b)

Figure 1 – a) Manufacturing of GFRP laminates by vacuum infusion, and b) GFRP-UP (left) and GFRP-VE (right) laminates.

2.2 AGEING PROTOCOL

The GFRP plates were exposed to natural weathering at five different locations in Portugal (mild Mediterranean climate), each with a relatively different profile in terms of temperatures and relative humidity. These were labelled as (i) E1 – Indoor (reference) environment at 20 °C; (ii) E2 - Elvas (Csa

climate type, according to the Köppen-Geiger climate classification system (Beck *et al.* 2018), characterized by high daily and yearly thermal amplitudes, and with maximum temperatures among the highest in Portugal); (iii) E3 – Lisbon (Csa climate type, relatively dense urban area in a coastal city); (iv) E4 – Serra da Estrela (Csb climate type, mountain region, at an altitude of about 1600 m, high thermal amplitudes and freezing temperatures in winter); and (v) E5 – Viana do Castelo (Csb climate type, coastal environment). The materials were set up horizontally (Figure 2), with only one face of the materials exposed to direct solar radiation. Prior to exposure to ageing, the lateral edges of the GFRP plates were coated with an epoxy resin (Icosit K-101 N) to hinder water ingress through the machined edges of the plates. This paper does not include the results for ageing in E1 environment.

a) b)

Figure 2 – Environmental ageing: a) E2 - Elvas in summer, and b) E4 - Serra da Estrela (with and without loading) in winter.

2.3 TEST PROGRAM

2.3.1 Overview

The initial characteristics of the materials were obtained by thermomechanical (DMA) tests and different mechanical standard tests, including tensile, compressive, flexural, in-plane shear and interlaminar shear. After 12 and 24 months of ageing, GFRP composites under ageing in the different locations were collected and similar tests were carried out.

2.3.2 Thermomechanical characterization

The DMA tests were conducted in a TA Instruments Q800 Dynamic Mechanical Analyser, following the recommendations of ISO 6721-1,5:2019, in a dual cantilever three-point bending configuration. The specimens had dimensions of 60 mm × 10 mm × 4 mm (the thickness was reduced by milling on one surface for compatibility with the test fixtures). During the test, the specimens were subjected to sinusoidal loading at a frequency of 1 Hz, with a strain amplitude of 15 µm. The adopted temperature range was 25 °C to 200 °C, increasing at a rate of 2 °C/min. The glass transition temperature (T_g) was determined from the onset of the decay of the storage modulus (E') curve.

2.3.3 Mechanical characterization

The tensile and compressive tests were performed in a universal testing machine (UTM) Instron 5989 (capacity of 600 kN), under displacement control, following ISO 527-4:2021 and ISO 14126:2023, respectively. For both types of tests, the specimens had rectangular shapes, with dimensions of 300 mm × 25 mm × 6.5 mm (tensile tests) and 153 mm × 25 mm × 6.5 mm (compressive tests). To measure axial strains, a video extensometer (VE, camera FLIR BFS-U3-51S5M-C; lens Fujinon HF25SA-1; software from MatchID—v2022.2) was used.

Flexural, in-plane (IP) shear and interlaminar shear tests were conducted in a UTM Instron 5982 (capacity of 100 kN), under displacement control, according to ISO 14125:1998, ASTM D5379/D5379M-19 and ISO 14130:1997, respectively. Flexural, IP shear and interlaminar shear tests were performed on rectangular shaped specimens, with dimensions of 195 mm × 15 mm × 6.5 mm, 76 mm × 19 mm × 6.5 mm, and 65 mm × 32.5 mm × 6.5 mm, respectively. IP shear test specimens also comprised V-shaped notches at the mid-section section (according to the standard specifications); the main fibre direction was oriented parallel to the notched section. During the IP shear tests strains in the specimens were measured using the same VE mentioned for tensile and compressive tests.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 INITIAL CHARACTERIZATION

The initial properties of GFRP-UP and GFRP-VE are presented in Table 1. For both composites, the magnitude of most of the mechanical properties were relatively similar, although GFRP-VE generally (except for tensile strength) showed better performance than GFRP-UP. More significant differences were observed in the compressive strength, indicating the better performance of the VE resin system compared to its UP counterpart. Also, and for the same reason, the glass transition temperature (T_g) of GFRP-VE was higher than that of GFRP-UP.

Table 1 – Initial properties of GFRP composites with UP and VE resins (average ± standard deviation).

Properties	GFRP-UP	GFRP-VE
Tensile strength, σ_t [MPa]	844 ± 36	811 ± 22
Tensile modulus, E_t [GPa]	33.1 ± 1.4	35.1 ± 1.5
Compressive strength, σ_c [MPa]	470 ± 33	556 ± 45
Compressive modulus, E_c [GPa]	35.8 ± 1.9	39.2 ± 2.0
In-plane shear strength, τ [MPa]	148 ± 6.4	158 ± 8.4
In-plane shear modulus, G [GPa]	5.0 ± 0.4	5.4 ± 0.6
Flexural strength, σ_f [MPa]	798 ± 54	806 ± 41
ILSS, σ_{ILSS} [MPa]	42.0 ± 1.5	46.7 ± 1.3
Glass transition temperature, T_g [°C]	86.0 ± 0.8	95.0 ± 0.2

3.2 EFFECTS OF NATURAL WEATHERING

3.2.1 Aesthetic properties

As shown in Figure 3, natural weathering had significant impact on the aesthetic properties of the GFRP composites. Comparing the colour of unaged GFRP-UP (Figure 3a) and GFRP-VE (Figure 3d) with that of aged plates after 24 months of ageing in E2 environment (Figures 9b and 9e) shows that significant fading and yellowing of the materials occurred. This is the result of photo-oxidation of the resin (Davis and Sims 1983). Similar levels of discoloration were observed after 24 months of ageing in E3 and E4. The most significant discoloration occurred for the samples aged for 24 months in E5 (Figures 9c and 9f). Fibre blooming was also noticed in the plates exposed to all natural weathering environments, being once again most intense for the plates aged in the E5 environment.

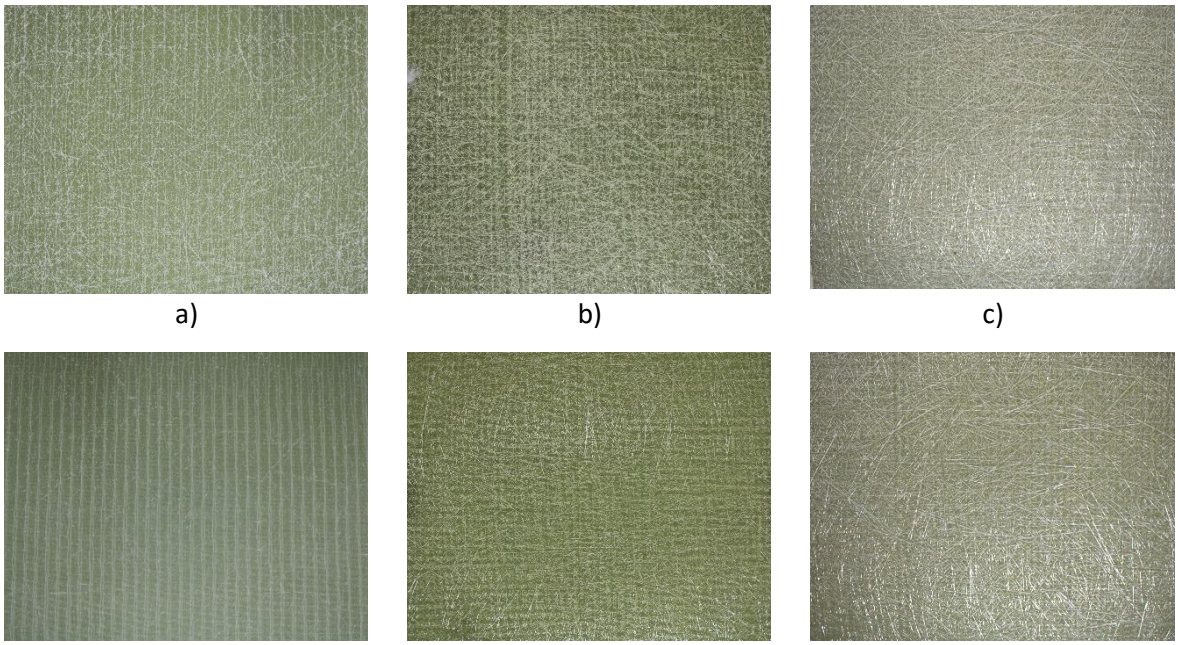
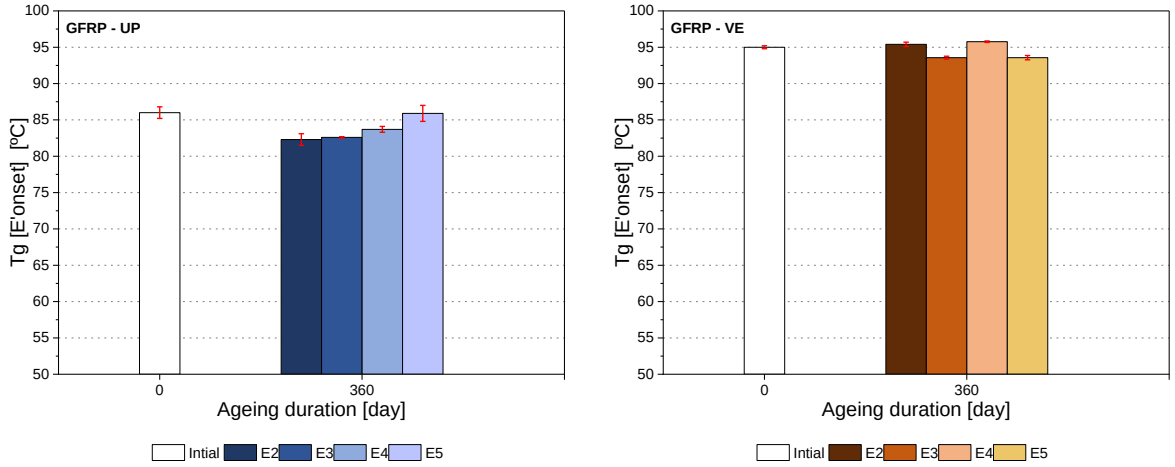


Figure 3 – Effects of natural weathering on aesthetic properties: a) GFRP-UP (unaged), b) GFRP-UP (24 months in E2), c) GFRP-UP (24 months in E5), d) GFRP-VE (unaged), e) GFRP-VE (24 months in E2), and f) GFRP-VE (24 months in E5).

3.2.2 Glass transition temperature

The impacts of the different natural ageing environments for 12 months of ageing (results for 24 months are not yet available) on the T_g of GFRP-UP and GFRP-VE are presented in Figure 3a and 3b, respectively – note the results of 24 months of ageing were not included in the context of this work. Figure 4 shows that: (i) the different natural ageing environments did not significantly affect the T_g of both composites, albeit slightly higher retention was observed for GFRP-VE than for GFRP-UP; (ii) the highest T_g reduction observed in GFRP-UP was 3.7 °C (4.3%) after ageing in E2 for 12 months, while for GFRP-VE the maximum reduction of 1.4 °C (1.5%) was observed after 12 months of ageing in E3 and E5; and (iii) despite the differences in local climatic conditions, there was no clear differentiation between the effects of the different ageing environments on T_g of the vacuum infused GFRP composites. The results obtained here are in agreement with those reported in Sousa *et al*. (2013) for pultruded GFRP exposed in the same E3 ageing environment as the current study; therein, after 42 months of ageing of GFRP-UP and 44 months

of ageing of GFRP-VE, no degradation was observed in T_g for the tested composites, which also comprised unsaturated polyester and vinyl ester resins.



a) b)

Figure 4 – Effects of natural weathering on T_g: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one standard deviation).

3.2.3 Tensile strength

Figure 5a and 5b illustrate the effects of natural weathering on the tensile strength of GFRP-UP and GFRP-VE, respectively. Several important aspects can be identified in Figure 5: (i) similar to T_g, the different natural ageing environments had minimal impact on the tensile strength of GFRP composites and they did not have significantly different impact in comparison to each other; (ii) here also, GFRP-VE showed better performance than GFRP-UP, as GFRP-UP suffered slight reduction in E3, E4 and E5 after 12 months (which mostly recovered after 24 months of ageing) and in E2 after 24 months of ageing (within the experimental scatter), which could be also attributed to initial variability, while GFRP-VE showed some improvement in tensile strength (up to 11% after 24 month in E4, indicating possibility of post curing); (iii) the maximum and minimum retention observed for GFRP-UP were 100% (at E2 after 12 months and E5 after 24 months) and 96% (at E4 and E5 after 12 months) respectively, while for GFRP-VE these values are 111% after 24 months and 102% after 12 months in E4, respectively. The good performance in terms of tensile strength retention indicates that the fibre-matrix adhesion was not significantly impacted in any ageing environment. The study by Sousa *et al*. (2013) on pultruded GFRP composites (5 mm nominal thickness) also showed that natural ageing in the same location as the current study's E3 for up to 40 months did not cause significant decrease in tensile strength.

3.2.4 Compressive strength

Figure 6 shows how the compressive strength of GFRP composites changed after exposure to the different natural ageing environments. The following can be observed from Figure 6: (i) ageing in the different environments did not have any negative impact on the compressive strength of GFRP-UP even after 24 months of ageing, while GFRP-VE suffered degradation in E2, E4 and E5, but in most cases the retention was above 95%; (ii) the minimum retentions observed in GFRP-VE were 92% in E5 after 12 months and E4 after 24 months, which could be the outcome of some (limited) deterioration at the matrix level; (iii) the maximum retentions were 113% (GFRP-UP) after 12 months in E4 and 105% (GFRP-VE) after 24 months in E3, reflecting property increase; (iv) a sharp decrease in compressive

strength of GFRP-VE occurred in E4 environment from 12 months to 24 months of ageing; (v) overall, compressive strength results showed much higher coefficient of variation (COV) than tensile strength results and, in most cases, the deviation in retention from 100% (both higher and lower) are within the experimental scatter or very close to that. The higher COV should result mostly from the nature of the test (setup and instrumentation) and, to some extent, from the inherent material variability, moreover, the compressive strength is strongly influenced by local geometric imperfections (Sun *et al.* 2015) which contributes to the increase of COV. The significant increase in compressive strength of GFRP-UP in E2 and E4 suggests the occurrence of post-curing, although such impact was not noticed in tensile strength of GFRP-UP for these environments.

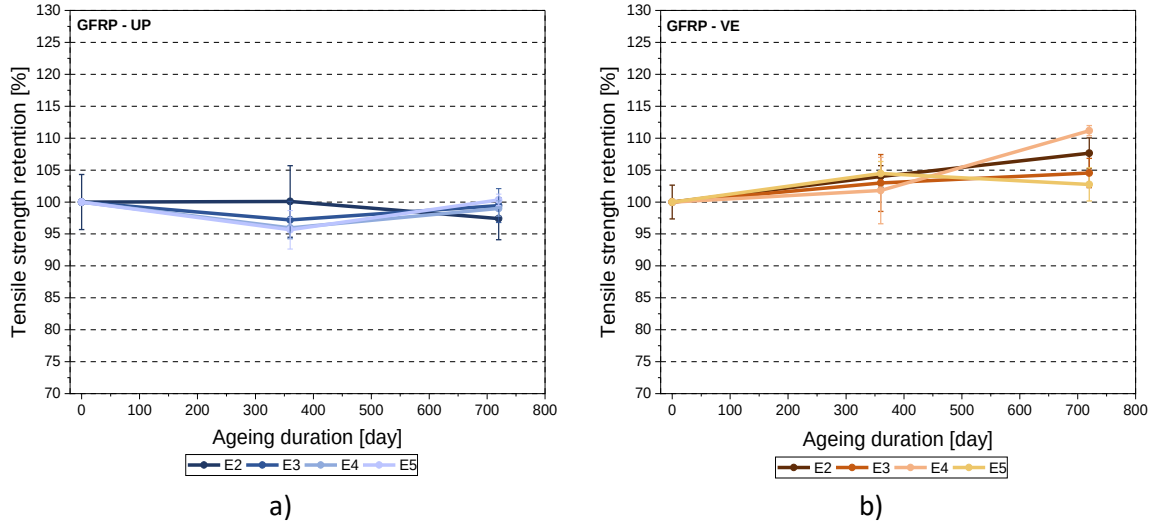


Figure 5 – Effects of natural weathering on tensile strength: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one COV).

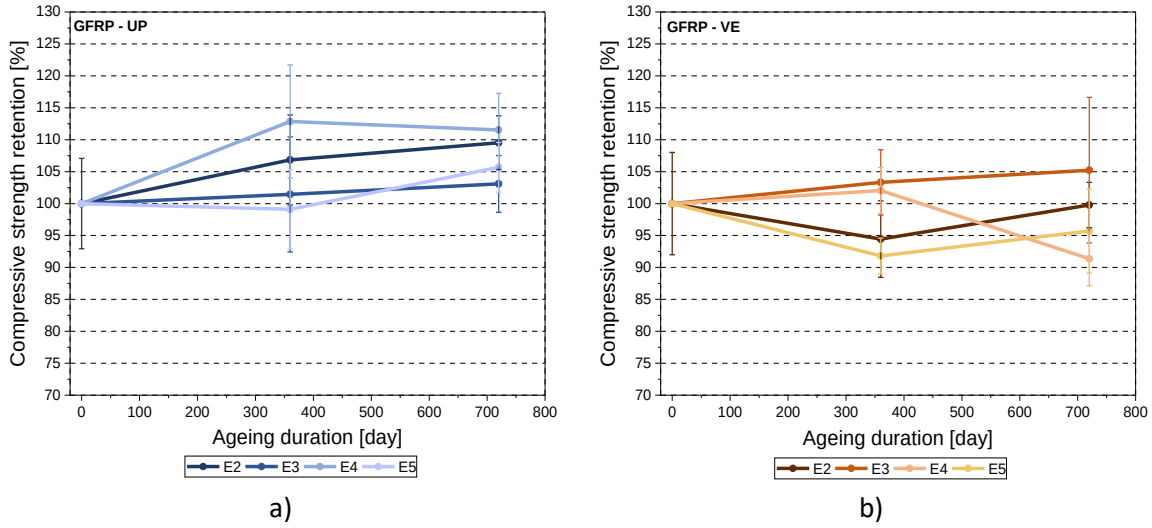


Figure 6 – Effects of natural weathering on compressive strength: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one COV).

3.2.5 Flexural strength

The impacts of natural ageing on the flexural strength of GFRP-UP and GFRP-VE is shown in Figure 7a and 7b, respectively. It is important to note that the specimen's failure started at the upper laminae (in compression), followed by tensile failure at the bottom laminae. Similar to compressive strength, the COV was also high for flexural strength. These results show that: (i) GFRP-UP suffered moderate to significant degradation in all ageing environments, while GFRP-VE degraded moderately in E5; (ii) maximum degradation (of 15%) in GFRP-UP was noted in E2, and for GFRP-VE it was 10% in E5 after 12 months of ageing, but both recovered significantly after 24 months of ageing and finally corresponded to the highest retention. It was expected that the degradation pattern would be comparable to that of compressive strength since the failure started in compression and both properties should be significantly matrix dependent, but it was not exactly the case, especially for GFRP-UP, as its compressive strength did not suffer any significant decrease in any environment unlike the flexural strength. No specific trend was observed in terms of whether one ageing environment is more severe than the others. The pultruded GFRP-UP and GFRP-VE studied by Sousa *et al.* (2013) suffered 5% and 22% of degradation after 42 months of ageing in the same location as E3. In the same environment, vacuum infused GFRP-UP and GFRP-VE composites (current study) suffered 8% and 2% degradation after 24 months of ageing, respectively.

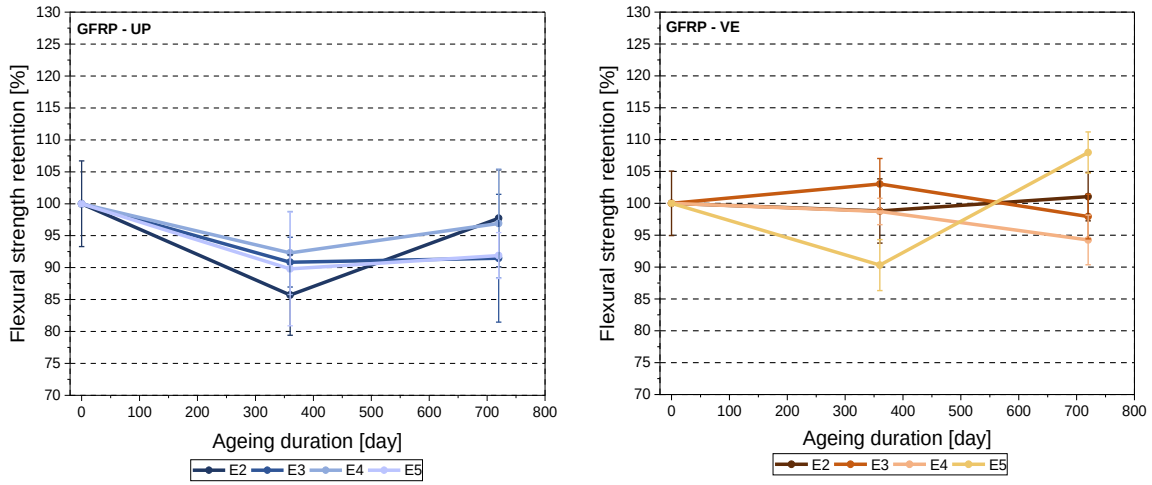
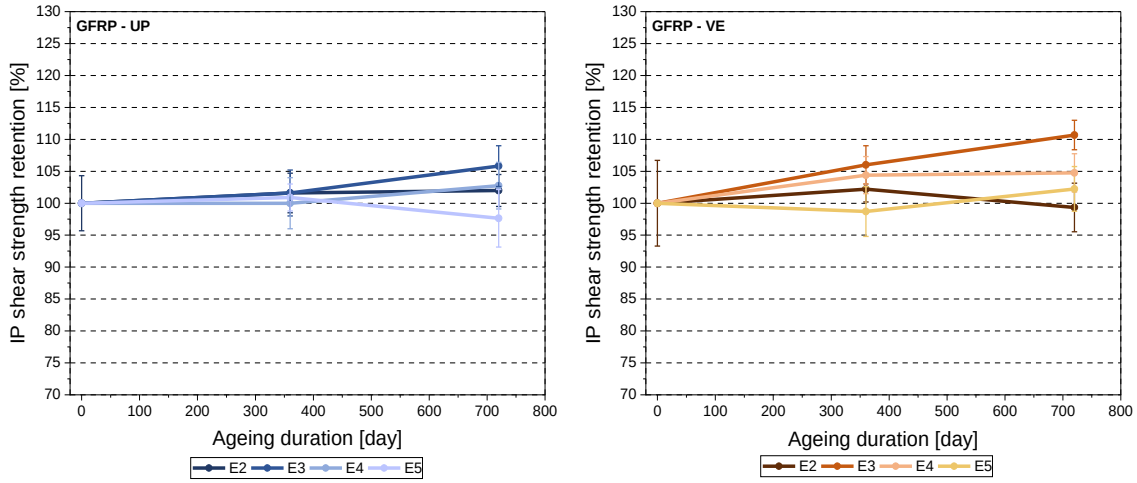


Figure 7 – Effects of natural weathering on flexural strength: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one COV).

3.2.6 IP shear strength

As shown in Figure 8a and 8b, natural ageing had insignificant impact on the IP shear strength of GFRP-UP and GFRP-VE. The different natural ageing environments did not produce clear and significantly different impacts on the IP shear strength of GFRP-UP and GFRP-VE. For both composites, we can even observe property increases, especially in GFRP-VE. This may be attributed to possible post-curing. As mentioned in Section 2.1 (materials), the fibre architecture included quadriaxial fibre layers, which significantly increase the IP shear reinforcement and make the IP shear strength a more fibre-dominated property, namely compared to composites with predominantly unidirectional reinforcement (e.g. pultruded components). Thus, the high retention of this property indicates that the influence of the different natural ageing environments did not cause much degradation in fibre-matrix bonding, similar to what was observed for tensile strength.

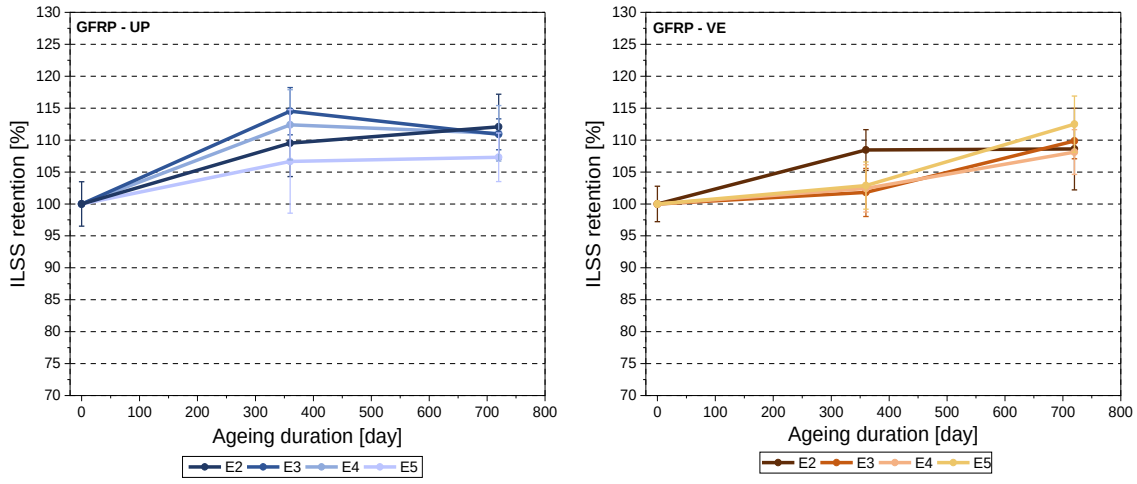


a) b)

Figure 8 – Effects of natural weathering on IP shear strength: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one COV).

3.2.7 Interlaminar shear strength (ILSS)

The impacts of natural ageing on the ILSS of GFRP-UP and GFRP-VE are presented in Figure 9a and 9b. Similar to most of the previous properties, natural ageing did not have any consequential negative impact on both GFRP composites. For both materials, moderate to high property increase was observed, again indicating the occurrence of post-curing. The maximum retention observed in GFRP-UP was 115% after 12 months of ageing in E3, while for GFRP-VE the maximum retention obtained was 113% after 24 months of ageing in E5. ILSS depends on the bond between fibres and matrix and on the integrity and strength of the matrix, particularly at the interphases between adjacent laminae. The performance of this property further substantiates that fibre-matrix bonding and polymer matrix were not significantly impacted by 24 months of natural weathering in the various environments, which was also observed in most of the previous properties.



a) b)

Figure 9 – Effects of natural weathering on ILSS: a) GFRP-UP, and b) GFRP-VE (error bars correspond to one COV).

3.2.8 Comparison with CEN/TS 19101:2022

The 50-year conversion factor provided in CEN/TS 19101:2022 for outdoor ageing (without continuous exposure to moisture) is 0.85. After 24 months (2 years) of ageing, for most cases the property retention for the vacuum infused GFRP-UP and GFRP-VE was close to or above 95%. Some lower retentions were also observed, *e.g.*, flexural strength of GFRP-UP reduced to 85% after 12 months of ageing in E2, but this was reversed after 24 months of ageing. Naturally, this assessment is (still) very limited given the short duration of natural weathering ageing. Future results to be obtained in this project will provide further insights in this respect.

4 CONCLUSIONS

This paper presents the effects of four different natural ageing environments in Portugal (Elvas, the National Laboratory for Civil Engineering in Lisbon, Serra da Estrela, and Viana do Castelo) on the thermomechanical and mechanical properties of relatively thick (6.5 mm) vacuum infused glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites, produced from two different resin types, unsaturated polyester (UP) and vinyl ester (VE).

The natural weathering, which had been ongoing for 24 months, had a considerable impact on the aesthetic properties of the composites. This resulted in noticeable discoloration, including yellowing and fading, as well as fibre blooming.

However, these changes did not translate into any significant impact on the glass transition temperature (T_g) of both composites. The maximum reduction in T_g (in ˚C) was 4.3% and 1.5% for GFRP-UP and GFRP-VE, respectively, after 12 months of ageing. Among the mechanical properties, most of them showed very high retention after natural weathering in all the ageing environments considered. The lowest retention figures in tensile strength, IP-shear strength and ILSS were 96%, 98% and 102%, respectively. These results suggest that the fibre-matrix interface and bond were not significantly impacted by the 24 months of natural weathering. Compressive strength also showed very high retention figures, especially for GFRP-UP. In most cases the retention was above 95% and, considering the relatively high COV of the unaged and aged material properties the reduction in strength retention was within or very close to the experimental scatter. Moderately higher reductions were observed in flexural strength retention, especially in GFRP-UP after 12 months of ageing, but most of them were reverted after 24 months of ageing. However, similar to compressive strength, flexural strength values also showed high scatter, suggesting that these differences may have little statistical relevance. In some cases, retention values above 100% (*i.e.*, property increases) in properties where relatively low scatter was obtained suggest that some degree of post-curing may have occurred. Also, the property retention trends were not dictated strictly by the inherent nature of the property (fibre or matrix dominated) or by the resin type. Another important observation is that the different ageing environments did not have significantly different impacts. While the exposure environments are all located within a relatively small geographical area and have relatively similar climate (Csa and Csb climate types), some key differences in exposure conditions do exist between them; however, so far, these did not reflect in clear changes in terms of effects on the material properties.

Although the ageing duration is still very limited, the obtained retention values after two years of ageing are still well above the 50-year conversion factor of 0.85 provided in CEN/TS 19101:2022 for outdoor ageing.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was support by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) through project Durable-FRP (doi.org/10.54499/PTDC/ECI-EGC/4609/2020), the PhD scholarship 2022.14644.BD, the CERIS research unit funding project UIDB/04625/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020), the ISISE research unit funding project UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020) and the Associate Laboratory ARISE, under reference LA/P/0112/2020.

REFERENCES

Antoon, M.K., Koenig, J.L. (1980). The structure and moisture stability of the matrix phase in glass-reinforced epoxy composites. Journal of Macromolecular Science: Part C, 19(1), 135-173.

Bai, J. (Ed.). (2013). Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications. Woodhead Publishing, New Delhi.

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., and Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, 5(1), 180214.

Chin, J. W., Nguyen, T., and Aouadi, K. (1997). Effects of environmental exposure on fiber-reinforced plastic (FRP) materials used in construction. Journal of Composites, Technology and Research, 19(4), 205-213.

Correia, J. R. (2015). In: Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing and Design (Eds. F. Margarido & M. C. Gonçalves). Springer.

Davis, A., and Sims, D. (1983). Weathering of polymers. Applied Science Publishers

European Committee for Standardization. (2022). Design of fibre-polymer composite structures (CEN/TS 19101:2022).

Karbhari, V.M. (2004). E-Glass/Vinylester Composites in Aqueous Environments: Effects on Short-Beam Shear Strength. Journal of Composites for Construction, 8 (2), 148–156.

Karbhari, V.M. (Editor) (2007). Durability of Composites for Civil Structural Applications, Woodhead Publishing, Florida.

Keller, T., Bai, Y., and Vallée, T. (2007). Long-Term Performance of a Glass Fiber-Reinforced Polymer Truss Bridge. Journal of Composites for Construction, 11(1), 99 – 108.

Kim, H. Y., Park, Y. H., and You, Y. J. (2006). Durability of GFRP composite exposed to various environmental conditions. KSCE Journal of Civil Engineering, 10(4), 291-295.

Mijović, K., Lin, K.F. (1985). The effect of hygrothermal fatigue on physical/mechanical properties and morphology of neat epoxy resin and graphite/epoxy composite. Journal of Applied Polymer Science, 30, 2527-2549.

Pritchard, G. (Ed.) (1998). Reinforced plastics durability. Woodhead Publishing Limited, UK.

Sousa, J., Correia, J., and Cabral-Fonseca, S. (2016). Durability of glass fibre reinforced polymer pultruded profiles: Comparison between QUV accelerated exposure and natural weathering in a Mediterranean climate. Experimental Techniques, 40(2), 207-219.

Sun, W., Vassilopoulos, A.P. and Keller, T. (2015). Effect of temperature on kinking failure mode of non-slender glass fiber-reinforced polymer specimens. Composite Structures, 133, 178-190.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO INDIVIDUAL E COMBINADO DE PRODUTOS FOTOCATALÍTICO E ANTI-GRAFFITI EM REVESTIMENTO DE FACHADA

Jéssica Deise Bersch[a,b]; Manuel Francisco Pereira[c]; Amélia Dionísio[c]; Angela Masuero[b]; Denise Dal Molin[b]; Rosário Veiga[d]; Inês Flores-Colen[a]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, jessica.d.bersch@tecnico.ulisboa.pt, ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

[b]NORIE/PPGCI, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha 99, 90035-190, Porto Alegre, Brasil, angela.masuero@ufrgs.br, dmolin@ufrgs.br

[c]CERENA, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, mfcp@ist.utl.pt, amelia.dionisio@tecnico.ulisboa.pt

[d]LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, rveiga@lnec.pt

RESUMO

Este artigo analisa a eficiência individual e combinada de soluções fotocatalítica e anti-graffiti na proteção de superfícies acabadas com argamassa de cal e tinta de silicato. Foram testados um anti-graffiti de sacrifício e, de forma exploratória, um anti-graffiti permanente, não formulado para limpeza a vapor. O desempenho foi avaliado com aplicação de manchas de azul de metileno às amostras, seguida da inspeção da sua variação de cor durante exposição à radiação solar. Na sequência, efetuou-se limpeza com jato de vapor de água a baixa pressão de uma tinta spray para graffiti de cor prateada. Os ângulos de contato das superfícies com a água foram avaliados antes da aplicação das manchas e após limpeza do graffiti. A tinta de silicato e o produto anti-graffiti permanente originaram superfícies hidrofóbicas. As amostras protegidas apenas com solução fotocatalítica recuperaram mais de 90% das suas coordenadas RGB originais após 2 dias de exposição. Resultados similares de autolimpeza foram atingidos após 5 dias com produto fotocatalítico aplicado externamente à proteção anti-graffiti. O anti-graffiti permanente em camada externa aumentou as coordenadas RGB do corante durante a exposição. O anti-graffiti sacrificial possibilitou maior eficiência na remoção da tinta, embora com modificação do ângulo de contato com a água.

Palavras-chave: fachadas, anti-graffiti, autolimpeza, fotocatálise, argamassa

1 INTRODUÇÃO

As fachadas desempenham um papel crucial na proteção das edificações contra agentes agressivos ambientais, além de contribuírem significativamente para a configuração arquitetónica do ambiente construído. No entanto, são frequentemente alvo de vandalismo, especialmente em áreas urbanas, sendo degradadas por aplicações de graffiti não autorizadas, o que acarreta consequências estéticas e funcionais aos seus revestimentos (García e Malaga, 2012; Moura *et al.*, 2017). As fachadas também sofrem com manchas provenientes da deposição de sujidade e particulados da poluição urbana, como acontece com a fuligem resultante de reações de combustão (La Russa *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2020).

Na procura de soluções de proteção para os danos que afetam os revestimentos de fachadas, a fotocatálise destaca-se pela capacidade de materiais semicondutores em oxidar e reduzir compostos orgânicos e inorgânicos (La Russa *et al.*, 2012), como sujidade e poluentes atmosféricos. Isso atribui às edificações mecanismos de autolimpeza, descontaminação do ar e potencial biocida (González-Sánchez *et al.*, 2021; Munafò *et al.*, 2015). O dióxido de titânio (TiO_2) é o fotocatalisador mais amplamente utilizado (González-Sánchez *et al.*, 2021), sendo ativado pela incidência de radiação, especialmente UV, na presença do oxigénio atmosférico e da água. A fotoativação do TiO_2 confere às superfícies protegidas o efeito de superhidrofilicidade (Munafò *et al.*, 2015).

No entanto, segundo a literatura, a eficiência de superfícies fotocatalíticas é comprometida quando estas são cobertas por uma camada de tinta, como as utilizadas em graffiti (Austria, 2015), devido à inviabilidade de ativação pela radiação incidente. Para proteger contra esse tipo de problema, são comercializadas soluções anti-graffiti visando facilitar a remoção e limpeza das tintas aplicadas aleatoriamente, atuando como barreiras protetoras à sua penetração no substrato (Moura *et al.*, 2014). Existem produtos anti-graffiti de sacrifício, semi-permanentes e permanentes, classificados de acordo com o número de ciclos de limpeza que suportam ao longo de sua vida útil. Idealmente, os produtos anti-graffiti devem apresentar propriedades hidrofóbicas e oleofóbicas, com baixa energia superficial (García e Malaga, 2012).

Numa perspectiva de ciclo de vida, a proteção das fachadas das edificações pode prolongar a sua durabilidade, além de reduzir custos e ações de manutenção (Fernandes *et al.*, 2020). No entanto, há uma lacuna científica quanto à utilização conjunta de soluções fotocatalíticas e anti-graffiti para a proteção abrangente dos revestimentos de fachadas, especialmente em áreas urbanas. Uma busca avançada pelos termos "mortar AND (((titanium AND dioxide) OR TiO_2) OR photocatal*) AND anti-graffiti" no título, no resumo e nas palavras-chave de documentos científicos na base de dados Scopus não obteve resultados.

Nesse contexto, este artigo pretende investigar a atuação individual e simultânea de soluções protetoras para superfícies de fachada, visando discutir seu desempenho e o impacto da aplicação de produtos anti-graffiti sacrificial e permanente na autolimpeza proporcionada por uma solução fotocatalítica. As soluções de proteção foram aplicadas em diversas combinações a amostras de um sistema ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*) com camada de acabamento em argamassa de cal e tinta de silicato.

2 DADOS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais utilizados, incluindo as diferentes soluções de proteção superficial. Além disso, detalha os métodos adotados para a preparação das amostras, a avaliação da autolimpeza, a remoção de graffiti e, por fim, a influência da aplicação de produtos anti-graffiti na autolimpeza das superfícies.

2.1 MATERIAIS

Em relação ao substrato, o sistema ETICS utilizado apresenta uma camada de isolamento em aglomerado de cortiça expandida. O seu revestimento é composto por uma camada base produzida com cal hidráulica natural e agregados de cortiça, reforçada com uma rede de fibra de vidro, e uma camada de acabamento à base de argamassa de cal. O sistema ETICS foi produzido por um fabricante, e as amostras utilizadas neste estudo possuem uma área de 10 cm x 20 cm. As avaliações efetuadas restringiram-se, essencialmente, à superfície do revestimento.

Foi aplicada uma tinta à base de silicato de potássio puro estabilizado sobre todas as amostras, a qual já possuía proteção com óleo de pinho. A tinta de silicato é composta por matérias-primas de origem natural e recomendada para suportes minerais à base de ligantes hidráulicos. O produto de proteção fotocatalítico utilizado foi uma formulação ativa nanoestruturada, de coloração branca, à base de água, com pH 9,2 ± 0,5, densidade de 0,98 ± 0,05 g/cm³ e viscosidade de 2 mPa.s, conforme informações do fabricante. O produto anti-graffiti de sacrifício empregado também possui base aquosa, com pH de aproximadamente 8,0 e densidade de 1,00 g/cm³.

O sistema de proteção permanente para limpeza do graffiti, com base em verniz de poliuretano, é um produto bicomponente, que foi aplicado sobre um selante acrílico aquoso. O selante apresenta densidade de 1,016 ± 0,02 g/cm³ com teor de sólidos de 26%. Quanto ao produto bicomponente, as proporções utilizadas seguiram a recomendação de 4 partes de resina para 1 parte de produto de cura, sendo a densidade de 1,042 ± 0,02 g/cm³ e o teor de sólidos de 54% ± 3%. Ressalta-se que o anti-graffiti permanente foi aplicado a título exploratório, visando principalmente compreender a interação do produto fotocatalítico com diferentes formulações de soluções de proteção. Conforme o fabricante, este produto não é recomendado para esquemas muito permeáveis ao vapor de água, sendo indicado para suportes novos de betão ou cimento e acabamentos em pintura epóxi (interior) e poliuretano.

Os materiais foram utilizados individualmente e em combinação, incluindo variação na sequência de aplicação, visando a produção de amostras com 8 diferentes tipos de superfície: (i) referência (aplicação somente de tinta de silicato); (ii) produto fotocatalítico; (iii) anti-graffiti de sacrifício; (iv) anti-graffiti permanente; (v) produto fotocatalítico sobre anti-graffiti de sacrifício; (vi) produto fotocatalítico sobre anti-graffiti permanente; (vii) anti-graffiti de sacrifício sobre produto fotocatalítico; e (viii) anti-graffiti permanente sobre produto fotocatalítico.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Preparação das amostras

As amostras receberam duas demãos cruzadas de tinta de silicato, seguindo as recomendações do fabricante, com uma diluição de 25% em volume de água, resultando em um consumo de 0,22 l/m². A aplicação da segunda demão foi realizada 24 horas após a primeira. Após pelo menos 72 horas para cura e silicatização da tinta, iniciou-se a aplicação dos produtos de proteção de superfície. Todos os produtos foram aplicados em duas demãos, também com um intervalo de 24 horas entre cada aplicação. Pelo menos 7 dias separaram a aplicação de produtos com propriedades e mecanismos de atuação diferenciados, como fotocatalíticos e anti-graffiti.

Foram aplicados 0,125 l/m² do produto fotocatalítico e 0,1 l/m² do anti-graffiti sacrificial em cada uma das duas camadas, seguindo as recomendações do fabricante e considerando as condições de espalhamento na superfície das amostras. Para o anti-graffiti permanente, o selante foi diluído em 15% de volume de água, resultando em um consumo de 0,08 l/m². O produto bicomponente, diluído

em solvente (5%), foi aplicado com um consumo de 0,06 l/m² na primeira demão e 0,07 l/m² na segunda demão. Os produtos de proteção foram distribuídos uniformemente sobre toda a área das amostras utilizando trincha. Um período mínimo de 7 dias transcorreu entre a finalização da preparação das amostras e o início dos ensaios.

O procedimento de preparação das amostras é detalhado na Figura 1, que inclui uma seção transversal (Figura 1a) e mostra o acabamento da superfície após a aplicação da tinta de silicato. A Figura 1c ilustra a aplicação de um dos produtos de proteção na superfície das amostras, o fotocatalítico, enquanto a Figura 1d mostra o processo subsequente de espalhamento com trincha sobre a superfície.

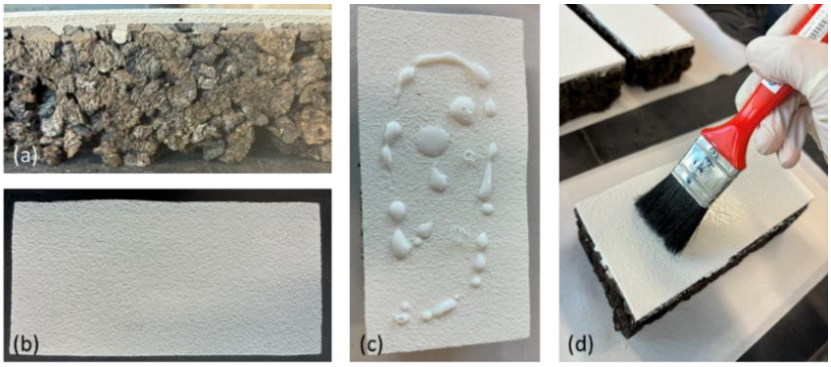


Figura 1 – Preparação das amostras: (a) Estado original; (b) Após aplicação de duas demãos cruzadas de tinta de silicato; (c,d) Aplicação dos produtos protetores de superfície

2.2.2 Avaliação do desempenho

O estudo do desempenho das soluções protetoras começou com a avaliação do ângulo de contato estático formado com a água. Gotas de água de 0,015 ml foram aplicadas às amostras dos 8 tipos de superfície no seu estado original, calculando-se o valor final como a média de 5 ângulos medidos.

A autolimpeza das amostras produzidas com os 8 tipos de superfície foi avaliada a partir da aplicação de manchas de azul de metileno, um corante com base em cloreto de metiltionínio ($C_{16}H_{18}ClN_3S$). O corante foi utilizado em solução com água destilada, com concentração de 0,5 g/l (525,6 ppm). As manchas foram aplicadas com micropipeta, essencialmente em 4 pontos das amostras, distribuídas em metade de sua superfície (10 cm x 10 cm); 0,5 ml de solução foi utilizada para cada mancha (Silva *et al.*, 2022). Após aplicação do azul de metileno, as amostras foram mantidas em local escuro durante 2 dias, para possibilitar a sua secagem em ambiente protegido da incidência de radiação.

Em sequência, na outra metade da superfície das amostras (10 cm x 10 cm) aplicou-se tinta spray para graffiti, descrita pelo fabricante como um esmalte brilhante para interior e exterior, de cor prateada, com secagem completa em 45 minutos. Para isso, a área manchada com azul de metileno foi protegida com plástico, visando evitar a sua contaminação. A aplicação do graffiti foi realizada com a lata de spray em um ângulo de 45° a 15 cm da superfície, tendo sido aplicadas 3-4 passagens do spray em uma direção e 3-4 em direção perpendicular, durante 1 segundo cada, visando à completa cobertura da área em estudo (ASTM International, 2021; Gil *et al.*, 2023).

Após 3 horas da aplicação do graffiti, a exposição das amostras foi iniciada em ambiente natural, tendo duração total de 5 dias. A exposição foi realizada em Lisboa, Portugal (38°44'15.43" N, 9°8'25.76"W), com as amostras na horizontal para maximizar a incidência de radiação solar. Segundo os dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), não houve precipitação nos dias de exposição, sendo a temperatura média máxima de 24,9°C e a mínima de 13,8 °C. Durante todo o período, o índice ultravioleta foi considerado muito elevado pelo IPMA, com irradiância efetiva de 0,2 W/m².

Todas as amostras foram fotografadas nas mesmas condições de iluminação antes do manchamento com azul de metileno, imediatamente antes da exposição em ambiente natural, e após 1, 2 e 5 dias de exposição para avaliação de suas coordenadas cromáticas. Adotou-se o sistema de cores RGB, uma vez que as fotografias coloridas recolhidas têm a sua imagem composta por componentes vermelha (R, *red*), verde (G, *green*) e azul (B, *blue*) (Mills e Wells, 2015). As imagens foram avaliadas no *software* ImageJ, tendo sido extraídas as coordenadas cromáticas de quatro áreas de 120 pixels x 120 pixels para cada momento de avaliação, sempre na mesma posição das amostras, conforme ilustrado pela Figura 2. Dessa forma, tendo sido ensaiadas 2 amostras por tipo de superfície, os resultados foram discutidos considerando-se a média de 8 coordenadas cromáticas por configuração.

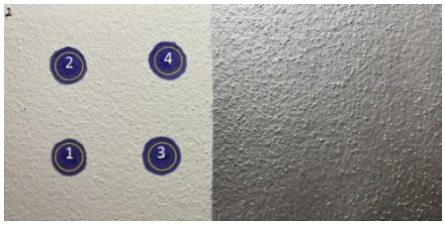


Figura 2 – Pontos de obtenção das coordenadas cromáticas, considerando o sistema RGB

A autolimpeza das amostras ao longo dos 5 dias de exposição foi avaliada considerando-se a variação de cor de cada uma das coordenadas ao longo do tempo. Ou seja, a diferença entre as coordenadas R, G e B após o manchamento (0 dias de exposição) e após 1, 2 e 5 dias em ambiente natural foi comparada com as coordenadas da amostra em seu estado original, visando observar a recuperação das características de cor. Para isso, a Equação 1 foi adaptada de Diamanti *et al.* (2013).

$$Variação\ de\ cor = \frac{(R,G,B)_{estado\ original} - (R,G,B)_{após\ manchamento\ e\ exposição}}{(R,G,B)_{estado\ original}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Finalmente, após 5 dias de exposição, procedeu-se à limpeza do graffiti. Seguindo a metodologia de Feltes *et al.* (2023) e Gil *et al.* (2023), a tinta foi removida com jato de vapor a baixa pressão (3 bar). A máquina foi aplicada combinando a emissão de vapor com escovagem em direções ortogonais, em um total de 6 passagens. Esse procedimento foi escolhido por ser considerado pouco invasivo e ambientalmente amigável (Gil *et al.*, 2013), apesar do produto anti-graffiti permanente utilizado não ser formulado para limpeza a vapor. Conforme mencionado anteriormente, nesse caso, a principal intenção foi investigar a interação da solução fotocatalítica com produtos de diferente composição na autolimpeza.

Após a limpeza e a secagem das amostras, procedeu-se à avaliação da sua eficiência seguindo a escala proposta por García e Malaga (2012) para materiais porosos considerados como património histórico. Essa escala classifica os tipos de superfície conforme a eficiência de limpeza do graffiti em: CN 0 (remoção completa da cor, 100%); CN 0,5 (resíduos de cor isolados, pequenos e puntiformes); CN 1 (resíduos puntiformes de cor); CN 1,5 (resíduos laminares de cor com eficiência de limpeza > 90%); CN 2 (resíduos laminares de cor); CN 3 (claro reconhecimento da cor, contornos coloridos evidentes com eficiência de limpeza entre 30 e 85%); CN 4 (superfície apenas levemente afetada pelo procedimento de limpeza com eficiência < 30%); CN 5 (sem efeito de limpeza) (García e Malaga, 2012). Após o procedimento de limpeza, os ângulos de contato com a água da superfície das amostras foram avaliados novamente, considerando-se a área mantida sem aplicação de azul de metileno e graffiti.

A Figura 3 resume os passos para avaliação da autolimpeza e remoção de graffiti das amostras. Nas Figuras 3a e 3b, são mostradas as superfícies logo após a aplicação do azul de metileno (antes da secagem do corante) e preparadas para exposição (já aplicadas com tinta para graffiti). A exposição

em ambiente natural é ilustrada pela Figura 3c, enquanto a remoção do graffiti com jato a vapor é mostrada na Figura 3d.

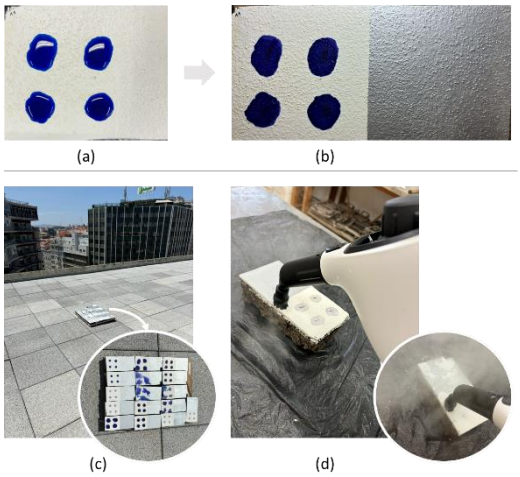


Figura 3 – Preparação das amostras para avaliação da autolimpeza e limpeza do graffiti: (a) Aplicação do azul de metileno; (b) Amostra pronta para exposição; (c) Exposição das amostras em ambiente natural; (d) Limpeza do graffiti com jato de vapor a baixa pressão

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta imagens obtidas para cada uma das amostras antes (estado original) e após a aplicação de azul de metileno e graffiti às superfícies, assim como após 1, 2 e 5 dias de exposição em ambiente natural. Apesar da aplicação do corante em solução aquosa ter sido padronizada, há variação na forma das manchas, o que pode indicar diferenças na interação das superfícies com a água.

As configurações com produto fotocatalítico como camada externa apresentaram maior espalhamento da solução de azul de metileno sobre a superfície, especialmente quando esse produto não foi combinado com proteção anti-graffiti. Conforme a Figura 5, que apresenta os ângulos de contato dos diferentes tipos de superfície com a água para as amostras no estado original, de modo geral, as maiores manchas corresponderam às amostras com os menores ângulos medidos. Por outro lado, os maiores ângulos de contato com a água, especialmente referentes às amostras de referência e produtos anti-graffiti, geraram manchas menores e de formato mais regular, como seria expectável. Apenas a tinta de silicato e o produto anti-graffiti permanente deram origem a superfícies hidrofóbicas em seu estado original, caracterizadas por ângulos de contato superiores a 90° e, assim, requerendo pressão externa para que a água penetre na porosidade da fachada (Silva *et al.*, 2016).

Porém, os ângulos de contato formados entre a superfície das amostras e as gotas de água possivelmente não explicam de forma completa o fenómeno observado na aplicação da solução de azul de metileno, especialmente considerando as configurações conjuntas entre diferentes mecanismos de proteção (fotocatalítico e anti-graffiti). Diferentes combinações entre a absorção por capilaridade e evaporação das soluções de azul de metileno poderiam complementar a explicação.

No Quadro 1, são apresentadas as médias das coordenadas cromáticas RGB obtidas para as diferentes superfícies avaliadas no estado original (sem aplicação de azul de metileno e graffiti). Tomando como base estes valores, a Figura 6 apresenta a variação nas coordenadas cromáticas após a aplicação das manchas de corante e com 1, 2 e 5 dias de exposição em ambiente natural. Quanto menor o percentual de variação de cor, mais próximas do aspeto original se encontram as superfícies das amostras; ou

seja, ao longo do tempo, maior a influência do produto de proteção na remoção das manchas e, provavelmente, a sua eficiência na autolimpeza.

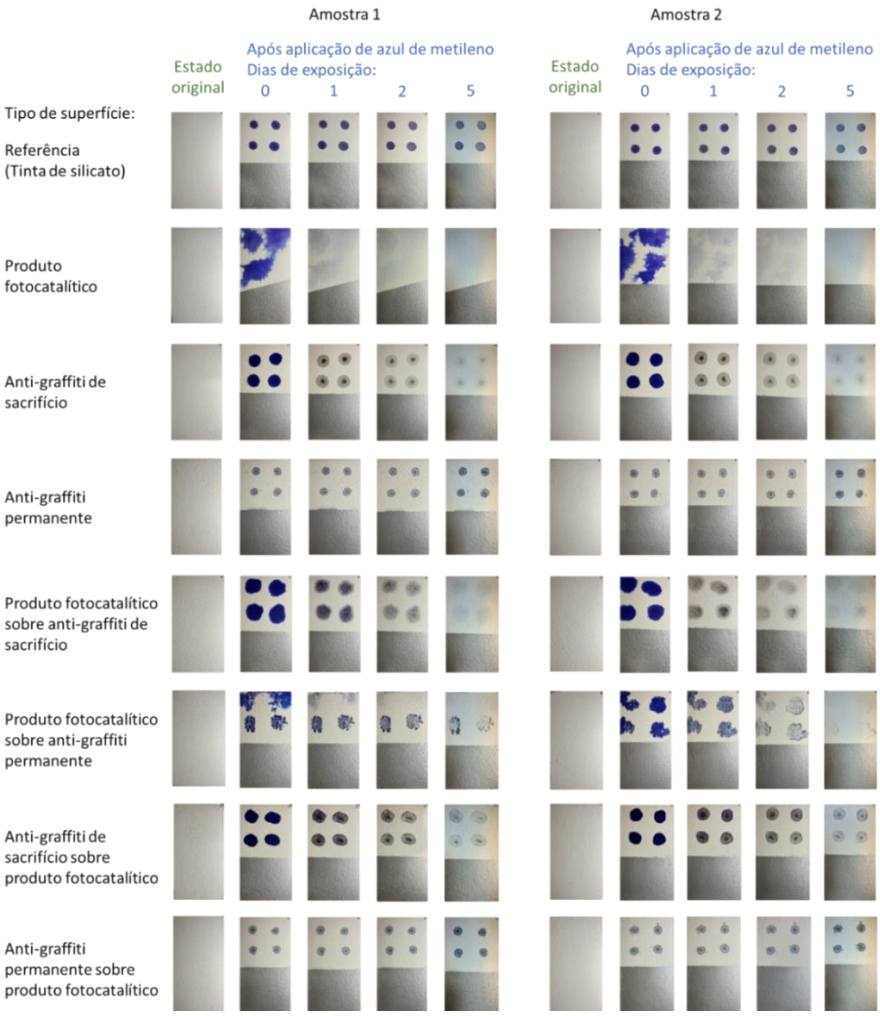


Figura 4 – Amostras de cada tipo de superfície antes e após aplicação de azul de metileno e aspeto durante exposição em ambiente natural

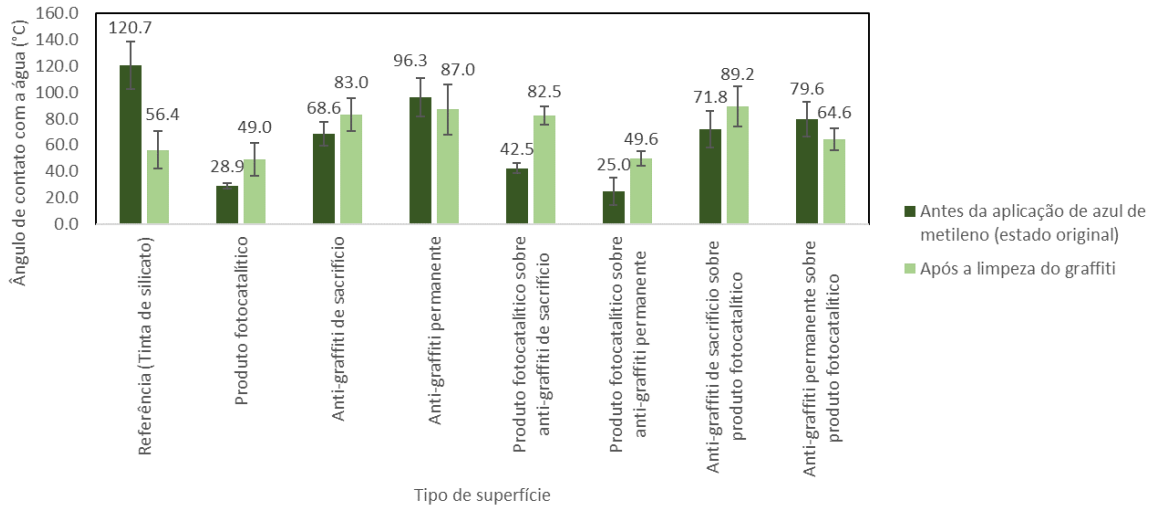


Figura 5 – Ângulos de contato dos diferentes tipos de superfície com a água no estado original e após a limpeza do graffiti

Quadro 1 – Coordenadas cromáticas no estado original

Tipo de superfície	R	G	B
Referência (Tinta de silicato)	182.45	180.78	172.77
Produto fotocatalítico	177.09	176.09	169.63
Anti-graffiti de sacrifício	180.10	179.17	170.90
Anti-graffiti permanente	182.19	179.88	172.03
Produto fotocatalítico sobre anti-graffiti de sacrifício	178.85	176.50	167.93
Produto fotocatalítico sobre anti-graffiti permanente	177.02	174.53	166.90
Anti-graffiti de sacrifício sobre produto fotocatalítico	177.03	175.48	167.05
Anti-graffiti permanente sobre produto fotocatalítico	183.16	181.36	173.75

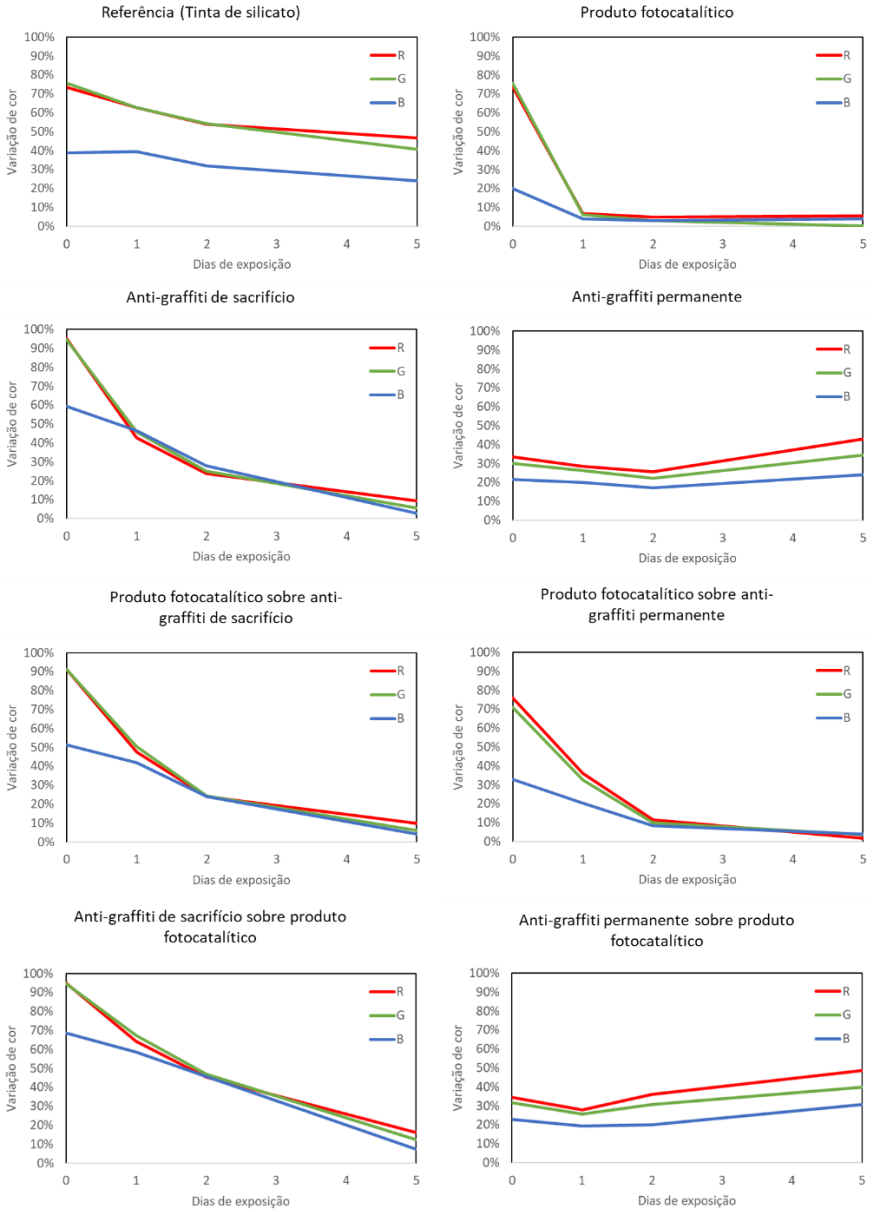


Figura 6 – Variação das coordenadas cromáticas de cada tipo de superfície após aplicação de azul de metileno, em comparação com as coordenadas no estado original, durante exposição natural

Conforme também apresentado na Figura 4, na Figura 6 pode observar-se que as superfícies contendo apenas produto fotocatalítico apresentaram recuperação quase completa (> 90%) das coordenadas R, G e B após 2 dias de exposição natural. Em geral, resultados similares foram atingidos pelas superfícies com produto fotocatalítico externamente à proteção anti-graffiti, porém, após 5 dias de exposição. A partir da Figura 6, portanto, é evidente a contribuição do produto fotocatalítico como catalisador na remoção das manchas de corante. O produto anti-graffiti permanente, quando na camada externa, apresentou uma interação negativa com o corante ao longo dos dias de exposição. Ou seja, as manchas se mostraram mais intensas, apesar do efeito esperado de remoção de uma parcela do azul de metileno mesmo na ausência de fotocatalisador, quando exposto à radiação UV (Barakat *et al.*, 2022).

Finalmente, a Figura 7 apresenta os resultados obtidos para remoção do graffiti, após limpeza com jato de vapor a baixa pressão. O produto anti-graffiti de sacrifício possibilitou a maior eficiência, resultando em classificações CN 0,5 e CN 1 sem ou com a presença de camada fotocatalítica, respetivamente, e independentemente da sequência. Moura *et al.* (2017) também observaram maior eficiência na remoção de tinta prateada para graffiti com um produto sacrificial à base de água, na forma de emulsão de organosiloxano, em comparação com produtos permanentes; nesse caso, porém, foi aplicado um jato de água a alta pressão (100 bar) (Moura *et al.*, 2017).

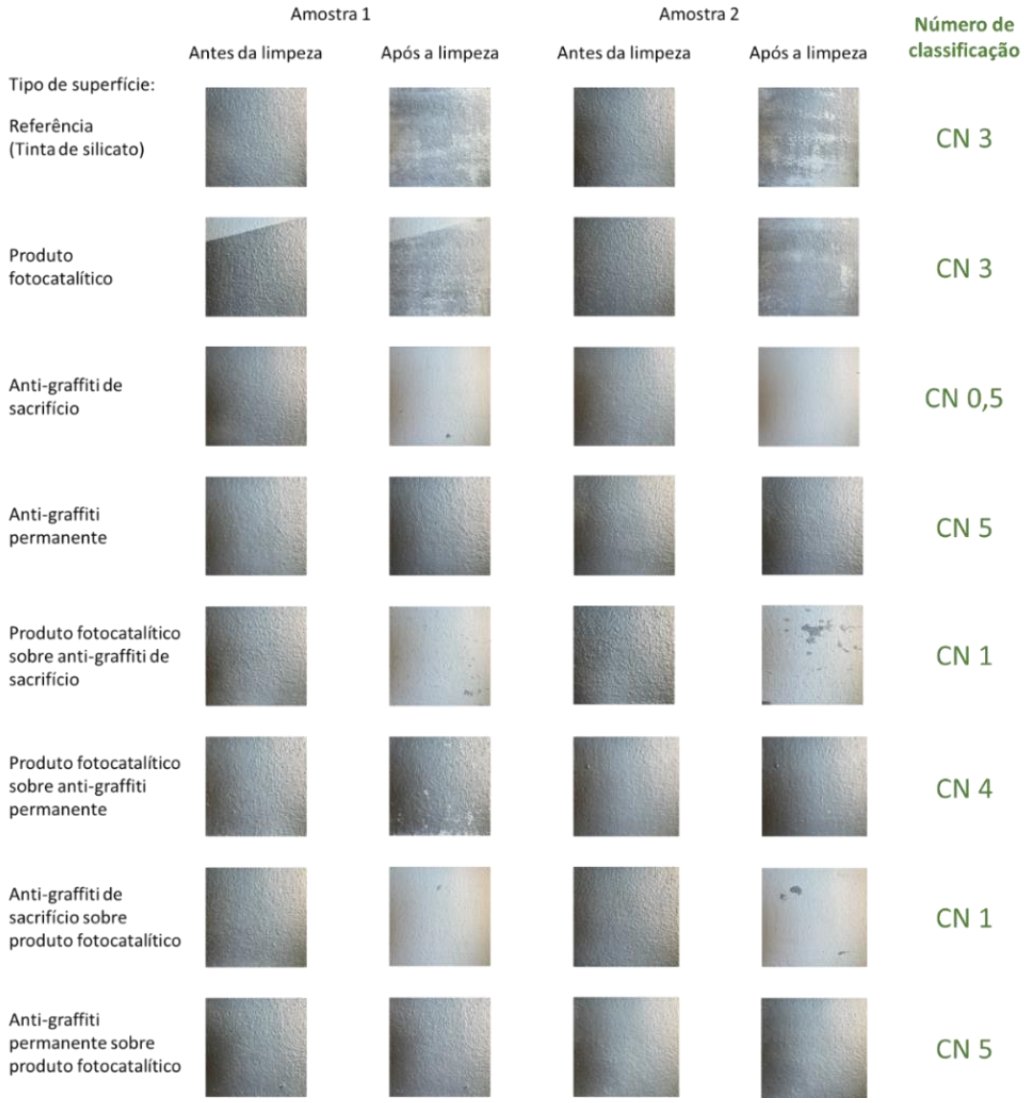


Figura 7 – Amostras antes e após a limpeza do graffiti, incluindo número de classificação (CN)

Entretanto, em todos os casos, na presença do anti-graffiti de sacrifício, observou-se um aumento nos ângulos de contato da superfície com a água após o procedimento de limpeza, conforme Figura 5. A Figura 8 ilustra o ângulo final obtido para a configuração com produto fotocatalítico sobre o anti-graffiti de sacrifício; possivelmente, houve remoção de ambas as camadas quando combinadas, porém mantendo ângulos de contato inferiores aos da amostra de referência no estado inicial. De facto, produtos anti-graffiti de sacrifício têm como característica a sua remoção conjunta com as tintas, necessitando a sua reaplicação (García *et al.*, 2010).

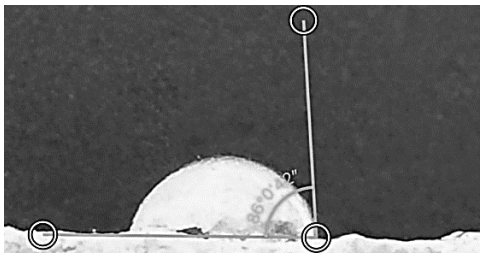


Figura 8 – Ângulo de contato da superfície com produto fotocatalítico sobre anti-graffiti de sacrifício após procedimento de limpeza do graffiti

Na configuração de referência e nas amostras protegidas somente com produto fotocatalítico, apesar de não haver proteção específica anti-graffiti, obtiveram-se classes CN3. O acompanhamento do procedimento de limpeza sugeriu que o vapor, combinado com a escovagem proporcionada pelo equipamento, pode ter removido mecanicamente uma camada superficial dos revestimentos. Isso é corroborado pela Figura 5, que demonstra diminuição das capacidades hidrofílica e hidrofóbica do produto fotocatalítico e da tinta de silicato, respetivamente, modificando sua interação com a água.

Para o anti-graffiti permanente, como seria expectável, o procedimento de limpeza adotado não foi eficiente para remoção da tinta, resultando em classificações CN4 e CN5. Além do produto não ter sido formulado para limpeza a vapor, o fabricante recomenda a aplicação de produtos químicos para a limpeza. Por outro lado, as superfícies protegidas externamente com o produto à base de poliuretano conservaram melhor os ângulos de contato com a água, conforme Figura 5, provavelmente por não ter existido remoção da camada superficial de acabamento em argamassa de cal e tinta de silicato.

4 CONCLUSÕES

Este artigo investigou soluções de proteção para acabamentos de fachada com base em argamassa de cal e tinta de silicato, tendo em conta aplicações de graffiti não autorizadas e manchas originadas da deposição de sujidade e particulados de poluição. Foram estudados produtos fotocatalítico e anti-graffiti de sacrifício e permanente, individualmente e em combinação, incluindo variação na sequência de aplicação. O objetivo foi verificar seu desempenho, considerando especialmente a influência dos tipos de superfície no mecanismo de autolimpeza.

Com a aplicação de manchas de azul de metileno e exposição natural, as amostras protegidas somente via fotocatálise recuperaram quase completamente as suas coordenadas RGB após 2 dias. Resultados similares foram atingidos com produto fotocatalítico externo aos anti-graffiti, porém, em maior tempo. É evidente a contribuição do fotocatalisador na remoção do corante, havendo prejuízo à velocidade da oxidação quando aplicado sobre anti-graffiti. Do ponto de vista da autolimpeza e tendo em conta a sequência, recomenda-se aplicar o produto fotocatalítico sobre o anti-graffiti para utilização dos dois tipos de proteção combinados. Considerando a interação do fotocatalisador com o produto anti-graffiti permanente à base de verniz de poliuretano, aplicado como camada externa, houve aumento das coordenadas RGB do corante após 5 dias de exposição, inversamente ao desejado.

A remoção de tinta graffiti de cor prateada foi testada com limpeza por jato de vapor a baixa pressão. O anti-graffiti de sacrifício possibilitou a maior eficiência na remoção, porém, com aumento nos ângulos de contato com a água após a limpeza; possivelmente, houve remoção de parte das camadas superficiais sacrificial e fotocatalítica. Nas configurações de referência e somente com produto fotocatalítico, o acompanhamento da limpeza indicou que o vapor, combinado com a escovagem proporcionada pelo equipamento, também pode ter removido mecanicamente uma camada superficial. Quanto ao anti-graffiti permanente, que não foi formulado para limpeza a vapor, o procedimento de limpeza adotado não foi eficiente para remoção da tinta; por outro lado, esse produto proporcionou melhor conservação dos ângulos de contato com a água.

Como trabalhos futuros, os resultados devem ser analisados com ensaios de absorção por capilaridade *versus* evaporação da solução de corante, testando-se também produtos anti-graffiti permanentes para esquemas muito permeáveis ao vapor de água. A durabilidade das proteções deve ser avaliada com novo ciclo de aplicação de manchas, exposição em ambiente natural e limpeza do graffiti. Finalmente, devem ser avaliadas as alterações de desempenho dos sistemas com as várias soluções de proteção, verificando se a permeabilidade ao vapor de água e a absorção de água por capilaridade dos sistemas de revestimento resultantes se mantêm dentro dos intervalos previstos para os ETICS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020) e da bolsa 2023.05316.BD (DOI: 10.54499/2023.05316.BD); à unidade de investigação CERENA (UIDB/04028/2020), IST; ao LNEC; ao PPGCI, UFRGS, CAPES e CNPq. Os autores agradecem à Kerakoll e à CIN pelo fornecimento de materiais.

REFERÊNCIAS

ASTM International. (2021). ASTM D7089-06 (2021): Standard Practice for Determination of the Effectiveness of Anti-Graffiti Coating for Use on Concrete, Masonry and Natural Stone Surfaces by Pressure Washing. ASTM, West Conshohocken.

Austria, G.C. (2015). Argamassa autolimpante para revestimento de fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO_2). MsC Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Barakat, N.A.M., Tolba, G.M.K., Khalil, K.A. (2022). Methylene Blue Dye as Photosensitizer for Scavenger-Less Water Photo Splitting: New Insight in Green Hydrogen Technology. Polymers, 14(3):523. https://doi.org/10.3390/polym14030523

Diamanti, M.V., Del Curto, B., Ormellese, M., Pedeferri, M.P. (2013). Photocatalytic and self-cleaning activity of colored mortars containing TiO_2. Construction and Building Materials, 46:167–174. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.038

Feltes, J., Borsoi, G., Caiado, P., Dionísio, A., Parracha, J., Flores-Colen, I. (2023). Graffiti removal on external thermal insulation composite systems through chemical-mechanical methods: A feasible protocol? Journal of Building Engineering, 66:105872. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105872

Fernandes, C.N., Ferreira, R.L.S., Bernardo, R.D.S., Avelino, F., Bertini, A.A. (2020). Using TiO_2 nanoparticles as a SO_2 catalyst in cement mortars. Construction and Building Materials, 257:119542. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119542

García, O., Malaga, K. (2012). Definition of the procedure to determine the suitability and durability of an anti-graffiti product for application on cultural heritage porous materials. Journal of Cultural Heritage, 13(1):77–82. https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.004

García, O., Rz-Maribona, I., Gardei, A., Riedl, M., Vanhellemont, Y., Santarelli, M.L., Suput, J. S. (2010). Estudio comparativo de la variación de las propiedades hídricas y el aspecto de la piedra natural y el ladrillo tras la aplicación de 4 tipos de anti-grafiti. Materiales de Construccion, 60(297):69–82. https://doi.org/10.3989/mc.2010.45507

Gil, B.C., Borsoi, G., Parracha, J.L., Dionísio, A., Veiga, R., Flores-Colen, I. (2023). Effectiveness and durability of anti-graffiti products applied on ETICS: towards a compatible and sustainable graffiti removal protocol. Environmental Science and Pollution Research, 30(24):65160–65176. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26889-3

González-Sánchez, J.F., Taşcı, B., Fernández, J.M., Navarro-Blasco, Alvarez, J.I. (2021). Improvement of the depolluting and self-cleaning abilities of air lime mortars with dispersing admixtures. Journal of Cleaner Production, 292:126069. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126069

La Russa, M.F., Ruffolo, S.A., Rovella, N., Belfiore, C.M., Palermo, A.M., Guzzi, M.T., Crisci, G.M. (2012). Multifunctional TiO_2 coatings for Cultural Heritage. Progress in Organic Coatings, 74(1):186–191. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.12.008

Mills, A., Wells, N. (2015). Reductive photocatalysis and smart inks. Chemical Society Reviews, 44(10):2849–2864. https://doi.org/10.1039/c4cs00279b

Moura, A., Flores-Colen, I., de Brito, J., Dionisio, A. (2017). Study of the cleaning effectiveness of limestone and lime-based mortar substrates protected with anti-graffiti products. Journal of Cultural Heritage, 24:31–44. https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.04.004

Moura, A.R., Flores-Colen, I., De Brito, J. (2014). Anti-graffiti products for porous surfaces. An overview. In A. E. Charola e J. D. Rodrigues (Eds.), Hydrophobe VII 7th International Conference on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building Materials (pp. 225–233). LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

Munafò, P., Goffredo, G.B., Quagliarini, E. (2015). TiO_2-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: An overview. In Construction and Building Materials, 84:201–218. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.083

Pereira, C., Silva, A., De Brito, J., Silvestre, J.D. (2020). Urgency of repair of building elements: Prediction and influencing factors in façade renders. Construction and Building Materials, 249:118743. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118743

Silva, A.S., Borsoi, G., Parracha, J.L., Flores-Colen, I., Veiga, R., Faria, P., Dionísio, A. (2022). Evaluating the effectiveness of self-cleaning products applied on external thermal insulation composite systems (ETICS). Journal of Coatings Technology and Research, 19(5):1437–1448. https://doi.org/10.1007/s11998-022-00617-x

Silva, L., Flores-Colen, I., Vieira, N., Timmons, A.B., Sequeira, P. (2016). Durability of ETICS and Premixed One-Coat Renders in Natural Exposure Conditions. In J. Delgado (Ed.), New Approaches to Building Pathology and Durability. Building Pathology and Rehabilitation (Vol. 6, pp. 131–158). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7_7

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS COM ESCÓRIA DE FORNO PANELA (EFP)

Marcele Soares[a]; Mylena A. de Castro[b]; Everton F. C. Sousa[c]; Tayná F. Silva[d]; Gisleiva C. S. Ferreira[e]; Eduardo F. Mariano[f]; Marinara A. N. Moura[g]; Armando L. Moreno Jr.[h]

[a]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, m183564@dac.unicamp.br

[b]FT, Universidade Estadual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, 13484-332, Limeira, Brasil, m222684@dac.unicamp.br

[c]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, e233480@dac.unicamp.br

[d]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, t261851@dac.unicamp.br

[e]FT e FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, m222684@dac.unicamp.br

[f]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, m222684@dac.unicamp.br

[g]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, m222684@dac.unicamp.br

[h]FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, 13083-889, Campinas, Brasil, m222684@dac.unicamp.br

RESUMO

Com o objetivo de inferir conceitos de economia circular à construção civil, há vários estudos sobre o uso de resíduos sólidos como matéria-prima deste setor. Entre tais resíduos, destaca-se a Escória de Forno Panela (EFP), resíduo gerado pelo setor siderúrgico. A EFP pode ser utilizada como aglomerante complementar (AC) em materiais cimentícios, devido altos teores de CaO e $Ca(OH)_2$ (também presentes no cimento Portland). Entretanto, são necessários outros estudos para verificar o desempenho e durabilidade destes materiais. Ao focar o uso da EFP como AC de argamassas mistas (CP+cal), identifica-se uma lacuna de informações relacionadas ao desempenho em situação de incêndio. Deste modo, esta pesquisa tem o objetivo de determinar as propriedades mecânicas residuais de argamassas com EFP, quando expostas a altas temperaturas. A etapa experimental envolveu 8 traços de argamassa, sendo 4 deles com EFP em substituição ao Cimento Portland (CP) (30% em massa) e os outros 4 traços com EFP em substituição a cal (100% em massa). Após 90 dias de cura no ambiente interno do laboratório, os corpos de prova cilíndricos (50 x 150 mm) foram submetidos a temperatura de 200°C, 400°C e 600 °C, conforme procedimentos da RILEM TC 200 HTC:2007, Parte 2. Em seguida ao resfriamento lento dos corpos de prova (24 h dentro do forno), os mesmos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial com determinação do módulo de elasticidade. Os resultados indicaram que os traços com EFP em substituição ao CP apresentaram melhor comportamento mecânico residual do que aqueles com EFP em substituição à cal, quando comparados aos traços sem EFP. Esses resultados são promissores, pois neste caso há maior consumo de EFP, portanto, os indicadores de sustentabilidade são promissores.

Palavras-chave: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão residual, resíduo industrial.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores econômicos, que gera impactos positivos na economia e sociedade. Em contrapartida, também contribui significativamente com impactos negativos como geração de altos volumes de resíduos e gases de efeito estufa - GEE (ISO 15392, 2008; ISO 21929, 2011). No cenário mundial, a construção civil é responsável por 40% da geração e emissão de GEE e 30% do consumo de água (Comissão Europeia, 2019). Com isso, a sustentabilidade envolvendo o setor da construção civil, é protagonista na sociedade moderna, para reduzir os impactos ambientais, sociais e econômicos do ambiente construído (Lozano-Lunar *et al.*, 2019; Khan e Mcnally, 2023).

Neste contexto, uma das opções para reduzir tais impactos é promover o reuso de resíduos da própria construção civil ou de outros setores produtivos (Chen *et al.*, 2021). Em situação similar, encontra-se o setor siderúrgico, que também busca por alternativas para mitigar os impactos negativos relacionados às suas atividades (Vögele *et al.*, 2020; Worldsteel, 2023). Entre os tipos de resíduos gerados por esse setor, destaca-se a Escória de Forno Panela (EFP), com geração mundial estimada em 30 milhões de toneladas anuais (Worldsteel, 2023; Maghool *et al.*, 2017; Mahoutian & Shao, 2016; Najm *et al.*, 2021).

A EFP tem origem nos fornos de aciaria, os quais são utilizados no processo secundário de refino do aço (Rodriguez *et al.*, 2009; Anastasiou, Papayianni, Papachristoforou, 2014; Vilaplana *et al.*, 2015). De forma geral, a EFP é composta principalmente de óxidos (CaO) e hidróxidos de cálcio ($Ca(OH)_2$), além de menores teores dos óxidos de alumínio, sílica e ferro. Com isso, fica evidenciado a possibilidade do uso deste tipo de escória como material cimentício suplementar (MCS), a depender da granulometria de cada lote (Herrero *et al.*, 2016; FANG *et al.*, 2021; Sideris *et al.*, 2018; Henríquez *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2023; Vaclavík et al., 2024). Há vários estudos sobre o uso deste tipo de escória em concretos (Sideris *et al.* 2018; Naik *et al.*, 2023), entretanto, há poucos estudos com argamassas (Herrero *et al.*, 2016; Vaclavík et al., 2024).

Mas há um interesse crescente em viabilizar o uso da EFP, como MCS em argamassas, principalmente pelo fato da demanda mundial de uso deste tipo de matéria, escassez de matéria-prima para este fim, o que aumenta os impactos ambientais do setor da construção civil, além das argamassas apresentarem na maioria das vezes, funções não estruturais nas edificações. Juntamente ao uso da EFP, verifica-se a necessidade de estudos sobre a combinação terciária de aglomerantes, por exemplo a adição de material pozolânico, para potencializar a eficiência tanto do cimento Portland como do MCS. Isso pode ser viável devido o alto teor de CaO e $Ca(OH)_2$, presentes na EFP, que na presença de pozolanas com altos teores de óxidos de silício e de alumínio, potencializam a formação de Silicatos de Cálcio Hidratado (C-S-H) (Tebbal e Rahmouni, 2019; Souza *et al.*, 2023).

É evidente que a EFP tem um comportamento promissor como aglomerante em argamassas, entretanto, há exigências de desempenho, considerando os aspectos de segurança, conforto térmico e acústico, conforme requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2024), que ainda exigem mais estudos. Logo, é possível incluir testes sob elevadas temperaturas, visto que as argamassas integram grande parte das construções, e em casos de incêndio podem representar riscos como de colapso da alvenaria que este material sustenta (Lima *et al.*, 2024).

Com esta possibilidade de uso, este projeto de pesquisa preconiza estudos sobre o desempenho das argamassas com EFP submetidas a elevadas temperaturas, com o objetivo de determinar a resistência à compressão e módulo de elasticidade residuais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nas argamassas foram: Cimento Portland (CP), Cal Hidratada (CH), Metacaulim (MK), Escória de Forno Panela (EFP), Areia Quartzosa (AQ) e Água. A amostra de EFP foi fornecida por empresa do setor siderúrgico, obtida pelo método de resfriamento lento (ao ar). Após secagem em estufa (105°C por 24h), o material bruto foi submetido a um pré-processamento, que consistiu em peneiramento prévio para separação de restos de metais (peneira com abertura 0,6 mm), seguido de moagem em moinho de bolas (ciclo de 10 min e velocidade de 200 RPM).

A massa especifica dos materiais utilizados na pesquisa foram (CP: 3,01g/cm³, EFP: 2,75g/cm³, CH: 2,50g/cm³, MK: 2,73g/cm³ e AQ: 2,65g/cm³). As curvas granulométricas das amostras de EFP, antes (EFPb) e após (EFPp) o pré-processamento, Metacaulim, Cimento Portland e Cal estão representadas na Figura 1.

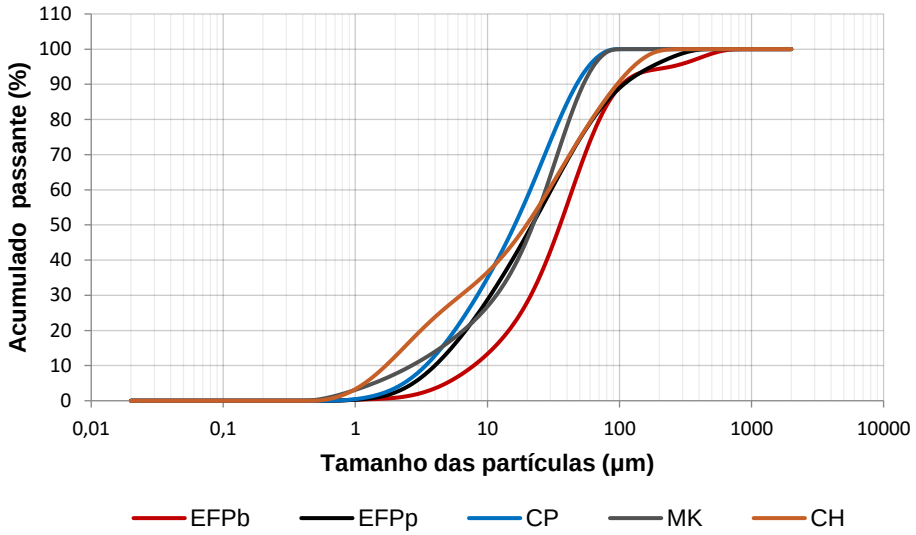


Figura 1 – Curva granulométrica dos materiais utilizados nas argamassas.

Para caracterização química dos materiais utilizados nesta pesquisa realizou-se os ensaios de FRX e PF, cujos resultados estão apresentados no Quadro 1. Já a Figura 2 apresenta o difratograma da amostra de EFP, obtido a partir da análise de DRX.

Quadro 1 – Composição química dos materiais aglomerantes utilizados nas argamassas.

Composição Química (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO	PF (%)
EFP	9.78	0.80	7.59	54.60	5.79	0.60	7.29	12.0
CP	15.30	3.62	2.32	57.5	4.28	2.65	<0.10	12.5
CH	1.01	0.15	0.25	38.7	27.3	0.04	0.03	32.4
MK	69.2	24.1	2.02	<0.10	0.23	<0.10	<0.10	1.18

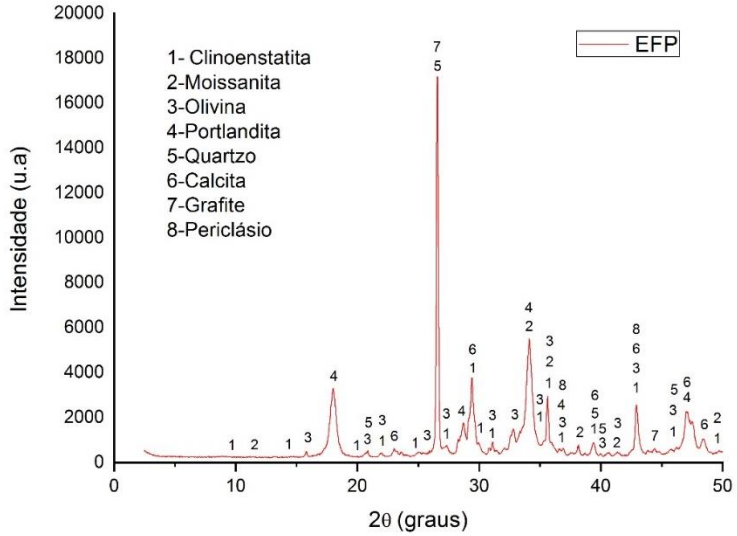


Figura 2 – Difratograma da amostra de EFP.

Foram estudados oito traços, descritos conforme Quadro 2. Os quatro primeiros traços, o CP foi substituído pela EFP, no teor de 30% e também foi adicionado MK no teor 10%. Já os quatro traços subsequentes, foi substituída a cal hidratada (CH) no teor de 100% por EFP, além de substituir o CP por MK no teor de 10%. A relação água/aglomerante foi definida conforme NBR 13276 (ABNT, 2016).

Quadro 2 – Composição dos traços de argamassas, em volume.

Identificação	Aglomerante				Areia	Água/aglomerante
	Cimento	EFP	Cal	Metacaulim		
REF30	1	0	2	0	6	0,87
REF30-MK	1	0	2	0,10	6	0,93
EFP30	0,70	0,30	2	0	6	0,90
EFP30-MK	0,70	0,30	2	0,10	6	0,91
REF100	1	0	0,5	0	3	0,78
REF100-MK	0,9	0	0,5	0,1	3	0,78
EFP100	1	0,5	0	0	3	0,75
EFP100-MK	0,9	0,5	0	0,1	3	0,75

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos (50 mm x 150 mm), cujas dimensões foram adaptadas conforme RILEM TC 200 HTC:2007, Parte 2. Foram moldados 192 corpos de prova, considerando 6 corpos de prova para cada temperatura e traço. Estes corpos de prova foram utilizados para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (Ed), módulo de elasticidade estático (E) e resistência à compressão (Rc), antes e após exposição a altas temperaturas, conforme Figuras 3a e 3b, respectivamente. Os ensaios de ultrassom foram realizados conforme NBR 15630 (ABNT, 2008), utilizando o equipamento USLab (Agricef, Brasil), com transdutores de faces planas de 45 kHz de frequência. Estes ensaios ocorreram após um período mínimo de 90 dias de cura, para garantir que a maior % das reações químicas de hidratação dos aglomerantes tenham ocorrido.

A exposição dos corpos de os corpos de prova a altas temperaturas ocorreu em forno elétrico, disponível no Laboratórios de Estruturas da FECFAU/Unicamp (Figura 4). Foi utilizada uma taxa de aquecimento e resfriamento de 4°C/min, com patamar de 60 min. Estes ensaios foram realizados para 4 faixas de temperatura: 20 °C (temperatura ambiente), 200 °C, 400 °C e 600 °C.

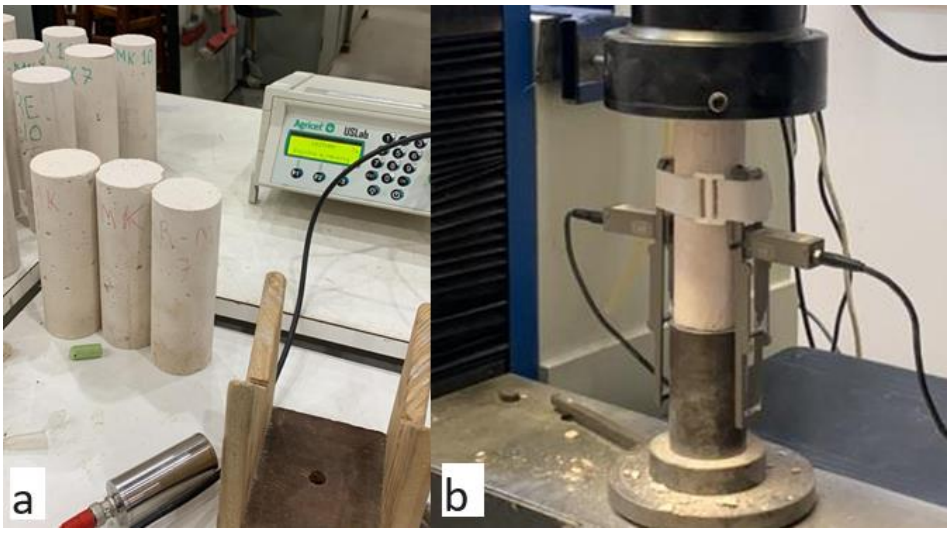


Figura 3 – a. Equipamento de ultrassom para determinação da VPU e Ed. b. Ensaio de resistência mecânica e módulo de elasticidade estático.

Figura 4 - Disposição dos corpos de prova no forno elétrico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

O Quadro 3 e a Figura 5 apresentam os valores de resistência à compressão nominal e residual das argamassas expostas a altas temperaturas, conforme metodologia adotada nesta pesquisa, além dos valores em temperatura ambiente.

Quadro 3 – Resistência à compressão nominal e residual das argamassas estudadas, conforme temperatura de exposição.

Resistência à compressão (MPa)				
Identificação	**20°C**	**200°C**	**400°C**	**600°C**
REF30	1,75	1,72/0,98*	1,29/0,74*	0,63/0,36*
REF30-MK	2,19	2,05/0,94*	1,54/0,70*	0,89/0,41*
EFP30	2,33	2,17/0,93*	1,82/0,78*	0,92/0,39*
EFP30-MK	2,11	2,08/0,99*	1,49/0,70*	0,84/0,40*
REF100	9,4	9,7/1,03*	6,8/0,72*	0,9/0,10*
REF100-MK	7,7	7,3/0,95*	5,7/0,74*	2,3/0,30*
EFP100	12,5	11,1/0,89*	8,4/0,67*	1,7/0,14*
EFP100-MK	11,5	10,1/0,88*	8,0/0,70*	2,9/0,25*

*Resistência à compressão residual em função da faixa de temperatura.

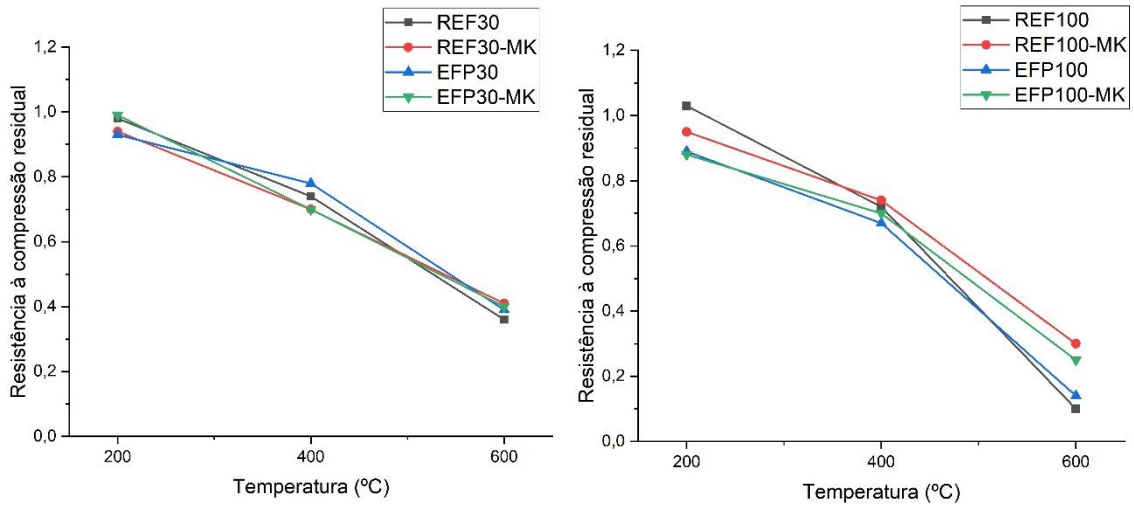


Figura 5 – Resistência à compressão residual das argamassas, conforme temperatura de exposição.

Aos 90 dias de cura (temperatura ambiente), as argamassas com traço 1:0,5:3 apresentaram valores de Rc significativamente maiores daquelas argamassas com traço 1:2:6, o que era esperado em função do maior consumo de cimento Portland do primeiro traço. Entretanto, quando se compara os valores de Rc residuais entre os 2 tipos de argamassas, verifica-se que as argamassas com maior consumo de CP (1:0,5:3) e com substituição da cal por EFP apresentou maior perda de resistência (0,89) do que a argamassa com menor consumo de CP (0,93), considerando a temperatura de 200 °C. Esse

comportamento se mantém para os traços com MK. Aos 400 °C o comportamento dos 2 tipos de argamassas foi igual em relação à resistência residual, mas aos 600 °C o processo de degradação das argamassas com maior consumo de CP (1:0,5:3) e presença de EFP foi maior do que as argamassas com menor consumo de CP e maior consumo de cal (1:2:6). O comportamento em relação à menor temperatura (200 °C) pode ser explicado em função do traço de menor resistência mecânica apresentar maior porosidade, o que facilitou a liberação dos vapores de água formados no processo de aquecimento (água livre e parte da água adsorvida). Esse processo entra em equilíbrio entre os 2 tipos de argamassas na faixa de 400 °C. Mas para a temperatura de 600 °C, a perda total da água adsorvida e decomposição do C-S-H e do $Ca(OH)_2$ provoca maior deterioração nas argamassas com menor teor de CP, ou seja, com menor proporção dos compostos resultantes da hidratação da matriz cimentícia, responsáveis pelas propriedades mecânicas e durabilidade. Ao analisar o comportamento das argamassas com EFP+MK, verifica-se um melhor comportamento nas temperaturas mais altas (400 °C e 600 °C), quando comparadas com os traços sem EFP. Isso pode ser justificado pela formação de compostos, em função da temperatura, em locais como a zona de transição entre pasta e agregado miúdo e poros, deixando a matriz mais densa (Pachta *et al.*, 2018).A presença do MK também pode justificar o comportamento em relação às poropressões causadas em temperaturas mais baixas, isso porque o MK provoca reações químicas pozolânicas quando em contato com o $Ca(OH)_2$ depositado nos poros das argamassas, o que reduz o volume desses poros e, consequentemente, do teor de água livre (Khatib, Baalbaki e Elkordi, 2018). Além disso, há o efeito fíler, que também reduz a formação de poropressões negativas. Andreini *et al.* (2015) realizaram um estudo de argamassas expostas a altas temperaturas e verificaram aumento da Rc até os 400 °C.

Os Quadros 4 e 5 e Figuras 6 e 7 apresentam os valores de módulo de elasticidade estático (E) e dinâmico (Ed) das argamassas, respectivamente.

Quadro 4 – Resultados de módulo de elasticidade estático residual das argamassas estudadas.

Módulo de elasticidade estático (GPa)				
Identificação	**20°C**	**200°C**	**400°C**	**600°C**
REF30	1,53	1,59/1,03*	0,80/0,53*	0,10/0,07*
REF30-MK	2,30	1,74/0,76*	0,89/0,39*	0,26/0,11*
EFP30	2,54	1,82/0,72*	0,98/0,38*	0,24/0,09*
EFP30-MK	2,64	1,78/0,67*	0,87/0,33*	0,21/0,08*
REF100	6,44	5,11/0,79*	2,85/0,44*	0,18/0,03*
REF100-MK	5,11	4,55/0,89*	2,49/0,49*	0,32/0,06*
EFP100	7,09	6,18/0,87*	3,7/0,52*	0,17/0,02*
EFP100-MK	6,91	5,82/0,84*	3,27/0,47*	0,43/0,06*

*Módulo de elasticidade estático residual em função da faixa de temperatura.

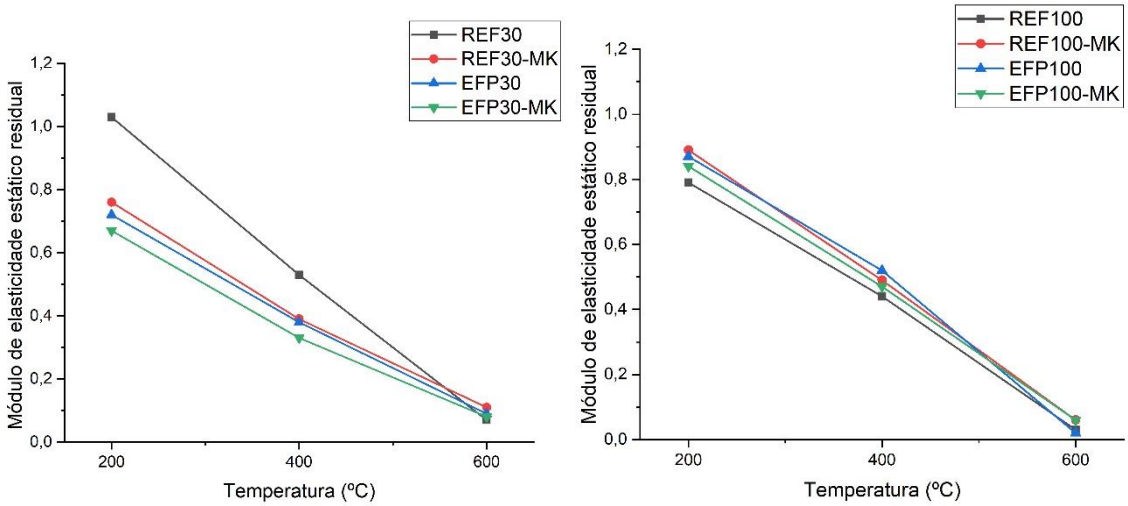


Figura 6 – Módulo de elasticidade estático das argamassas, por faixa de temperatura.

Quadro 5 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico residual das argamassas estudadas.

Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)								
Identificação	**ρ (Kg/m³)**	**20°C**	**ρ (Kg/m³)**	**200°C**	**ρ (Kg/m³)**	**400°C**	**ρ (Kg/m³)**	**600°C**
REF30	1.685,55	4,43	1.690,41	3,77/0,85*	1.678,71	2,16/0,49*	1.686,97	0,35/0,08*
REF30-MK	1.540,55	4,99	1.634,76	3,82/0,76*	1.608,91	2,45/0,49*	1.603,19	0,64/0,13*
EFP30	1.538,79	5,17	1.579,82	4,28/0,83*	1.529,45	2,46/0,48*	1.571,58	0,70/0,13*
EFP30-MK	1.707,29	5,07	1.543,11	3,84/0,76*	1.616,29	2,34/0,46*	1.526,21	0,48/0,09*
REF100	1.870,63	12,4	1.905,20	10,8/0,87*	1.889,04	6,2/0,50*	1.886,71	0,4/0,03*
REF100-MK	1.775,89	11,4	1.795,53	9,7/0,85*	1.782,11	5,6/0,49*	1.783,66	0,9/0,08*
EFP100	1.900,59	15,6	1.923,89	12,6/0,81*	1.895,37	7,8/0,50*	1.915,21	0,3/0,02*
EFP100-MK	1.878,33	14,9	1.916,34	12,1/0,81*	1.888,61	6,9/0,46*	1.881,34	1,2/0,08*

*Módulo de elasticidade dinâmico residual em função da faixa de temperatura.

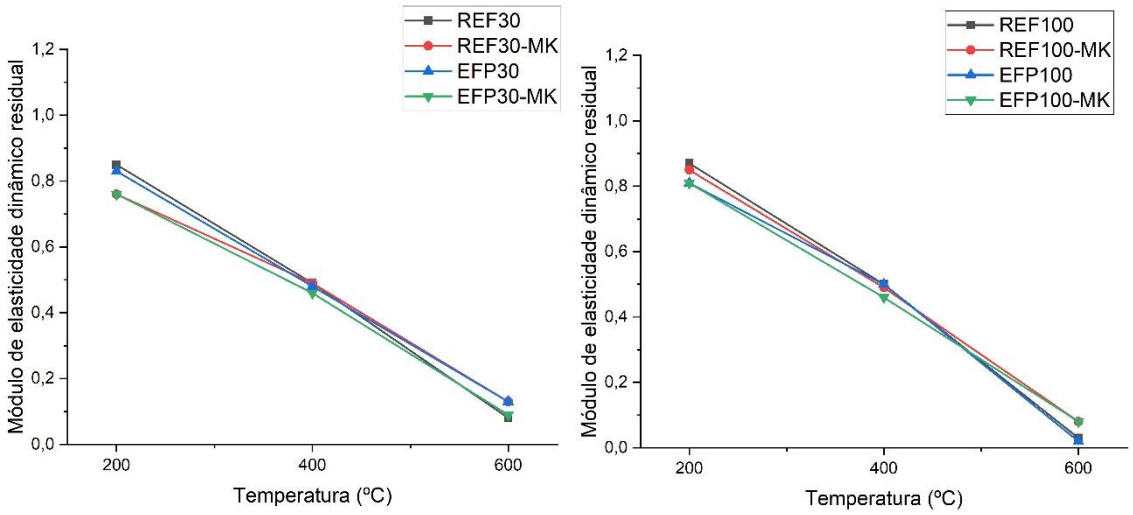


Figura 7 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, por faixa de temperatura.

Em relação ao E, os traços com EFP, tanto em substituição ao CP, quanto à cal, apresentaram os maiores valores em todas as temperaturas analisadas. Já os menores valores foram observados nos traços REF30 e REF100-MK. Em relação ao Ed, o uso de escória sem combinação com MK aumentou esta propriedade elástica das argamassas. Esse comportamento pode ser justificado pela maior sensibilidade do pulso ultrassônico em identificar microfissuras internas às argamassas, o que não é identificado nos ensaios de compressão axial (ensaio destrutivo).

Ao considerar o desempenho das argamassas com EFP em relação ao Ed, verifica-se que as argamassas com menor consumo de CP apresentaram maior Ed residual na temperatura de 600 °C, o que aponta menor degradação destas argamassas em relação às demais. Isso pode ser explicado pelos mesmos que foram relacionados à Rc residual.

As Figuras 8 e 9, apresentam a análise estatística (Fisher Test), para determinar o coeficiente de determinação (R^2) entre os valores de E e Ed residuais, na temperatura de 600 °C, das argamassas 1:2:6 e 1:0,5:3, respectivamente.

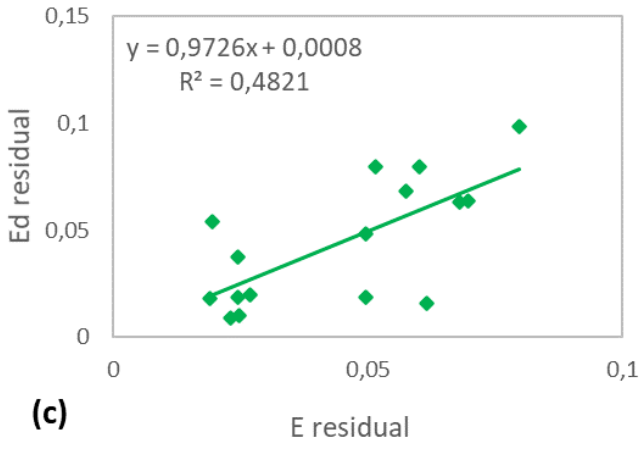


Figura 8 – Correlação entre o E x Ed, das argamassas em que a EFP substituiu o CP, considerando a temperatura de exposição de 600 °C.

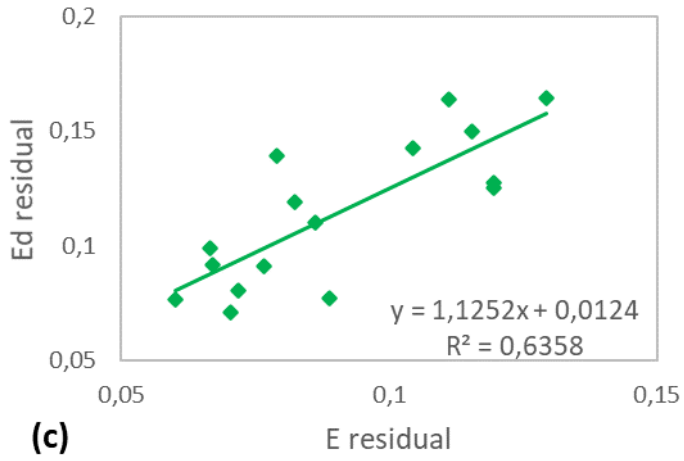


Figura 9 – Correlação entre o E x Ed, das argamassas em que a EFP substituiu a cal, considerando a exposição a temperatura de 600 °C.

Ao analisar os valores de R^2 obtidos nas Figuras 8 e 9, verifica-se que as relações entre esses dois parâmetros não foram satisfatórias (0,43 e 0,64), quando o desejado são valores próximos de 1. Analisando os gráficos, identifica-se uma dispersão dos valores, que pode ser justificado pelas diferenças de interferência da degradação das argamassas nos 2 métodos de ensaios (ultrassom e compressão axial), em função da temperatura de exposição. O pulso ultrassônico apresenta maior sensibilidade em relação à microfissuração ocorrida nas temperaturas mais baixas, o que não é identificado no ensaio destrutivo.

4 CONCLUSÕES

Após análises dos resultados, é possível concluir que a substituição do CP e da cal por EFP, melhorou o desempenho das argamassas em relação às condições de incêndio que foram expostas neste estudo (Rc e Ed), em relação ao traço sem EFP. Isso ocorreu em função das reações químicas de hidratação, no caso da EFP em substituição à cal (presença de outros óxidos além do hidróxido de cálcio, como Fe_2O_3, SiO_2 e AlO_2) e o efeito filler, que reduziu as poropressões em temperaturas mais baixas e reduziu o processo físico-químico de degradação em temperaturas mais altas.

5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem a empresa ArcelorMittal por fornecer amostra de EFP, utilizada neste estudo.

REFERÊNCIAS

Anastasiou, E. K., Papayianni, I., & Papachristoforou, M. (2014). Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement. Materials & Design, 59, 454-460. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.030

Andreini, M., Caciolai, M., La Mendola, S., Mazziotti, L., & Sassu, M. (2015). Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures. Fire and Materials, 39(1), 41-57. https://doi.org/10.1002/fam.2229

ABNT, NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, NBR 15575-1. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2024.

ABNT, NBR 15630. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., & Zhang, J. (2021). Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. Journal of Cleaner Production, 287, 125071. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071

European Commission (2019). LEVEL(S) Taking Action on the TOTAL Impact of the Construction Sector. https://doi.org/10.2779/458570

Fang, K., Wang, D., Zhao, J., & Zhang, M. (2021). Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: Influences on the hydration and hardening properties of cement. Construction and Building Materials, 299, 124265. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124265

Henríquez, P. A., Aponte, D., Ibáñez-Insa, J., & Bizinotto, M. B. (2021). Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. Construction and Building Materials, 289, 123106. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123106

Herrero, T., Vegas, I. J., Santamaría, A., San-José, J. T., & Skaf, M. (2016). Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. Construction and Building Materials, 123, 404-413. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.014

ISO 15392, 2008. ISO 15392 - Sustainability in Building Construction d General Principles.

ISO 21929, 2011. INTERNATIONAL STANDARD. Sustainability in Building Construction - Sustainability Indicators.

Khan, M., & McNally, C. (2023). A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. Developments in the Built Environment, 100273. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100273

Khatib, J. M., Baalbaki, O., & ElKordi, A. A. (2018). Metakaolin. In Waste and supplementary cementitious materials in concrete (pp. 493-511). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00015-8

Lima, F. S. D., Trevisan, R., Klippel Filho, S., Vechim, J. C., & Tutikian, B. (2024). Alvenaria estrutural em situação de incêndio: influência da resistência à compressão de blocos cerâmicos. Ambiente Construído, 24, e134436. https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100725

Lozano-Lunar, A., da Silva, P. R., De Brito, J., Alvarez, J. I., Fernández, J. M., & Jimenez, J. R. (2019). Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. Journal of Cleaner Production, 219, 818-832. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.145

Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y. J., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. Clean Technologies and Environmental Policy, 19, 949-958. https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6

Mahoutian, M., & Shao, Y. (2016). Low temperature synthesis of cement from ladle slag and fly ash. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 5(4), 247-258. https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1047913

Naik, B., Chaubey, A. K., Mustakim, S. M., Paul, S., Barua, A., & Jeet, S. (2023). Synthesis and characterization of ladle furnace slag on the mechanical properties of self-compacting concrete. Materials Today: Proceedings, 74, 673-680. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.265

Najm, O., El-Hassan, H., & El-Dieb, A. (2021). Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 288, 125584. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125584

Pachta, V., Triantafyllaki, S., & Stefanidou, M. (2018). Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 189, 576-584. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.027

RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperature—Modelling and Applications. Part 2: Stress–strain relation Materials und Structures doi:10.1617/s11527-007-9286-1; 2007.

Rodriguez, Á., Manso, J. M., Aragón, Á., & Gonzalez, J. J. (2009). Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. Resources, conservation and recycling, 53(11), 645-651. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.015

Sideris, K. K., Tassos, C., Chatzopoulos, A., & Manita, P. (2018). Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag. Construction and Building Materials, 170, 660-667. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.091

Souza, E. D. F. C. D., Silva, T. F. D., Castro, M. A. D., & Ferreira, G. C. D. S. (2023). Combined Use of Ladle Furnace Slag and Rice Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material. Materials Research, 26, e20230069. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0069

Tebbal, N., & Rahmouni, Z. E. A. (2019). Rheological and mechanical behavior of mortars with metakaolin formulation. Procedia Computer Science, 158, 45-50. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.026

Václavík, V., Eštoková, A., Papesch, R., Dvorský, T., Fabianova, M., Halik, M., & Hološová, M. (2024). Investigation of the engineering and environmental properties of cement mortars incorporating ladle furnace steel slag. Case Studies in Construction Materials, 20, e02876. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02876

Vilaplana, A. S. D. G., Ferreira, V. J., López-Sabirón, A. M., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., Berganza-Conde, C., & Ferreira, G. (2015). Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. Construction and Building Materials, 94, 837-843. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.075

Vögele, S., Grajewski, M., Govorukha, K., & Rübbelke, D. (2020). Challenges for the European steel industry: Analysis, possible consequences and impacts on sustainable development. Applied Energy, 264, 114633. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114633

Worldsteel Association. Sustainability Indicators 2023 report. (2023). https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report/

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM JUNTAS DE ARGAMASSAS COM SÍLICA DA CASCA DE ARROZ E FIBRAS DE POLIPROPILENO EM DIFERENTES TEMPOS DE APLICAÇÃO

Rubens Silveira Meichtry[a], Ederli Marangon[a], Ian Baddo da Mota[a]; Jaime Carlos Renck Neto[a]; Luan Garcia Rodrigues[a]; Luis Eduardo Kosteski[a]

[a]Universidade Federal do Pampa-Unipampa-Campus Alegrete. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Grupo de Pesquisa MAEC. Av. Tiarajú, n° 810, sala A1-111/113, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil. rubensmeichtry.aluno@unipampa.edu.br; ederlimarangon@unipampa.edu.br; ianmota.aluno@unipampa.edu.br; jaimerenck.aluno@unipampa.edu.br; luangarcia.aluno@unipampa.edu.br; luiskosteski@unipampa.edu.br

RESUMO

Nesse estudo experimental foi avaliado a resistência ao cisalhamento, o processo de fissuração e o modo de ruptura de juntas argamassadas aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min em tijolos cerâmicos maciços. A partir de uma argamassa de referência (SCA0) com resistência à compressão de 8 MPa, realizou-se a incorporação de 0,30% de fibras de polipropileno em volume de argamassa (SCA0PP3) e a substituição parcial do cimento Portland Brasileiro pela sílica da casca de arroz no teor de 5% com a incorporação de 0,30% de fibras de polipropileno (SCA5PP3), mantendo a relação a/mc em 0,71 para todas as misturas. A determinação da resistência ao cisalhamento nos prismas foi realizada de acordo com os procedimentos da norma BS EN 1052-3 (2002). Apenas a mistura SCA0PP3 não é recomendada ser aplicada em todos os tempos estudados. No entanto, as misturas quando aplicadas no tempo de 120 min apresentaram diminuição na trabalhabilidade, dificultando o assentamento. Além disso, as argamassas SCA0PP3 e SCA5PP3 apresentaram comportamento similar das juntas no tempo de aplicação de 60 min, havendo uma distribuição uniforme das tensões ou deformações globais.

Palavras-chave: Argamassas; Sílica da Casca do Arroz; Resistência ao cisalhamento de prismas; Fibras de polipropileno.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil desempenha um papel significativo na degradação ao meio ambiente, devido à contaminação do solo, exploração dos recursos naturais não renováveis e emissão de gases poluentes. A indústria cimentícia corresponde a aproximadamente 7% das emissões globais antropogênicas de dióxido de carbono (CO_2), um dos principais gases causadores do aquecimento

global, sendo o Brasil responsável por 2,3% desta parcela. Entretanto, uma das alternativas sustentáveis para a redução no consumo de cimento na preparação de concretos e argamassas é a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares, tais como os resíduos agroindustriais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2021; PISCOYA, *et al.*, 2021; CATAÑO MISAS *et al.*, 2021).

Dentre os principais resíduos gerados pelo cultivo agrícola na região Sul do Brasil, destaca-se a casca de arroz, representante de 20 a 25% da massa total produzida. Através do processo de queima controlada da casca, obtém-se a cinza da casca de arroz, que apresenta em sua composição concentrações superiores a 90% de sílica, sendo essa predominantemente amorfa, denominada como sílica da casca de arroz (SCA). Nos últimos anos, este subproduto tem sido amplamente utilizado na produção de argamassas para a redução de custos e, principalmente devido às questões ambientais (CAMARGO, *et al.*, 2018; MARANGON, *et al.*, 2021; GONÇALVES JÚNIOR, *et al.*, 2023).

A incorporação de fibras poliméricas, como as de polipropileno, poliamida, nylon e aramidas em matrizes cimentícias apresentam alto potencial como um elemento de reforço, prologando a vida útil da estrutura. As fibras de polipropileno (PP) melhoram as características das argamassas, incluindo resistência à tração, resistência à flexão e tenacidade conforme relatado em diversos estudos (ŞANAL, *et al.*, 2016; GUO, *et al.*, 2019; DANTAS, *et al.*, 2020).

Propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade das argamassas no estado endurecido podem ser avaliadas a partir da aderência e do processo de fissuração, através do ensaio de resistência ao cisalhamento em prismas de tijolos ou blocos. Diante dessa perspectiva, o objetivo deste estudo experimental é determinar a resistência ao cisalhamento e a distribuição de tensões ou deformações globais em juntas de argamassas aplicadas em diferentes tempos aos tijolos cerâmicos maciços. A primeira mistura avaliada é considerada a de referência, a segunda incorpora fibras de PP e a terceira contém a substituição parcial do cimento Portland Brasileiro pela SCA (5%) além da incoporação de fibras de PP. Cada mistura foi aplicada em diferentes tempos, 15, 60 e 120 min ao substrato.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 MATERIAIS

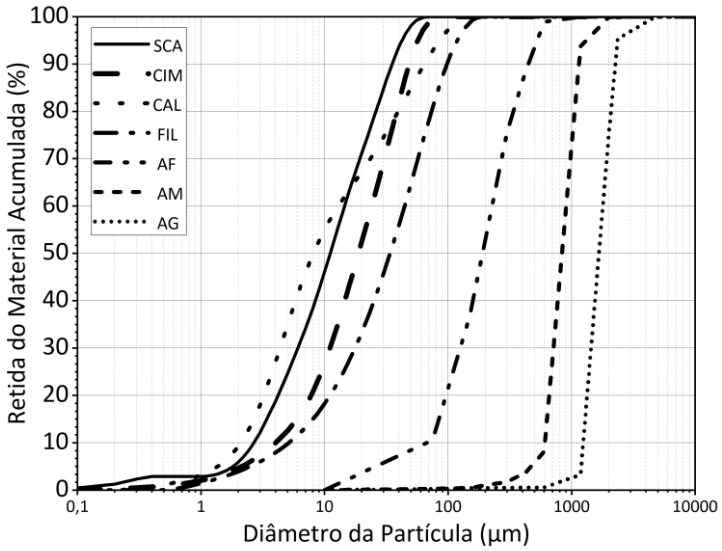
Os materiais utilizados na preparação das argamassas e moldagem dos prismas foram: cimento Portland Brasileiro tipo CP II-F 32 (CIM), cal hidratada CH-II (CAL), sílica da casca de arroz (SCA), filler calcário (FIL), três diferentes faixas granulométricas de agregados miúdos de calcário, sendo, areia fina (AF), areia média (AM) e areia grossa (AG), fibras de PP e tijolos cerâmicos maciços. Cabe salientar que

as misturas argamassadas estudadas neste trabalho foram derivadas de uma mistura comercializada no Brasil, utilizando esses mesmos materiais aqui apresentados.

2.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As composições granulométricas e as propriedades físicas dos materiais cimentícios e dos agregados miúdos de calcário são mostradas na Figura 1 e no Quadro 1.

Figura 1 – Composições granulométricas dos materiais



Quadro 1 – Caracterização física dos materiais

Material	Massa específica (g/cm³)	Densidade de empacotamento	Área específica de superfície (m²/kg)	Perda ao fogo (%)
CIM	2,97	0,575	0,38	5,34
CAL	2,53	0,545	1,18	25,92
SCA	2,09	0,460	21,14	3,50
FIL	2,87	0,577	0,55	-
AF	2,82	0,620	-	-
AM	2,78	0,630	-	-
AG	2,80	0,600	-	-

As fibras de PP adicionadas às misturas têm diâmetro nominal de 0,012 mm e comprimento de 6 mm. As características geométricas, físicas e mecânicas dos tijolos cerâmicos maciços foram avaliadas de acordo com a norma ABNT NBR 15270-2 (2017). Os resultados obtidos apresentaram conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma, sendo as dimensões efetivas de

23,50x9,00x5,00 cm, desvio em relação ao esquadro de 0, planeza das faces com diferença máxima de 3 mm, índice de absorção de água de 13,29% e resistência média à compressão axial de 18,46 MPa.

2.1.2 COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO DAS MISTURAS

O estudo experimental foi desenvolvido a partir de uma argamassa de referência (SCA0) com resistência característica à compressão de 8 MPa. Posteriormente, foram preparadas duas mistura; a primeira com a incorporação de 0,3% de fibras de PP em relação ao volume total (SCA0PP3); e a segunda com a substituição parcial de 5% do CIM pela SCA, além da incorporação de 0,3% de fibras de PP (SCA5PP3). A relação água/materiais cimentícios (a/mc) foi de 0,71. O Quadro 2 apresenta o traço para cada uma das misturas.

Quadro 2 – Traço unitário em massa das misturas argamassadas

Mistura	CIM	CAL	SCA	FIL	AF	AM	AG	PP
SCA0	1,00	1,20	-	0,92	2,83	1,58	1,00	0,00
SCA0PP3	1,00	1,20	-	0,92	2,83	1,58	1,00	0,30*
SCA5PP3	0,95	1,20	0,05	0,92	2,83	1,58	1,00	0,30*

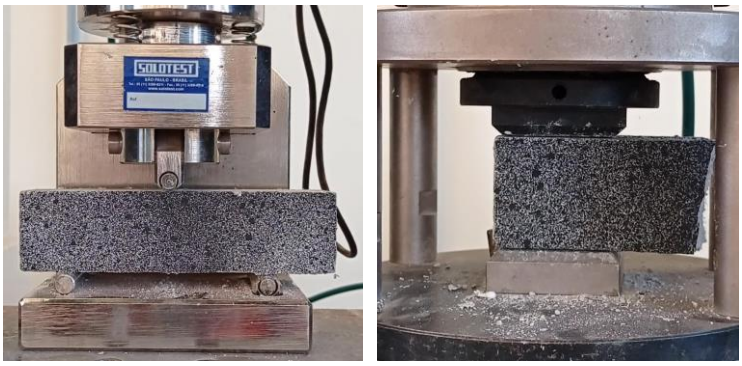
* em relação ao volume total.

O procedimento de mistura foi realizado conforme a ABNT NBR 7215 (2019) com adaptações. As argamassas foram preparadas em betoneira de eixo inclinado de 150 litros. Inicialmente foram misturados os materiais cimentícios (CIM, CAL, SCA e FIL) e a quantidade total de água durante 90 s. Após, a betoneira foi desligada e efetuada a raspagem dos materiais aderidos nas paredes internas do tambor em 30 s e mantida parada e coberta com pano úmido por mais 30 s. Em seguida, a betoneira foi ligada e os agregados miúdos de calcário (AF, AM e AG) foram adicionados lentamente durante 30 s. Após este tempo, a argamassa foi misturada por mais 120 s e novamente a betoneira foi desligada e realizado o processo de raspagem dos materiais por cerca de 30 s e o repouso da mistura coberta por mais 30 s. Por fim, a betoneira foi ligada e adicionadas as fibras de PP, que foram misturadas por 90 s.

2.1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ARGAMASSADAS

O procedimento para a determinação da resistência à compressão e a resistência à tração na flexão em três pontos das misturas argamassadas, foi de acordo com a norma ABNT NBR 13279 (2005). Foram produzidos nove prismas com dimensões de 40x40x160 mm, sendo três para cada mistura e mantidos durante 28 dias em câmara úmida. A Figura 2 mostra as configurações dos ensaios e o Quadro 3 apresenta os resultados médios obtidos para as resistências mecânicas das argamassas.

Figura 2 – Ensaios de (a) resistência à tração na flexão em três pontos e (b) resistência à compressão



(a) (b)

Quadro 3 – Resultados médios das resistências à compressão e à tração na flexão em três pontos

Mistura	fc_{28} (MPa)	ft_{28} (MPa)
SCA0	7,76±0,15	2,47±0,09
SCA0PP3	10,90±0,38	3,28±0,47
SCA5PP3	9,08±0,79	2,18±0,21

2.2 ELABORAÇÃO DOS PRISMAS DE TIJOLOS CERÂMICOS MACIÇOS

Os prismas foram moldados nos intervalos de tempo de 15, 60 e 120 min após o fim da preparação das argamassas. Os tijolos foram umedecidos com água no intuito de evitar a absorção da água presente na argamassa pelos tijolos, conforme previsto na norma ABNT NBR 16868-2 (2020). Para a fabricação dos prismas foi posicionado o primeiro tijolo em superfície plana e aplicada a primeira camada de argamassa com espessura de aproximadamente 1,50 cm e o segundo tijolo foi sobreposto à junta de assentamento e aferido o nível e o prumo. O mesmo procedimento foi realizado com o segundo tijolo e finalizado com o posicionamento do terceiro tijolo, conforme pode ser visualizado na Figura 3 o prisma completo. Foram produzidos trinta e seis prismas, sendo quatro para cada mistura argamassada e cada tempo de aplicação. Os prismas foram mantidos em câmara úmida conforme a ABNT NBR 9479 (2006) no tempo de cura de 28 dias.

Figura 3 – Prismas para análise da resistência ao cisalhamento das argamassas

2.2.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS PRISMAS

Previamente à execução do ensaio, os prismas de tijolos cerâmicos maciços foram preparados da seguinte forma: retificação da face posicionada nos pontos de apoio, pintura estocástica e fixação dos suportes dos sensores LVDTs com gama ± 10 mm e precisão de 0,00001 mm. A avaliação da aderência foi realizada na máquina universal de ensaios EMIC® DL 20000, mediante os procedimentos estabelecidos na norma BS EN 1052-3 (2002). A velocidade de deslocamento do travessão da máquina de ensaios foi de 0,10 mm/min. O ensaio foi monitorado por gravação de vídeo com câmara de resolução de 48 MP, abertura da lente f/1.8 com estabilização óptica e gravação em 4K a 30 frames/s e posteriormente analisada no software GOM Correlate.

Para gerar uma pré-compressão de 0,50 MPa um sistema lateral foi constituído por tubos metálicos, barras de aço rosqueadas, macaco hidráulico manual veicular tipo garrafa de 2 toneladas, placas de aço rígidas e célula de carga tipo S de capacidade de 20 kN. Entre as placas de aço e o prisma foram colocados mantas de EVA com espessura de 3 mm para minimizar as concentrações de tensões.

A resistência ao cisalhamento máxima foi calculada através da Equação 1.

$$\tau máx. = \frac{Fmáx.}{2 \times A} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Sendo:

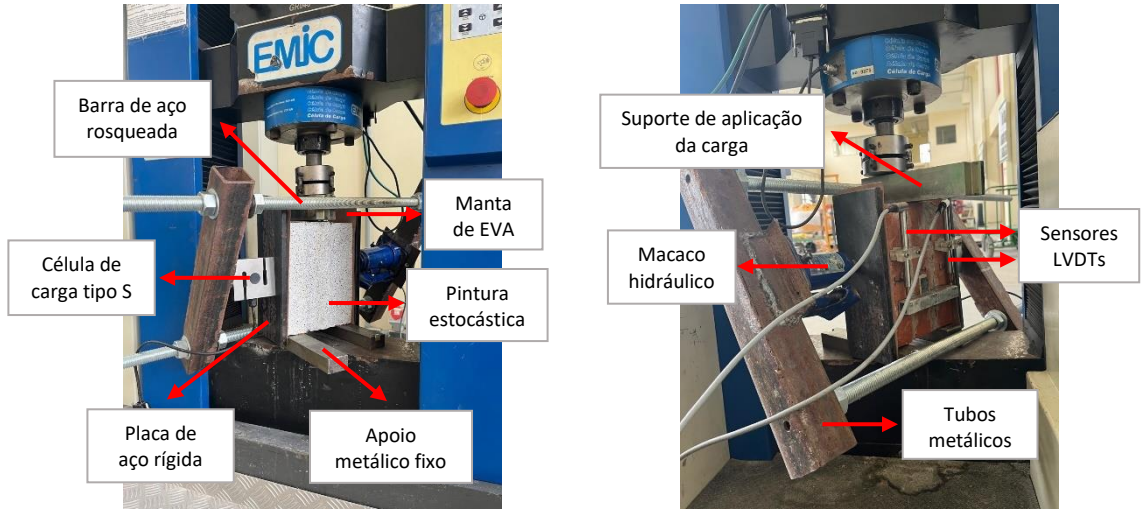
$\tau_{máx.}$ = tensão de cisalhamento máxima (MPa);

$F_{máx.}$ = força máxima aplicada sobre o tijolo central (N);

A = área de contato entre o tijolo e a argamassa (mm²).

A configuração do ensaio de resistência ao cisalhamento com pré-compressão realizado nos prismas de tijolos cerâmicos maciços é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Ensaio de resistência ao cisalhamento (a) vista frontal e (b) vista posterior



(a) (b)

As tensões de cisalhamento máximas foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e as médias das tensões comparadas através do teste de Tukey com nível de confiança de 95%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tensão média de cisalhamento máxima, desvio padrão e coeficiente de variação das juntas de argamassas aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados médios da resistência ao cisalhamento das argamassas nos diferentes tempos

Mistura	Tempo de aplicação (min)	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
SCA0	15	0,65	0,04	5,91
SCA0PP3		0,55	0,05	8,34
SCA5PP3		0,62	0,04	6,63
SCA0	60	0,63	0,04	7,04
SCA0PP3		0,82	0,04	5,15
SCA5PP3		0,78	0,04	5,67
SCA0	120	0,54	0,03	5,72
SCA0PP3		0,75	0,01	1,91
SCA5PP3		0,57	0,06	10,65

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação.

Como pode ser observado no Quadro 4, a mistura SCA0 apresenta um decréscimo na tensão de cisalhamento máxima quando comparados aos tempos de aplicação da argamassa, embora não haja diferença significativa com relação aos tempos de aplicação da argamassa ao substrato.

Para a mistura SCA0PP3 aplicada no tempo de 60 min é possível observar que tensão de cisalhamento máxima demonstra um aumento significativo com relação ao tempo de 15 min e diminui quando aplicada aos 120 min. Apenas no tempo de aplicação de 15 min tem diferença significativa em relação aos demais tempos, ou seja, quando comparado com os tempos de 60 e 120 min.

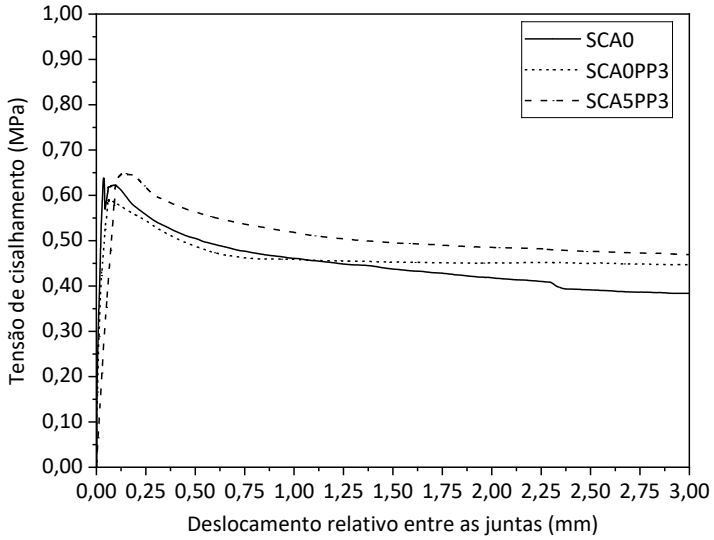
Na mistura SCA5PP3, as tensões de cisalhamento máxima quando comparadas com os tempos de aplicação são semelhantes ao comportamento apresentado pela mistura SCA0PP3. Tem um aumento de tensão nos tempos de 15 min para 60 min e uma diminuição de tensão nos tempos de 60 min para 120 min. No entanto, não apresentam diferenças significativas das tensões com relação aos diferentes tempos de aplicação.

Em relação ao tempo de aplicação de 15 min, as misturas não apresentam diferença significativa quanto às tensões. No que tange o tempo de 60 min, tem diferença significativa da mistura SCA0 com relação as misturas SCA0PP3 e SCA5PP3. No tempo de aplicação de 120 min a mistura SCA0PP3 apresenta diferença significativa em relação as demais misturas, no entanto, entre as misturas SCA0 e SCA5PP3 não tem diferença.

Portanto, é indicado que a mistura SCA0PP3 seja aplicada ao substrato a partir do tempo de 60 min e as misturas SCA0 e SCA5PP3 aplicadas em quaisquer tempos analisados. Entretanto, cabe destacar que a aplicação das misturas aos 120 min apresenta grande dificuldade de manuseio para o assentamento dos tijolos durante a moldagem dos prismas. Essas argamassas se apresentam rígidas e secas para este tempo de aplicação.

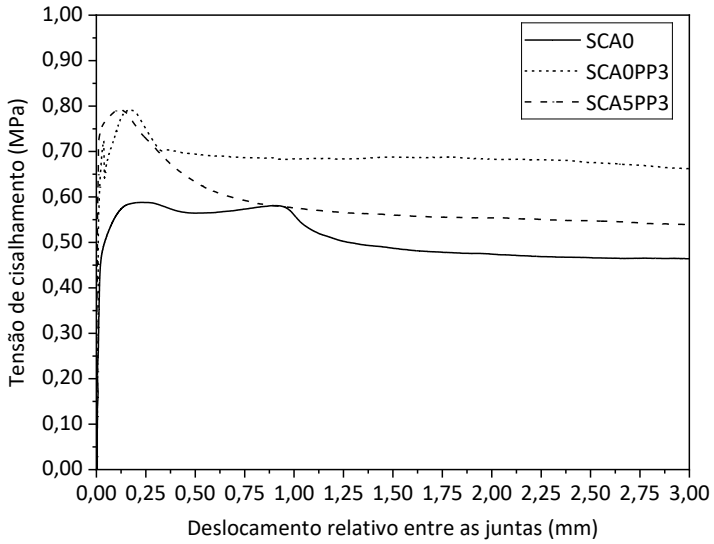
Nas Figuras 5, 6 e 7 estão mostradas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) *versus* deslocamento relativo entre as juntas (mm) das argamassas aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min. Na Figura 5, as misturas aplicadas no tempo de 15 min apresentam comportamentos semelhantes, porém, compete ressaltar que a mistura SCA5PP3 tem uma absorção de energia superior às demais misturas.

Figura 5 – Curvas características tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento relativo entre as juntas (mm) das misturas aplicadas no tempo de 15 min



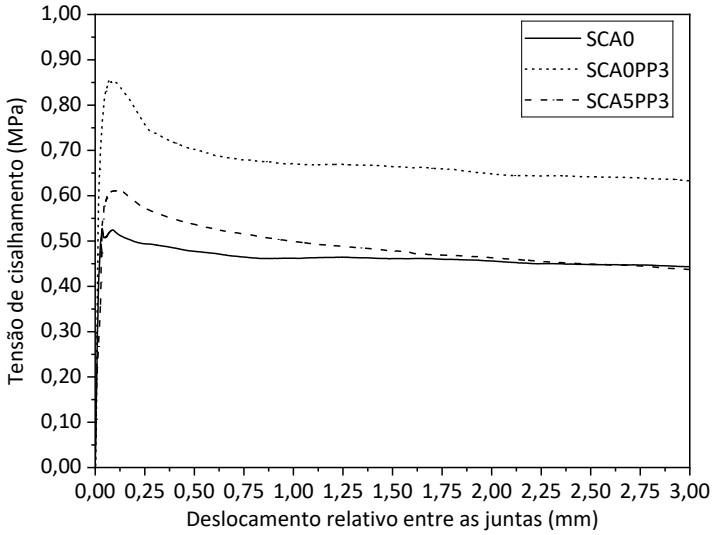
Em relação às curvas características no tempo de 60 min, como mostra a Figura 6, as argamassas SCA0PP3 e SCA5PP3 apresentam comportamentos similares, devido à incorporação de fibras de PP. Entretanto, a mistura sem a substituição parcial do CIM pela SCA obtém maior absorção de energia em comparação à mistura com a substituição parcial. Isso possivelmente está relacionado à quantidade de produtos de hidratação gerados pelo CIM, e com a substituição parcial pela SCA, na idade avaliada de 28 dias, são menores e influenciam na interface matriz/fibra/substrato.

Figura 6 – Curvas características tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento relativo entre as juntas (mm) das misturas aplicadas no tempo de 60 min



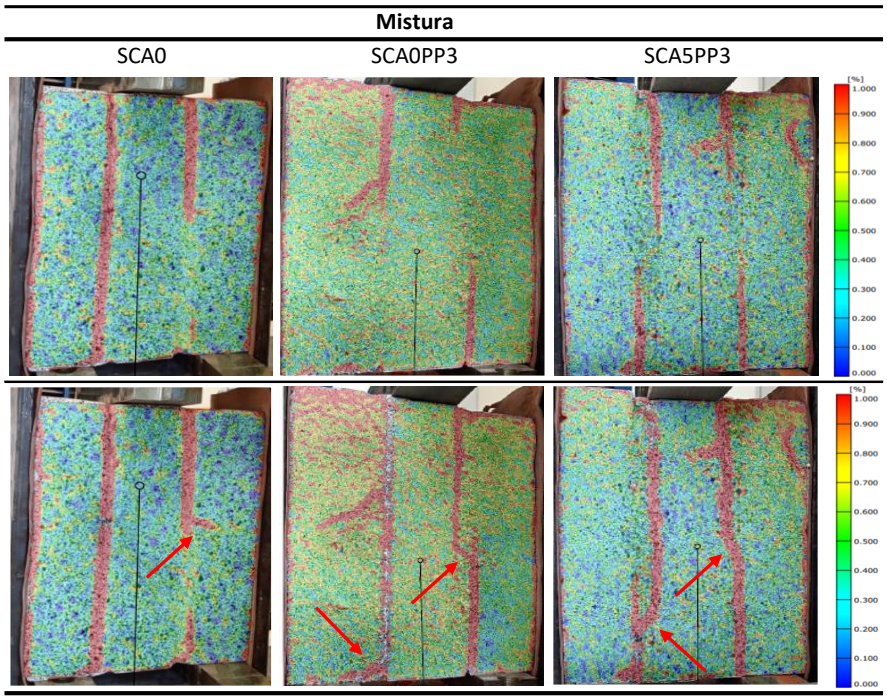
A Figura 7 destaca que a mistura SCA0PP3 obtém maior desempenho mecânico quanto às demais, com aumento da tenacidade por conta da incorporação das fibras de PP, enquanto para as misturas SCA5PP3 e SCA0 não apresenta influência significativa no desempenho. Isso possivelmente está associado a interface matriz/fibra/substrato.

Figura 7 – Curvas características tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento relativo entre as juntas (mm) das misturas aplicadas no tempo de 120 min



A Figura 8 mostra o comportamento caraterístico da distribuição das tensões ou deformações globais, o processo de fissuração e o modo de ruptura obtidos por correlação de imagens utilizando o software GOM Correlate. O tempo de aplicação analisado para cada argamassa foi o de 60 min, devido às tensões de cisalhamento máxima apresentarem valores mais expressivos entre os tempos estudados. A forma de falha e distribuição das tensões ou deformações é muito similar para os outros tempos de aplicação da argamassa ao substrato. A falha inicia-se na face superior da superfície de contato entre e argamassa e o tijolo 2 (tijolo do meio) ou na face inferior no contorno entre os tijolos 1 e 3 (tijolos externos) e a argamassa. Foi observado que as fissuras criadas pelo cisalhamento dos tijolos vão da interface da argamassa com o tijolo do meio para a interface da argamassa com os tijolos externos sempre em um ângulo de 45° (como indicado na figura). Ainda assim, fica evidente que a distribuição de tensões ou deformações não é uniforme para a mistura SCA0, como para as demais misturas. Isso provavelmente está associado à incorporação de fibras de PP as misturas SCA0PP3 e SCA5PP3.

Figura 8 – Processo de fissuração e ruptura de prismas moldados no tempo de 60 min



4 CONCLUSÕES

No presente estudo experimental buscou-se avaliar a influência da substituição parcial do CIM pela SCA e a incorporação de fibras de PP em argamassas quando aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min em tijolos cerâmicos maciços submetidos à ensaios de cisalhamento. Em relação aos tempos de aplicação das misturas argamassadas ao substrato, recomenda-se aplicar a mistura SCA0PP3 nos tempos de 60 e 120 min, enquanto para as misturas SCA0 e SCA5PP3 em todos os tempos estudados. Todavia, cabe ressaltar que as misturas analisadas quando aplicadas no tempo de 120 min, apresentaram redução na trabalhabilidade, dificultando o assentamento. Além disso, pode-se concluir que as argamassas SCA0PP3 e SCA5PP3 proporcionam um comportamento similar das juntas no tempo de aplicação de 60 min, havendo uma distribuição uniforme das tensões ou deformações globais, proporcionando uma melhora significativa no desempenho da alvenaria e garantindo uma maior segurança no estado limite de serviço. Por fim, a substituição de 5% de SCA por CIM não apresentou diferença significativa nos resultados de cisalhamento, indicando a possibilidade de substituição sem perda de qualquer propriedade mecânica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (2021). Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões. Disponível em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 20 mai. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16868-2: Alvenaria estrutural Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9479: Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BRITISH STANDARD. EN 1052-3: Methods of test for masonry – Part 3: Determination of initial shear strenght. London: BS 2002.

CAMARGO, A. F.; BRANDLER, D.; MODKOVSKI, T. A.; SCAPINI, T.; TREICHEL, H. (2018). Uma revisão sobre a influência dos processos de queima na composição da cinza da casca de arroz visando produção de sílica. Revista CIATEC-UPF, 10(2), 42-57. https://doi.org/10.5335/ciatec.v10i2.7141

CATAÑO MISAS, J.; GUZMÁN LÓPEZ, K.; PERPIÑAN PEÑA, M. (2021). Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil, Medellín y Envigado. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/32902>. Acesso em: 15 mai. 2024.

DANTAS, S. R. A.; SERAFINI, R.; ROMANO, R. C. DE O.; VITTORINO, F.; LOH, K. (2020). Influence of polypropylene microfibre (PPMF) dispersion procedure on fresh and hardened rendering mortar properties. Ambiente Construído, 20(2), 7-23. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200384

GONÇALVES JÚNIOR, E. R.; MARVILA, M. T.; DE AZEVEDO, A. R. G. (2023). Utilização de resíduos agroindustriais como material pozolânico em argamassa: uma revisão bibliográfica. In: Anais do XV Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica / VIII Congresso Fluminense de Pós-Graduação, Campos dos Goytacazes. Anais eletrônicos. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg/confict-conpg-2023/trabalhos/utilizacao-de-residuos-agroindustriais-como-material-pozolanico-em-argamassa-uma?lang=pt-br> Acesso em: 10 mai. 2024.

GUO, J.; YANG, Z.; GAO, G. (2019). Effect of Polypropylene fiber on properties of aeolian-sand mortar. Materials Science and Engineering, 472, 1-11.

MARANGON, E.; KULZER, F. E.; COCCO, G. D.; MEICHTRY, R. S.; MENDONÇA, L. C.; KOSTESKI, L. E.; DA COSTA, F. B. P.; DE OLVEIRA, M. J. D. (2021). Mortars produced with an environmentally sustainable rice HUSK sílica: Rheological properties. Journal of Cleaner Production. Journal of Cleaner Production, 287, 125561. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125561

PISCOYA, G. E. C.; KOOSI, J. C. C.; PANTA, J. K. P.; PÉREZ, S. P. M. (2021). Uso de residuos agroindustriales en las propiedades mecánicas del concreto: Una revisión literaria. Revista Ingeniería, 5(13), 123-142. https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v5i13.86

ŞANAL, I.; ÖZYURT, N.; HOSSEINI, A. (2016) Characterization of hardened state behavior of self-compacting fiber-reinforced cementitious composites (SC-FRCC's) with different beam sizes and fiber types. Composites Part B, 105, 30-45.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Avaliação da construtibilidade de pastas de gesso para impressão 3D

Luís Gaspar[a]; Ana Rita Pedrosa[b]; Ana Peixinho[b]; Liliana Gouveia[b]; Ângela Sousa[a]; Teresa Freire[ac], Florindo Gaspar[b]

[a]SIVAL – Gessos Especiais, Lda., Rua Emidio Oliveira Faria, 2425-879 Souto da Carpalhosa, Portugal, projeto-ge@sival.pt, angela.sousa@sival.pt, inov-ge@sival.pt

[b]CDRSP – Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto, Edificio IPLeiria, R. de Portugal, Zona Industrial, 2430-028 Marinha Grande, Portugal, ana.r.pedrosa@ipleiria.pt, ana.b.peixinho@ipleiria.pt, liliana.gouveia@ipleiria.pt, florindo.gaspar@ipleiria.pt

[c]CERIS, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal

RESUMO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem revolucionado os processos de fabrico em diversas áreas, da construção civil à medicina. Esta tecnologia possibilita a produção de peças com formas complexas, reduzindo a mão de obra, tempo de execução e desperdício de matéria-prima. Na construção civil, tem sido estudado o uso de argamassas de cimento aplicadas por extrusão, existindo já alguns edifícios construídos com essa tecnologia.

Pelo contrário, o uso de pastas à base de gesso em impressão 3D ainda está numa fase bastante inicial, com poucos artigos científicos disponíveis. Estas pastas têm potencial para produzir objetos de design complexo - habitualmente de manufatura morosa, ou mesmo impossível de obter de outra forma - seja para fins decorativos, ou para elementos pré-fabricados com funcionalidades específicas.

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a qualidade de impressão 3D de diferentes formulações de pastas com base em gesso. Foram realizados testes de reologia para entender o comportamento dessas pastas durante a impressão, avaliando-se a construtibilidade, e qualidade final dos provetes obtidos. Os resultados permitiram selecionar as pastas com melhor desempenho, e que serão utilizadas para futuros desenvolvimentos, visando a produção de peças decorativas com geometria complexa.

Palavras-chave

Gesso, Fabrico aditivo, Impressão 3D, Construtibilidade, Reologia

1 INTRODUÇÃO

Direct Ink Writing, nome dado à técnica de extrusão que consiste no movimento de escrita de uma ponteira na impressão, tem a vantagem de imprimir estruturas independentes sem a necessidade de usar suportes, uma característica exclusiva dentro da impressão 3D. Adicionalmente, a técnica por cama de pó (*powder bed binder jetting*) funciona através da dispersão de um ligante em pontos específicos da superfície de uma fina camada de pó, reagindo com o material presente. A grande vantagem da cama de pó é a possibilidade de imprimir estruturas extremamente complexas, que seriam muito complicadas de reproduzir com outras técnicas. No entanto, a resistência mecânica das peças obtidas por este processo é muito baixa (Zhou et al. 2022).

A tecnologia de manufatura aditiva estende-se a diversas áreas, utilizando diferentes materiais para o fabrico de produtos distintos. Na área da construção, onde o presente trabalho se enquadra, a investigação sobre o uso de materiais como o cimento na impressão 3D está já mais avançada, com casas e prédios de, pelo menos, dois pisos, em construção.

No caso do gesso, a investigação sobre a sua utilização em impressão 3D é ainda bastante escassa, principalmente utilizando o método de extrusão. O gesso é um material com baixo custo de produção e elevada abundância. É usado frequentemente na produção de moldes para as indústrias de metal e de cerâmica, e também na construção, para revestimento de paredes e em painéis de decoração interiores.

O desenvolvimento de uma pasta de gesso para extrusão irá diversificar o uso deste material, abrindo igualmente novas possibilidades ao fabrico aditivo (Caetano et al. 2017). Estes autores fizeram um estudo exaustivo, avaliando tempo de presa e resistência mecânica, usando formulações em que combinaram diferentes variáveis, tais como os tipos de gesso (sulfatos de cálcio hemi-hidratados alfa, beta e alfa + beta), aceleradores, retardadores, resinas, espessantes e agentes humectantes. Realçam a necessidade de preparar as misturas com água em vácuo, de modo a tentar reduzir a elevada porosidade que observaram. No entanto, como não se realizaram experiências de impressão 3D, não foi possível avaliar a forma como as pastas se iriam comportar, principalmente em termos de fluidez, tixotropia e adesão entre camadas, durante a impressão.

Soares et al. (2018) apresentam uma abordagem mais prática, tendo realizado impressão 3D de uma pasta de gesso utilizando uma técnica de fabrico aditivo por extrusão. Com uma formulação com base em sulfato de cálcio hemi-hidratado beta e a adição do retardador *Plast Retard*, os autores testaram duas resinas diferentes: acetato de polivinilo (PVAc) e co polímero de acrílico, sendo que os testes de resistência à flexão evidenciaram melhores resultados utilizando o PVAc. Os autores conseguiram realizar a impressão da amostra pretendida com a pasta de gesso acima referida, mas relataram os seguintes problemas: esmagamento das camadas inferiores; desalinhamento do material; depressões de material localizadas; ausência de material devido a falhas na extrusora; poros entre camadas e partes incompletas. As falhas foram associadas fundamentalmente ao processo de extrusão e ao comportamento reológico da pasta de gesso. O estudo conclui sobre a necessidade de definir diretrizes para o comportamento reológico do material e sobre a possibilidade de vir a ser necessário usar um sistema de mistura/extrusão contínuo, devido às propriedades da pasta de gesso.

Na manufatura aditiva por extrusão, um dos grandes desafios é conseguir que as propriedades do material permitam a impressão de um objeto 3D com as estruturas complexas pretendidas, num espaço de tempo relativamente curto e resistências mecânicas suficientemente boas para manter as formas impressas. Quando se trabalha com uma pasta de gesso, a viscosidade deste vai aumentando até ocorrer a reação completa com a água e ficar completamente rijo. É durante o tempo inicial de reação, enquanto a viscosidade da pasta de gesso não é muito elevada, que é possível fazer a extrusão do objeto a imprimir (Caetano et al. 2017).

Na China foram publicados dois estudos que mostram o uso de diferentes estratégias para otimizar a impressão 3D de pastas de gesso (Gong et al. 2022; Huang et al. 2021). O objetivo é imprimir uma pasta que tenha um rápido endurecimento após extrusão para conseguir suportar as camadas superiores e permitir manter a forma desejada. Com esse intuito, Huang et al. (2021) testaram o uso de tiossulfato de potássio, um acelerador induzido por calor, imprimindo uma pasta de gesso numa superfície aquecida a fim de ativar o aditivo e acelerar o tempo de presa. A investigação realizada prova a viabilidade desta estratégia, analisando a taxa de colapso e a capacidade de retenção de forma dos objetos impressos, em função do aumento gradual da temperatura. Acima de 40ºC, estas duas variáveis melhoram bastante quando comparadas com 20ºC, evidenciando que a aceleração da presa da pasta de gesso, após extrusão, permite a impressão 3D com a forma pretendida.

No trabalho de Gong et al. (2022) os autores procederam à adição faseada dos aditivos, incluindo retardadores e aceleradores, controlando o tempo de presa consoante a fase de abastecimento da extrusora. A utilização de pasta de gesso com um curto tempo de presa permite diminuir o colapso da estrutura impressa, mas implica um processo contínuo de adição e mistura de aditivos, para que não haja entupimentos na linha de produção devido ao endurecimento precoce da pasta de gesso.

Embora as estratégias desenhadas e apresentadas nestes dois artigos tenham resultados positivos na impressão de diversos objetos 3D, apresentam, no entanto, algumas desvantagens: implicam o uso de formulações complexas e de impressoras 3D de elevada dimensão, assim como o recurso a sistemas de impressão elaborados (Gong et al. 2022). Tendo em conta o objetivo do presente trabalho, o uso de impressoras 3D com uma base aquecida não é uma solução a considerar, dadas as dimensões com que se pretende trabalhar e a forma de extrudir as pastas. Adicionalmente, o estudo envolvendo a manipulação do gesso recorrendo à adição de aditivos em 3 etapas levanta possíveis problemas, sendo a eficácia das misturas o mais sensível de todos: a falta de uniformidade na mistura gera complicações nas características do gesso. Conclui-se que nenhuma das hipóteses apresentada é viável para a realização do trabalho pretendido neste projeto.

Uma formulação pré-doseada será a solução ideal, tanto para o fabricante, como para o consumidor, reduzindo a quantidade de variáveis e mão de obra durante o processo de impressão 3D. Liu et al. (2018) investigaram as propriedades reológicas e mecânicas de uma formulação de gesso pré-doseada para impressão 3D, compreendendo a importância destes parâmetros para a eficácia da manufatura aditiva por extrusão com pasta de gesso. De entre as propriedades mecânicas/reológicas, os autores analisaram o "*yield stress*", que é o ponto em que a pasta transita de uma deformação elástica reversível para uma deformação irreversível. Esta é uma propriedade muito importante na impressão 3D, pois evidencia a capacidade que a pasta tem de manter a forma, contrariando a força da gravidade, bem como de suportar o peso das camadas superiores. A viscosidade da pasta de gesso também é um fator reológico importante durante o processo de extrusão. Os autores realçam a necessidade de um comportamento "*shear-thinning*", em que a viscosidade diminui com o aumento das forças aplicadas. Este comportamento permitirá que a pasta flua com facilidade quando está a ser pressionada (comprimida) para sair pela cabeça de extrusão, mas que, logo após ser extrudida, retome a sua viscosidade original, ajudando a manter a forma impressa. Os autores também compararam a resistência à compressão e à flexão da mesma formulação, com gesso não aditivado usado para fabrico de moldes. Os resultados mostraram que os valores são bastante comparáveis, e até ligeiramente superiores na manufatura aditiva, por comparação com a técnica de moldagem. Neste trabalho, os estudos reológicos mostraram a importância da viscosidade no processo de investigação de novas formulações de gesso para impressão 3D.

Zhou et al. (2022) realizaram o trabalho que se revelou mais elucidativo na investigação de formulações para a impressão 3D de pastas de gesso por extrusão. A mistura, incluindo sulfato de cálcio hemi-hidratado alfa, ácido cítrico, hidroxipropil metilcelulose e água, permitiu imprimir diversas estruturas complexas. Os autores utilizaram o tempo de presa e os parâmetros reológicos para testar

diversos aditivos tendo em conta as características adequadas da pasta de gesso, nomeadamente: um período de tempo suficiente para a impressão do objeto e propriedades mecânicas que mantenham a forma e aguentem o seu próprio peso e o das camadas superiores. "*Yield stress*" (tensão de cedência) e "*shear elastic modulus*" (módulo da elasticidade de corte) são parâmetros que os autores realçam como devendo obedecer a valores mínimos para que a pasta não colapse. O valor da tensão de cedência deve ser ligeiramente superior ao valor da gravidade (considerado ~27 Pa pelos autores) enquanto o valor da elasticidade deve ser um valor "elevado", embora não seja indicado um valor de referência. Os autores indicam valores para estes parâmetros de ~50 Pa e ~0,9 MPa, respetivamente, que consideram ser suficientes para a pasta não colapsar. Foram, ainda, realizados testes de resistência à compressão, em que os resultados de estruturas impressas por extrusão foram comparados com os das estruturas produzidas por moldes. Os resultados foram comparáveis entre os dois processos de fabrico, com valores aproximados, sendo mais um ponto positivo para a impressão 3D por extrusão.

O estado da arte da impressão 3D utilizando gesso revela diferentes abordagens na tentativa de imprimir objetos. No entanto, a utilização de extrusão usando massas pré-doseadas de modo a tornar o processo mais simples e reprodutível, está ainda numa fase muito embrionária. Este trabalho tem como objetivo estudar formas de colmatar essa lacuna, de modo a valorizar o material e a oferecer uma nova alternativa para a produção de peças decorativas e/ou de revestimento usando gesso, com recurso a impressão 3D. Para tal, realizaram-se ensaios de impressão com diferentes formulações e fez-se, em simultâneo, o respetivo estudo reológico, de forma a tentar estabelecer uma relação entre os resultados obtidos e identificar a melhor combinação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Este trabalho estuda o uso de diferentes formulações à base de gesso para o processo de impressão 3D por extrusão e a caracterização das suas propriedades reológicas. As quatro formulações testadas são apresentadas no Quadro 1. O gesso β (sulfato de cálcio hemi-hidratado do tipo β) foi produzido pela Sival – Gessos Especiais, sendo que os restantes componentes foram adquiridos a diferentes fornecedores.

As formulações foram preparadas em laboratório, pesando e adicionando cada aditivo, seguido de um processo de mistura para promover a homogeneização de todos os componentes, em pó.

Quadro 1– Identificação da composição das formulações de gesso utilizadas

Formulação	Composição
A	Gesso β; Retentor de água; Espessante; Retardador
B	Gesso β; Retentor de água; Espessante; Retardador; Superplastificante
C	Gesso β; Gesso α; Retentor de água; Espessante; Retardador
D	Gesso β; Gesso α; Retentor de água; Espessante; Retardador; Superplastificante

2.2 TESTES DE REOLOGIA/ESPALHAMENTO

Os testes reológicos tiveram como objetivo determinar os parâmetros associados ao modelo de Bingham (Tensão de Cedência e Viscosidade Plástica). Foram realizados com recurso a uma sonda de

pás associada a um motor, cuja força de torção foi adquirida por um sensor (Figura 1) ao longo do perfil de velocidades estabelecido.

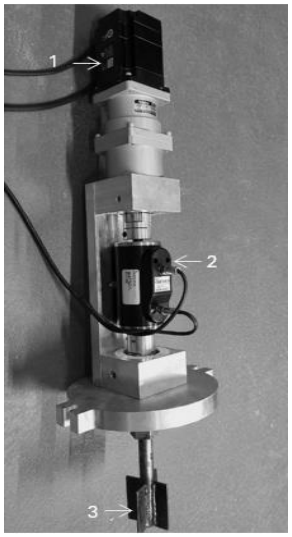


Figura 1 - Equipamento para análise da reologia: 1) sensor de Torque; 2) motor; 3) sonda de pás

As formulações em pó pré-doseadas foram adicionadas à água durante 2 minutos para uma boa dispersão do material, esperando-se, em seguida, 3 minutos antes de iniciar a mistura, deixando que todos os componentes humedecessem (importante para a obtenção de uma pasta homogénea).

Posteriormente, foi realizada a mistura dos componentes com um misturador elétrico de agitador em hélice, durante 2 minutos (Figura 2). No fim de preparada, a pasta de gesso foi colocada no recipiente para medição dos parâmetros reológicos e compactada, com recurso a pancadas secas, produzidas por inclinação alternada dos diferentes lados da base, que são depois deixados cair, de modo a ajudar a libertar o ar existente na mistura. A medição do torque foi feita inserindo integralmente a sonda de pás na pasta (Figura 3).

Figura 2 - Mistura da pasta de gesso

Figura 3 - Medição do torque da pasta de gesso

Paralelamente, foi realizado o teste de espalhamento de acordo com a norma EN 13279-2:2014 (Figura 4 e Figura 5).

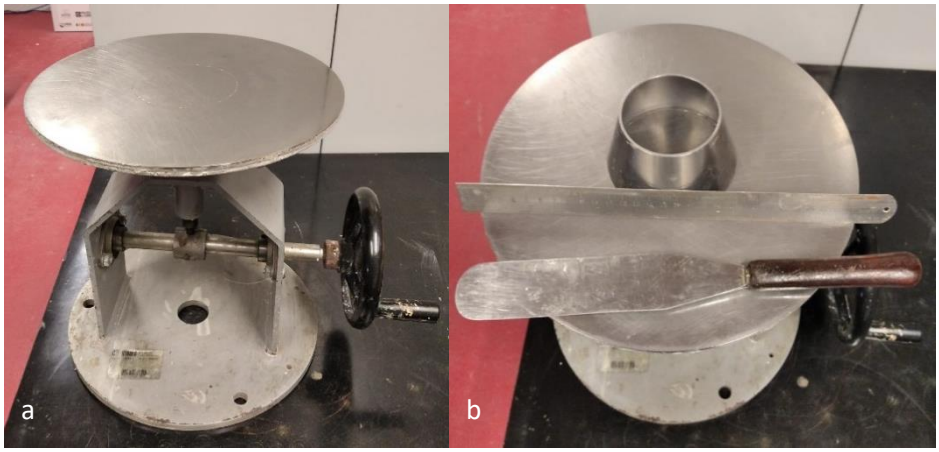


Figura 4 - Equipamento para teste de espalhamento: a) mesa de espalhamento; b) mesa de espalhamento com cone truncado metálico, régua e espátula

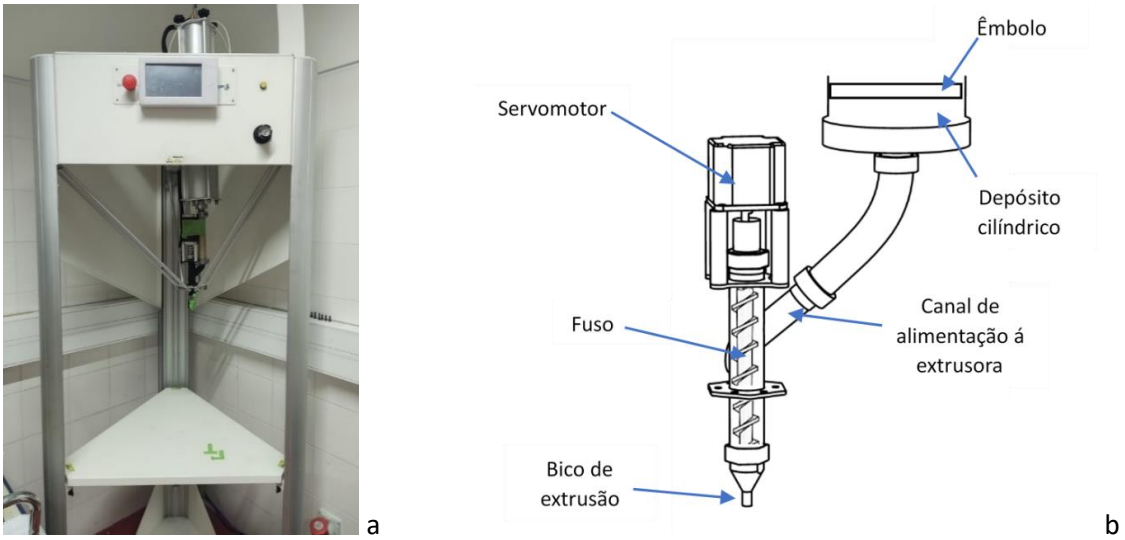
Figura 5 - Teste de espalhamento: a) aspeto do provete formado após levantamento do cone; b) e c) medição do diâmetro de espalhamento em duas direções perpendiculares

2.3 METODOLOGIA DE IMPRESSÃO DE ARGAMASSAS À BASE DE GESSO

De forma a testar as diferentes formulações de gesso e analisar os respetivos comportamentos usando a tecnologia de manufatura aditiva, foram realizados ensaios de impressão 3D com recurso a uma impressora modelo Delta WASP (Figura 6a).

Este equipamento movimenta-se com coordenadas cartesianas numa base de impressão circular imóvel, associada a uma extrusora fixa em 3 braços dispostos numa configuração triangular. Os 3 braços são acionados por movimentos verticais, de forma a deslocar a extrusora em três direções (X, Y e Z), cuja configuração é habitualmente designada por “Delta”.

Este dispositivo é equipado por uma extrusora de modelo LDM (Liquid Deposition Modeling) da WASP, composta por: um servomotor, um fuso, um canal de alimentação e um bico de extrusão (Figura 6b).



a b

Figura 6 - Equipamento de impressão: a) impressora Delta WASP; b) desenho esquemático da extrusora

A matéria-prima é colocada dentro do depósito cilíndrico e sujeita a alguma compactação, de modo a permitir a libertação de vazios incorporados no material. O depósito é depois fechado e colocado no equipamento. O processo de extrusão é acionado pelo uso de ar comprimido sobre o êmbolo existente no depósito, fazendo com que o material percorra o canal que abastece a extrusora, atingindo o fuso, que é acionado pelo servomotor, obedecendo às instruções do sistema operativo do equipamento, doseando a quantidade adequada de material. Neste trabalho foi usado um bico de extrusão de 8 mm de diâmetro, num processo de impressão contínuo.

Nos testes de impressão optou-se pela impressão 3D de provetes de configuração cilíndrica, construindo uma parede com a espessura do bico de extrusão (8mm), numa única linha contínua de impressão (formato espiral), constituída, no total, por 36 camadas. Esta configuração permitiu avaliar a aparência e a capacidade estrutural do material (construtibilidade), sem colapsar (Figura 7).

Na parametrização base da peça desenhada considerou-se 4 mm de altura de camada e uma velocidade de impressão de 23 mm/s. A pressão aplicada no depósito da pasta foi ajustada de acordo com o necessário à realização do processo de extrusão, para cada formulação. Os valores registados nestes ensaios foram de 2,5 bar (formulações A e D) e 3 bar (formulações B e C).

Figura 7 - Aspeto do tipo de provete impresso

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TESTES DE IMPRESSÃO

Todas as formulações apresentaram as propriedades necessárias para se conseguir imprimir e obter camadas regulares que permitiam a sobreposição das camadas subsequentes. No entanto, o sucesso da impressão na íntegra variou conforme a formulação utilizada. Na Figura 8, estão apresentados os provetes que foram impressos utilizando as diferentes formulações testadas. Verifica-se que existem irregularidades entre eles, destacando-se sobretudo a deformação sofrida devido à sobreposição de camadas em altura. O início da impressão foi semelhante em todas as formulações, mas os provetes deformaram em alturas diferentes do processo, ou seja, para cada formulação a deformação aconteceu em camadas diferentes.

Para cada formulação foram realizados vários provetes para avaliar a replicabilidade da impressão. A formulação A (Figura 8a) foi a que teve o melhor desempenho durante a impressão, apresentando a melhor forma final e estabilidade e a menor deformação das paredes em todos os provetes. Por oposição, a formulação D (Figura 8d) apresentou os resultados menos favoráveis pois, embora tenha sido possível uma impressão completa de todas as camadas, a peça não teve a estabilidade e estrutura suficientes para manter a forma original, deformando lateralmente. Tanto a formulação B (Figura 8b) como a formulação C (Figura 8c) permitiram uma impressão completa, mas também exibiram maiores deformações verticais nas camadas impressas. Estes resultados mostram que existem diferenças na impressão com as diferentes formulações, devido à deformação da parede dos provetes impressos. Salienta-se também que as deformações aconteceram todas durante o processo de impressão e que, após terminada, não se identificou nenhuma deformação adicional até ao fim de presa da pasta de gesso.

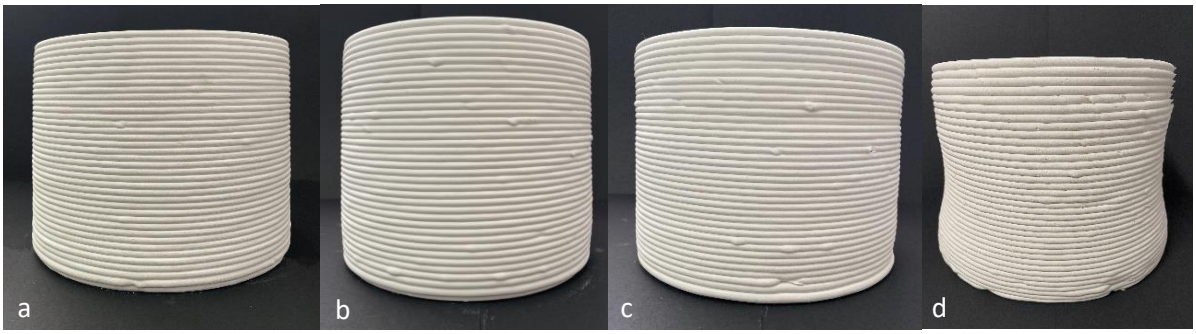


Figura 8 - Provetes circulares manufaturados por impressão 3D. a) Formulação A; b) Formulação B; c) Formulação C; d) Formulação D.

Pode afirmar-se, portanto, que a formulação A tem as melhores características para impressão 3D, que permitem à pasta de gesso sustentar a deposição sucessiva de camadas, sem que se verifique a deformação das camadas inferiores, isto é, mantém a integridade estrutural.

Para além da deformação exibida pelos provetes durante a impressão, verificou-se a existência de defeitos no cordão da pasta de gesso. Como se pode ver na Figura 9, a presença de bolhas de ar que se encontravam na pasta de gesso durante a impressão, levou ao surgimento de saliências (Figura 9a) e de falhas na extrusão (Figura 9b), ocorrências verificadas em todas as formulações. Estes defeitos resultam da forma como o reservatório foi enchido - um processo manual em que se colocou a pasta de gesso à mão, ou com ajuda de uma colher - sendo difícil retirar as bolhas de ar por completo. Devido às propriedades das pastas de gesso para impressão 3D, entre elas a elevada consistência, revela-se absolutamente necessária a compactação do material dentro do recipiente, aspeto cuja eficácia se deverá melhorar em futuros desenvolvimentos. A utilização de vácuo durante o processo de mistura e/ou do enchimento do depósito poderá ser uma técnica a considerar, tendo em vista a redução do ar retido dentro da pasta e a probabilidade do aparecimento posterior de defeitos nas camadas durante a impressão.

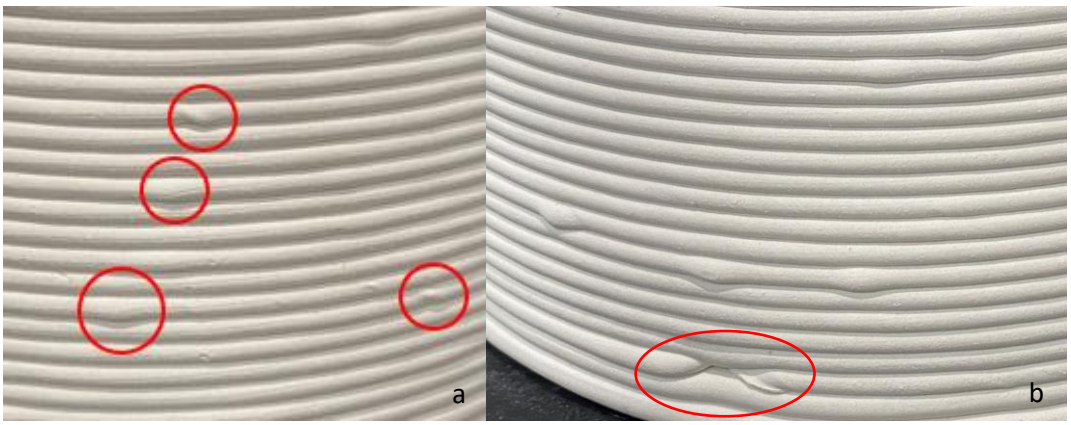


Figura 9 – Defeitos no cordão da pasta de gesso: a) saliências e b) falhas na extrusão

3.2 PARÂMETROS REOLÓGICOS

Tal como referido previamente, realizaram-se ensaios reológicos em simultâneo com a impressão 3D dos provetes, de modo a caracterizar reologicamente as pastas de gesso testadas. Os resultados obtidos para a tensão de cedência e o espalhamento foram consistentes, visto que um aumento no valor de espalhamento deve corresponder a uma diminuição no valor de tensão de cedência. De facto, os gráficos da Figura 10 traduzem uma tendência para a evolução inversa destes parâmetros.

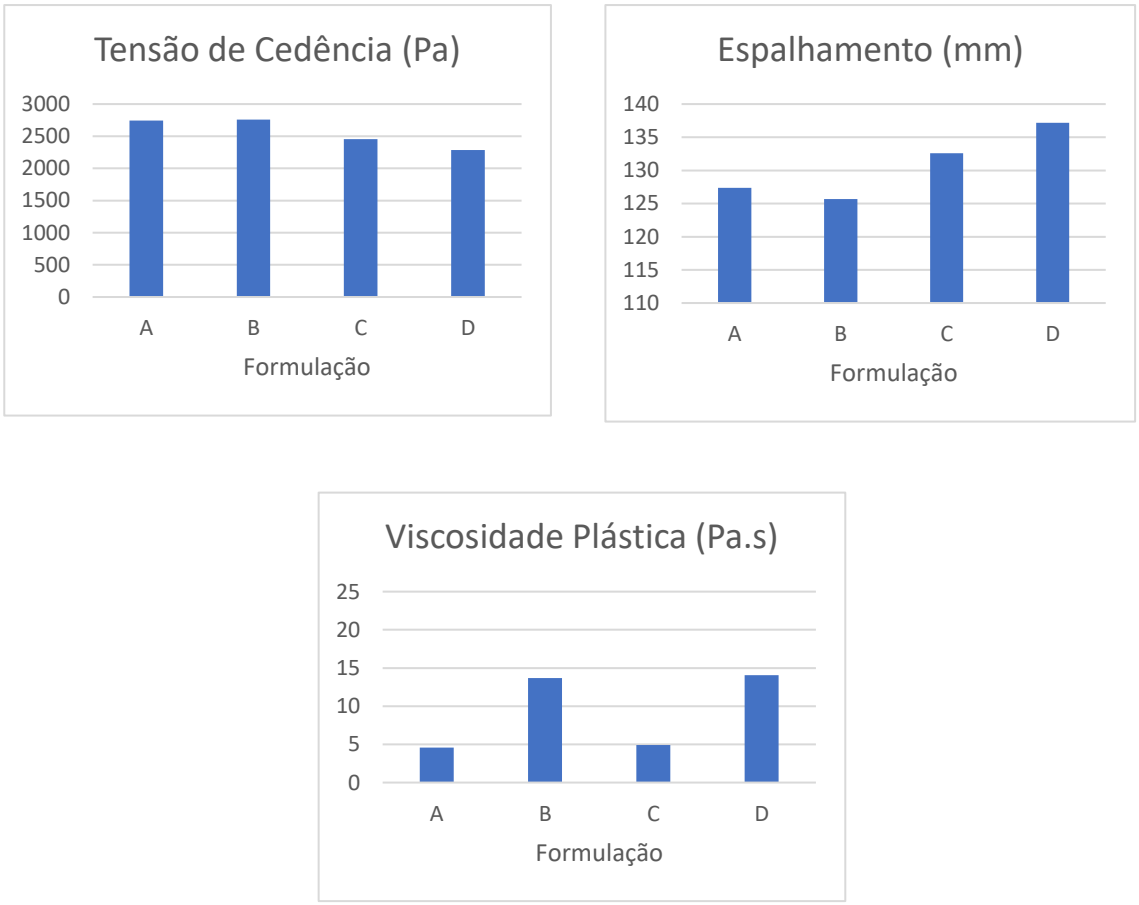


Figura 10 - Avaliação dos parâmetros reológicos das formulações de gesso utilizadas neste trabalho

Comparando os resultados da tensão de cedência com a construtibilidade das diferentes formulações, verifica-se não existir uma correlação bem definida. No entanto, identificou-se que as formulações A e B, cujos valores de tensão de cedência são mais elevados, apresentaram os provetes com melhor desempenho estrutural. Esta poderá ser uma das razões pela qual estas formulações apresentaram melhores resultados na impressão. Contudo mais estudos são necessários para compreender a influência deste parâmetro na construtibilidade das pastas de gesso.

Os resultados da viscosidade plástica (Figura 10) indicam que existe um grande aumento dos valores deste parâmetro nas formulações com superplastificante, formulações B e D, em comparação com as que não têm plastificante, formulações A e C. A ação deste aditivo permite a redução da quantidade da água utilizada na mistura, mantendo a mesma trabalhabilidade da pasta de gesso, o que faz aumentar a viscosidade plástica (Banfill, 2010). Estes resultados não se traduziram para o

processo de impressão 3D, nem em termos de construtibilidade, nem de extrudibilidade. De facto, como indicado na literatura, a viscosidade plástica está relacionada com a bombeabilidade da pasta durante a extrusão (Pedrosa e Gaspar, 2023). No entanto, neste trabalho, não foi possível verificar uma correlação entre a pressão de ar utilizada para extrudir e os valores de viscosidade apresentados, uma vez que as formulações A e D utilizam valores de pressão iguais, 2,5 bar, para valores de viscosidade bastante diferentes. Assim, estes resultados apontam para a possibilidade de que outras características das pastas de gesso influenciem a bombeabilidade e a extrudibilidade.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a possibilidade de utilizar pastas de gesso em impressão 3D, havendo, no entanto, ainda grande necessidade de desenvolvimentos futuros.

Testou-se a impressão 3D de peças cilíndricas com 4 formulações de pastas de gesso, tendo sido a formulação A, constituída por sulfato de cálcio hemi-hidratado do tipo β, sem superplastificante, a que apresentou melhores resultados, com uma melhor estrutura e um baixo grau de deformação. Por oposição, a formulação D, constituída por uma mistura de sulfatos de cálcio hemi-hidratados dos tipos β e α, com superplastificante, apresentou o desempenho menos favorável, com grandes deformações e uma pior estrutura do provete.

Embora não tendo sido possível estabelecer uma correlação evidente entre os resultados obtidos para os diferentes parâmetros reológicos das referidas pastas e a construtibilidade dos provetes, foram dadas algumas indicações no sentido de apontar a tensão de cedência como um dos fatores que poderá ter mais influência. No entanto, com o espalhamento e a viscosidade plástica não se verificou uma relação direta.

Considerando os resultados deste trabalho, conclui-se que a investigação de formulações de pastas de gesso para impressão 3D deve englobar estudos de reologia, procurando relacionar os valores dos diferentes parâmetros reológicos obtidos com a qualidade da impressão.

Sugere-se, assim, a realização de uma análise mais profunda às propriedades das pastas que mais contribuem para a integridade estrutural do produto final, tendo em vista a obtenção de provetes com melhor qualidade, e posteriormente uma manufaturação fiável de peças de gesso, isto é, que apresente estabilidade ao longo do tempo. Adicionalmente, é essencial a execução contínua de testes para identificar os melhores parâmetros a utilizar na impressão, tais como a pressão necessária para extrudir, a velocidade de impressão e outros parâmetros relevantes.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi financiada pela agenda mobilizadora INOV.AM no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência, pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do apoio do CDRSP (Projectos Estratégicos UIDB/ 04044/2020 e UIDP/04044/2020; e Laboratório Associado ARISE LA/P/0112/2020).

REFERÊNCIAS

Banfill, P.F.G. (2010) Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. Construtions and Building Materials, 25, 2955-2960. https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.001

Caetano, D. E., Alves, J. L., Neto, R. L. and Duarte, T. P. (2017) Development of Plaster Mixtures Formulations for Additive Manufacturing. *In* Materials Design and Applications, 65, 257-277. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50784-2_20

EN 13279-2: 2014 – Gypsum binders and gypsum plasters – Part 2: Test methods

Gong, L., Zhou, Y., Zheng, L. and Yuan, P. (2022). Extrusion-Based 3D Printing for Recyclable Gypsum. 273-282. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.273

Huang, J., Duan, B., Cai, P., Manuka, M., Hu, H., Hong, Z., Cao, R., Jian, S., and Ma, B. (2021) On-demand setting of extrusion-based 3D printing gypsum using a heat-induced accelerator. Construction and Building Materials, 304, 124624. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124624

Liu, C., Gao, J., Tang, Y., and Chen, X. (2018). Preparation and characterization of gypsum-based materials used for 3D robocasting. Journal of Materials Science, 53(24): 16415–16422. https://doi.org/10.1007/s10853-018-2800-8

Pedrosa, A., Gaspar, F., (2023). Rheology Assessment of Mortar Materials for Additive Manufacturing. Current Materials Science, 17(4):304-320. https://dx.doi.org/10.2174/2666145417666230801093723

Soares, R., Moreira, L. C., Machado, M., Cavaleiro, A. J., Neto, R., Pereira, J. P., Jesus, A. and Reis, A. (2018). Large-area Ceramic Tooling Production through Hybrid Manufacturing. Fraunhofer / DDMC, ISBN: 978-3-8396-1320-7

Zhou, H., Cai, Z., Wang, X., Zeng, J., Feng, Y., Peng, C. and Wang, R. (2022) Direct Ink Writing of Gypsum: Developing a Printable Gypsum Paste. Journal of Inorganic Materials. 37(3):338-346. https://doi.org/10.15541/jim20210606

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS SUSTENTÁVEIS: *ROTEIRO* PARA O POTENCIAL DAS CONCHAS DE OSTRA NA ECONOMIA CIRCULAR AZUL

Nicollas Moreira[a]; Poliana Bellei[a]; Fernanda Caroline Magalhães[a,c], Rui Vasco Silva [a]; Maria Paula Mendes[a], Ana Paula Soares Dias[b], Manuel Francisco Costa Pereira[b], Inês Flores-Colen[a]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, nicollas.moreira@tecnico.ulisboa.pt; poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt; rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt; mpaulamendes@tecnico.ulisboa.pt; ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisbon, Portugal, apsoares@tecnico.ulisboa.pt; mfcp@tecnico.ulisboa.pt; apsoares@tecnico.ulisboa.pt

[c] CiTUA, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal, fernandamagalhaes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A crise global de gestão de resíduos é um desafio crescente, caracterizado pelo aumento exponencial na produção e pelo descarte inadequado dos resíduos à escala mundial. Nesse contexto, o conceito de economia circular foca-se no desenvolvimento de alternativas para o uso contínuo, reciclagem e reabilitação de produtos e materiais, reduzindo o impacto ambiental e preservando recursos.

Com base na Economia Circular Azul, que enfatiza a gestão sustentável de recursos marinhos, destacam-se as conchas de ostras provenientes da indústria alimentar. Este estudo apresenta o desenvolvimento de um Roteiro para facilitar o entendimento das várias etapas e desafios relacionados com as aplicações deste resíduo, com foco no mercado da construção civil.

Por fim, é importante destacar que o aproveitamento do potencial das conchas de ostras requer a colaboração interdisciplinar entre produtores, distribuidores, investigadores e indústrias, promovendo a conservação ambiental e a valorização de recursos.

PALAVRAS-CHAVE

Conchas de ostra, Gestão de Resíduos, Economia circular azul, Roteiro, Bivalves

1 INTRODUÇÃO

O crescimento e desenvolvimento dos espaços urbanos nas últimas décadas têm apresentado desafios complexos no tratamento e deposição de resíduos em escala global. Em 2022, Portugal recolheu 5,3 milhões de toneladas de resíduos urbanos (EAmbiente, 2022), o que sublinha a necessidade de adotar medidas compensatórias como a economia circular. Este modelo económico, baseado na recuperação e reciclagem de recursos, é caracterizado pela "baixa poluição, baixa perda e alta eficiência", operando segundo os princípios de "reduzir, reutilizar e reciclar" (Bouldin, 1966).

A Economia Circular Azul, uma extensão desta abordagem tradicional definida por Delgado (2024), representa uma estratégia sustentável para a gestão de recursos, com um foco específico no uso sustentável de recursos marinhos. Dada a diversidade das origens destes recursos, este modelo possui um potencial significativo para implementar soluções inovadoras.

Entre os produtos aproveitáveis, destacam-se as conchas de ostra da indústria marinha. Consideradas frequentemente como resíduos após o consumo humano, estas conchas apresentam propriedades únicas, como a sua forma escamosa e irregular e elevada absorção de água, características que podem agregar valor a diversos setores da economia. Embora o carbonato de cálcio, componente principal das conchas de ostra, seja um recurso globalmente explorado (Popović et al., 2023), historicamente a maioria destas conchas não é reaproveitada.

Adicionalmente, a produção global de bivalves, que totaliza anualmente 16,1 milhões de toneladas, destaca-se como a segunda maior na indústria de frutos do mar. A maior parte destes moluscos é cultivada e colhida em países como os da União Europeia, Estados Unidos, China e Chile, com a Ásia, liderada pela China, dominando a produção global (FAO, 2022).

O projeto Shellter, iniciado em setembro de 2022 no Instituto Superior Técnico em colaboração com a Nofima, visa reduzir o impacto ambiental causado por resíduos da aquicultura e de espécies bivalves invasoras, através da incorporação de conchas de ostra na construção civil.

Para compreender as interdependências e desenvolver as melhores estratégias para alcançar os objetivos do projeto, todas as etapas do processo de transformação das conchas de ostra provenientes da aquicultura em materiais de construção civil devem ser cuidadosamente mapeadas. O mapeamento estratégico, aplicado com sucesso em diversas áreas (Phaal e Muller, 2009), é uma ferramenta essencial. Um roteiro (*roadmap*) proporciona uma visão clara e estruturada dos passos necessários para atingir um objetivo específico, ajudando a orientar equipas e indivíduos desde a conceção até à implementação bem-sucedida. Facilita a comunicação entre todas as partes interessadas, garantindo que todos estejam cientes do progresso e das próximas etapas do projeto.

Assim, este artigo tem como objetivo desenvolver os princípios fundamentais para um roteiro que facilite a compreensão das etapas e desafios associados à aplicação das conchas de ostra em materiais de construção.

2 METODOLOGIA

Seguindo a abordagem de Phall e Muller (2009), um roteiro eficaz deve abordar três questões-chave: "Onde estamos", "Para onde queremos ir?" e "Como podemos lá chegar?" (Figura 1). Para desenvolver um roteiro voltado para a aplicação e aproveitamento de resíduos de conchas de ostras em soluções da construção civil, utilizou-se os conhecimentos teóricos e práticos adquiridos durante o projeto Shellter.

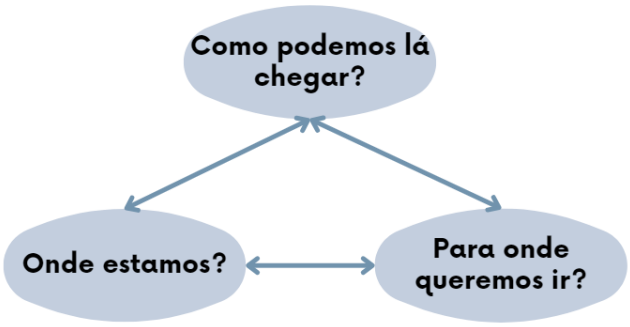


Figura 1 – Questões fundamentais para o desenvolvimento de um roteiro adaptado (Phall e Muller (2009)

A primeira questão a ser analisada e respondida no contexto do projeto Shellter é "Onde estamos?", permitindo identificar os recursos já disponíveis e os desafios a serem superados. Deste modo realizou-se um levantamento bibliográfico para verificar possíveis aplicações desse material não só em produtos da construção civil, mas também em outros setores da economia e, assim, identificar o valor associado ao aproveitamento das conchas de ostras na Economia Circular de forma global.

A segunda questão identificada é "Para onde queremos ir?", definindo os objetivos e resultados esperados para os próximos anos. Desta forma, os responsáveis pelo projeto podem orientar o processo de tomada de decisões estratégicas que os aproximem do destino desejado. Além disso, a definição clara de metas permite uma avaliação mais precisa do progresso e a identificação de possíveis desvios ao longo do caminho, possibilitando ajustes e correções quando necessário.

Para o desenvolvimento deste tópico, a pesquisa também identificou os desafios relacionados ao tema em artigos desenvolvidos por membros do Projeto Shellter, ilustrando de forma clara os desafios e estratégias a serem considerados para que o aproveitamento de resíduos de conchas de ostras na construção civil seja otimizado.

Por fim, a questão "Como podemos lá chegar?" Implica a identificação e definição das estratégias, recursos e etapas necessárias para alcançar os objetivos ilustrados na questão anterior. Para isso, foram utilizadas como base de dados as pesquisas realizadas no projeto Shellter (Magalhães et al., 2024; Bellei et al., 2023a, 2024), de forma que o passo a passo do *roteiro* para o aproveitamento dos resíduos conchas de ostra no setor da construção civil, ficasse o mais claro e completo possível. Com isso, será possível ilustrar a cadeia de procedimentos desde o cultivo e recolha do material, até às etapas do desenvolvimento do produto em si.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 "ONDE ESTAMOS AGORA?"

Após um levantamento bibliográfico, constatou-se que os países do Sudeste Asiático estão numa fase mais avançada na exploração deste recurso na indústria, contabilizando aproximadamente 250 patentes registadas para este subproduto (Pessoa et al., 2019), um número cerca de 10 vezes superior ao observado em qualquer outra região. Enquanto essa região possui consideráveis investimentos na aplicação deste resíduo, outras partes do globo estão gradualmente reconhecendo o potencial desta matéria-prima.

Para compreender o estado atual do mercado das conchas de ostra, torna-se imprescindível compreender a sua aplicabilidade industrial. Assim, apresenta-se o potencial da utilização das conchas de ostra em diferentes domínios.

Em relação ao segmento saúde e bem-estar, visto que é um produto natural e amplamente tolerado pelo organismo, o pó de ostra é considerado um suplemento dietético ideal para a prevenção e tratamento da perda de massa óssea esquelética (Nunes, et al., 2006).

No tratamento de águas, as conchas são consideradas uma das aplicações mais comuns, uma vez que o carbonato de cálcio pode ser empregue para remover o sulfureto de hidrogénio (Asaoka, et al., 2009), recuperar o boro de águas residuais (Tsai, et al., 2011), ou mesmo como solução purificadora em águas residuais domésticas, em alternativa aos cascalhos (Shih e Chang, 2015). Existem também estudos que indicam que os resíduos das conchas de ostra podem ser eficazes em composições que trabalham no tratamento de solos contaminados por metais pesados (Moon, et al., 2013), sendo também um excelente material biossorvente, dada a sua capacidade para remover poluentes como SO_2, trióxido de enxofre (SO_3), sulfeto de hidrogénio (H_2S), NOx e CO_2 (Jung, et al., 2016).

Além disso, as próprias conchas de ostra podem ser utilizadas no mercado de aquicultura, seja como um recife especial de betão formulado para este efeito (Kong, et al., 2022), ou como substrato para o cultivo de novas ostras.

As conchas de ostra têm uma grande aplicabilidade nos materiais de construção. Destaca-se a sua utilização no betão, o material mais comum na construção civil. Estes resíduos podem ser utilizados não só como substituto do cimento (Maneeth, et al., 2022), mas também como substituto de agregados (Yoon et al., 2004; Bellei et al., 2024). A incorporação direta do pó de concha em substituição do cimento, mesmo numa fração reduzida, sem requerer calcinação, tem um alcance económico e ecológico significativo. Uma outra aplicação em desenvolvimento é a utilização do pó de concha de ostra como aditivo para asfalto, visando melhorar o desempenho técnico (Chao, et al., 2023).

3.2 "PARA ONDE QUEREMOS IR?"

Apesar do considerável volume de pesquisa e desenvolvimento de novas metodologias para a utilização de conchas de ostra como produto da economia circular, ainda é necessário estabelecer abordagens sustentáveis que maximizem o valor deste recurso e que, ao mesmo tempo, minimizem o desperdício e o impacte ambiental. Para alcançar esse objetivo, é imprescindível uma equipa multidisciplinar, visando analisar e otimizar o processo numa escala global.

Outro aspecto crucial é o mapeamento regional das necessidades de utilização das conchas. Portanto, é essencial o desenvolvimento de um sistema de informação geográfica (SIG) que integre as localizações das diferentes etapas em vários níveis, desde o local até ao regional. Isso permitirá avaliar os custos das operações, como as distâncias entre os intervenientes, as emissões de CO_2, condicionantes e otimização da operação, e os melhores destinos para o produto.

Combinando o conhecimento das economias regionais dos locais onde as conchas de ostra são produzidas, será possível selecionar uma aplicação adequada do material. A disseminação uniforme de informações sobre o tema e a preparação de materiais acessíveis para todos os públicos, desde investigadores até o público em geral, são imperativos e devem ser incentivados.

O desenvolvimento de investigação técnica para avaliar as propriedades químicas e mecânicas de diferentes espécies de conchas é importante e deve ser promovido para permitir a sua adoção

generalizada. Além disso, o estabelecimento de uma metodologia para maximizar a eficiência da recolha, limpeza e processamento das conchas de ostra, visando garantir sua utilização máxima e a geração mínima de resíduos e gastos de água, é essencial nos próximos anos.

Adicionalmente, é fundamental o envolvimento com as comunidades locais e partes interessadas para consciencializá-las sobre os benefícios da utilização de conchas de ostra, bem como garantir a distribuição equitativa dos benefícios económicos. Isso visa integrar os produtos derivados de conchas de ostra nos mercados e cadeias de abastecimento existentes, criando novas oportunidades económicas e promovendo o crescimento de indústrias sustentáveis.

3.3 "COMO PODEMOS LÁ CHEGAR?" – PROPOSTA DE ROTEIRO

Partindo da ideia de aplicar uma metodologia unificada como estratégia de desenvolvimento para aperfeiçoar a produção e qualidade de futuras pesquisas relacionadas com a aplicação de produtos, utilizando conchas de ostra no segmento da construção civil, optou-se por formular o roteiro em sete etapas: 1) recolha das conchas de ostra; 2) transporte; 3) triagem e limpeza; 4) identificação da aplicação dos resíduos de conchas; 5) processamento; 6) desenvolvimento de produto; e 7) disseminação dos resultados e comercialização.

A primeira etapa consiste na recolha das conchas de ostra, que pode ocorrer pós-consumo ou antes da comercialização das ostras. No primeiro caso, é necessário estabelecer parcerias com consumidores e implementar um processo de recolha que possa valorizar este resíduo. No segundo caso, o produto recolhido seria o resultado da mortalidade das ostras no processo de aquicultura, com uma média de 10 a 30% da produção. A Figura 2, desenvolvida em Magalhães et al. (2024), mostra o circuito dos bivalves desde a produção a possíveis destinos do resíduo.

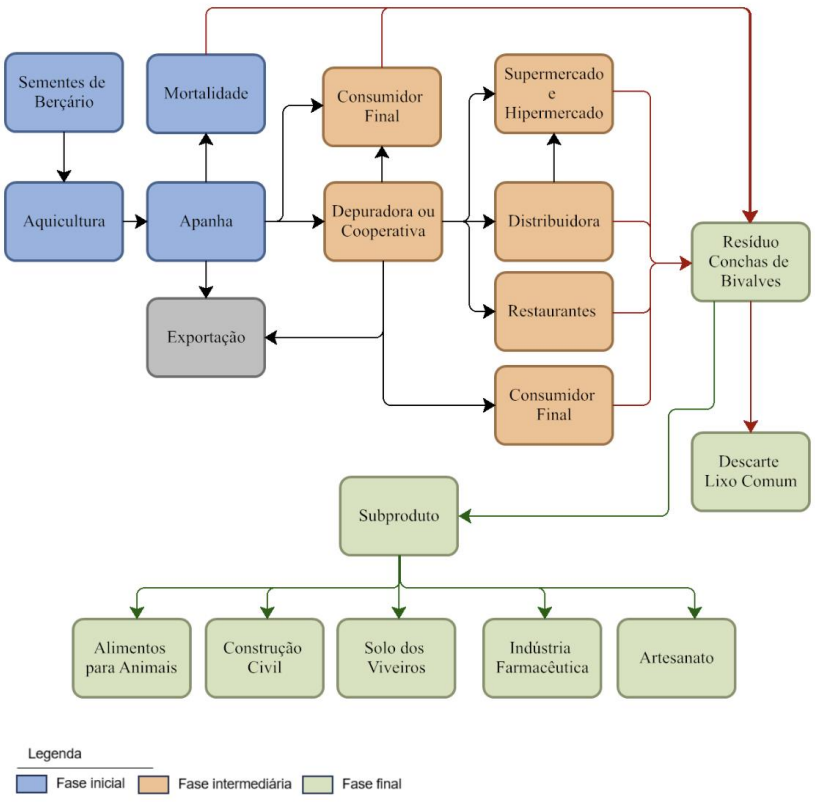


Figura 2 – Circuito dos Bivalves traduzido de Magalhães et al., 2024.

Após a recolha do produto, é necessário transportá-lo para uma instalação que possa operar como uma área de triagem e limpeza. Nesta instalação, é realizada uma triagem inicial e remoção de outros materiais que possam estar misturados com as conchas. Em seguida, o material deve ser limpo mecanicamente ou manualmente para remover resíduos orgânicos ou outras impurezas que podem estar associados no produto (Bellei et al., 2023b, Magalhães et al., 2024).

Após a fase de triagem e limpeza, é importante compreender quais são as principais aplicações para as conchas de ostra no setor da construção. Segundo Bellei et al. (2023a), a maioria dos estudos se concentra no uso da concha de ostra para a produção de betão, representando 79% dos casos analisados. Apenas 21% dos artigos tratam de argamassas de revestimento e assentamento (argamassas de cal), o que indica a necessidade de mais investigação no uso de argamassas com outros ligantes e para outras aplicações (Bellei et al., 2023b; 2024). A equipa, atualmente, está desenvolvendo blocos sustentáveis com a incorporação de resíduos de conchas de ostras, como parte do prêmio de investigação da VI edição do prémio Mares Circulares.

A etapa de processamento depende diretamente da anterior, uma vez que o tamanho e tipo das partículas é definido pelo futuro potencial uso das conchas de ostra. Em função das pesquisas desenvolvidas, o tipo de material após o processamento pode ter várias granulometrias (Figura 3): i) agregado grosso (partículas > 4,00 mm); ii) agregado fino (4,00 mm > partículas > 0,150 mm); iii) pó; iv) pó calcinado.

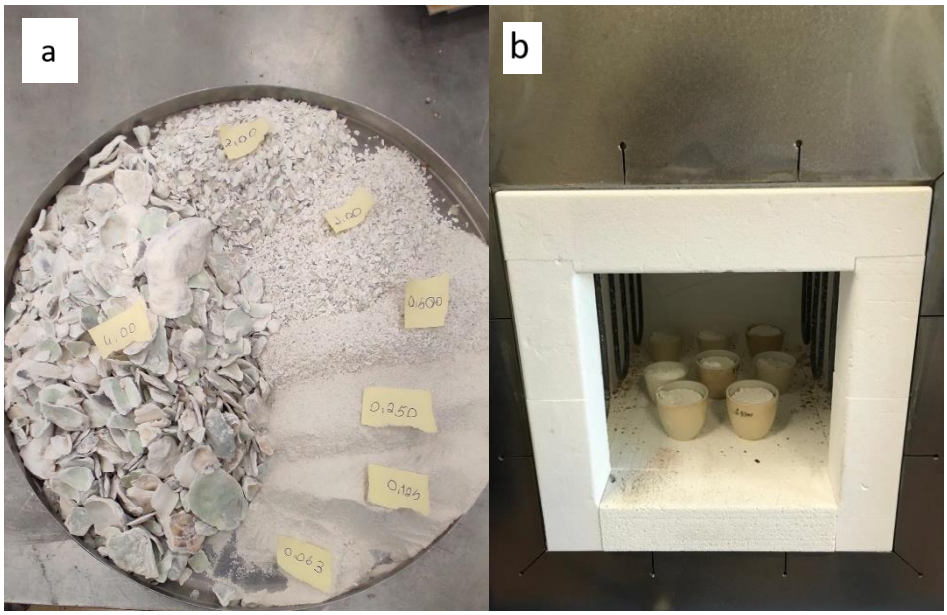


Figura 3 – Exemplo de diferentes granulometrias de conchas de ostra após o processamento (a), exemplo de pó de concha de ostra calcinado (b).

A análise das diferentes misturas é a etapa mais crítica, pois está diretamente relacionada ao desenvolvimento do produto. É essencial determinar a proporção ótima de conchas de ostra e a granulometria adequada (como pó ou agregado) para cada tipo de material, a fim de otimizar o desempenho das aplicações (Figura 4).

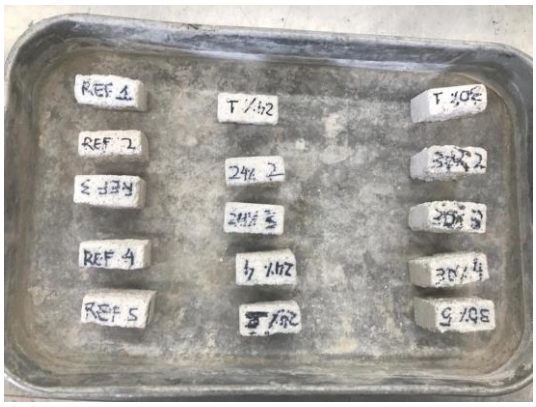


Figura 4 – Exemplos de provetes de argamassa com adição de diferentes quantidades de pó conchas de ostra.

Após definir a proporção de conchas de ostra no compósito, a realização de testes laboratoriais é crucial para garantir a qualidade e confiabilidade dos materiais de construção. Esses testes fornecem dados sobre o comportamento mecânico e o desempenho a longo prazo das misturas, permitindo identificar e corrigir deficiências antes da implementação generalizada. Finalmente, a comercialização e divulgação dos resultados são essenciais para promover a consciencialização, validar o desempenho, impulsionar a adoção no mercado, influenciar a aceitação regulatória e promover esforços de educação e divulgação. Comunicando eficazmente os resultados da pesquisa e os resultados do projeto no mercado de resíduos de conchas de ostra aplicados na construção civil, os intervenientes podem acelerar a transição para práticas de construção mais sustentáveis e resilientes que aproveitem as propriedades únicas das conchas de ostra. Na Figura 5 é esquematizado o Roteiro com as etapas principais.

4 CONCLUSÕES

A crise global de gestão de resíduos exige ação urgente para enfrentar a crescente produção e deposição de resíduos. A economia circular oferece uma solução prática, promovendo o uso contínuo, a reciclagem e a reabilitação de produtos e materiais. No setor da construção, que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e contaminação ambiental, soluções inovadoras são essenciais para minimizar o impacto ambiental e aumentar a eficiência.

As conchas de ostra, com sua alta concentração de cálcio, apresentam um potencial significativo para diversas aplicações. No entanto, há uma lacuna entre estudos de aplicabilidade e viabilidade. Enquanto os resultados laboratoriais são promissores, testes em larga escala são necessários para avaliar seu verdadeiro potencial. É crucial que a pesquisa seja interdisciplinar, desenvolvendo uma economia circular que seja ambientalmente e economicamente viável.

Nos últimos anos, as conchas de ostra passaram de resíduos descartados a subprodutos valiosos, evidenciando a inovação no setor. A exploração contínua desse potencial pode levar a desenvolvimentos importantes, reduzindo o desperdício e promovendo a economia circular azul.

Este estudo fornece um roteiro detalhado para a aplicação de conchas de ostra, visando facilitar a compreensão dos desafios e incentivar práticas mais sustentáveis na construção. Espera-se que inspire novos estudos e iniciativas para o aproveitamento de resíduos marinhos, promovendo um futuro mais sustentável.

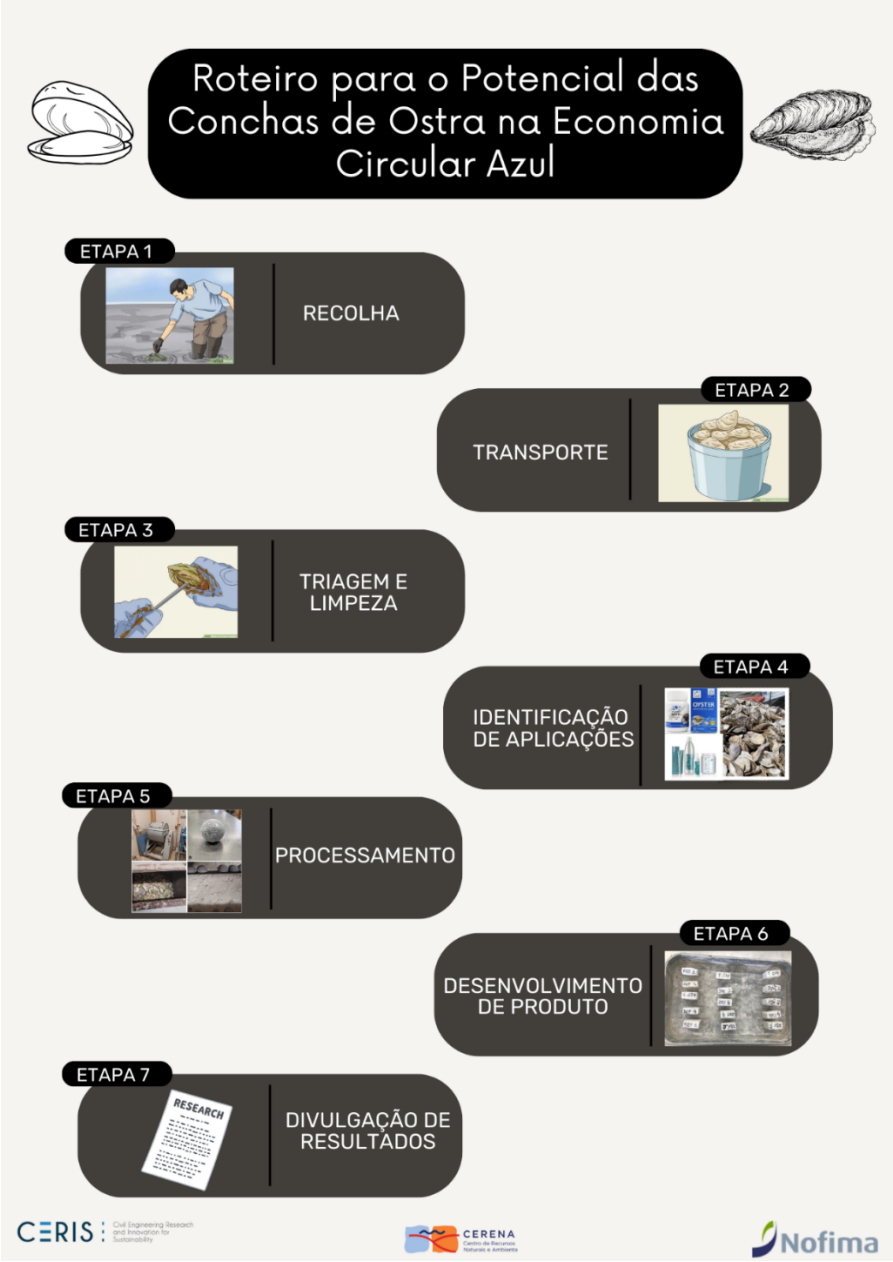


Figura 5 – Etapas principais do roteiro proposto

AGRADECIMENTOS

O estudo apresentado foi realizado no âmbito dos projetos: SHELLTER (FBR_OC2_30) e BLOCOYSTER (VI edição do prémio Mares Circulares). Os autores agradecem, respetivamente, o financiamento pelo fundo bilateral EEA Grants (Portugal e Noruega) e pelo prémio Mares Circulares que resulta da parceria da Liga para a Proteção da Natureza com a Coca-Cola. Os autores também são gratos ao CERIS (UIDB/04625/2020; https://doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020) e ao CERENA (UID/ECI/04028/2019), ambos unidades de investigação do IST, e à FCT pelo apoio financeiro com a bolsa de doutoramento com a referência: UI/BD/151151/2021 (https://doi.org/10.54499/UI/BD/151151/2021).

REFERÊNCIAS

APA. (2023). Instituto Nacional de Estatística - Estatísticas do Ambiente: 2022. Lisboa: INE. Disponível em https://www.ine.pt/xurl/pub/439545493. ISSN 0872-5276. ISBN 978-989-25-0659.

Asaoka, S., Yamamoto, T., Kondo, S., & Hayakawa, S. (2009). Removal of hydrogen sulfide using crushed oyster shell from pore water to remediate organically enriched coastal marine sediments. Bioresource Technology, 100(18), 4127-4132. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.075.

Bellei, P., Magalhães, F., Pereira, M., Torres, I., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2023). Innovative thermal renders incorporating oyster shells for sustainable insulation. Sustainability, 15, 15952. https://doi.org/10.3390/su152215952.

Bellei, P., Schäfer, G., Magalhães, F., Torres, I., Costa, E., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2024). Oyster shells' incorporation into mortar to achieve blue circular economy – LCA case study in Portugal. Procedia Structural Integrity, 55, 96-102. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.013.

Bellei, P., Torres, I., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2023). Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review. Buildings. https://doi.org/10.3390/buildings13061546.

Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. In H. Jarrett (Ed.), Environmental quality in a growing economy (pp. 3-14). Baltimore: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.

Cunha Nunes, L. C., Mota Santana, A. K., Soares Sobrinho, J. L., Felts de La Roca, M., Queiroga de Lima, E., & Rolim Neto, P. J. (2006). Obtenção de comprimidos contendo cálcio de conchas de ostras: pré-formulação e biodisponibilidade comparativa. Acta Scientiarum. Health Sciences, 28(1), 49-55. Redalyc. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=307223966008.

Delgado, A., Rodriguez, D. J., Amadei, C. A., & Makino, M. (2024). Water in Circular Economy and Resilience (WICER) Framework. Utilities Policy, 87, 101604. https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101604.

FAO. (2022). The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/cc0461en.

Hu, C., Zhong, D., & Li, S. (2023). A study on effect of oyster shell powder on mechanical properties of asphalt and multiple degrees of modification mechanism. Case Studies in Construction Materials, 18, e01786. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01786.

Jung, S., Heo, N. S., Kim, E. J., Oh, S. Y., Lee, H. U., Kim, I. T., Hur, J., Lee, G. W., Lee, Y. C., & Huh, Y. S. (2016). Feasibility test of waste oyster shell powder for water treatment. Process Safety and Environmental Protection, 102, 129-139. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.004.

Magalhães, F. C., Bellei, P., Flores-Colen, I., & da Costa, E. M. (2024). Blue Circular Economy—Reuse and Valorization of Bivalve Shells: The Case of Algarve, Portugal. Recycling, 9(2), 27. https://doi.org/10.3390/recycling9020027.

Maneeth, P. D., Shahapur, S., Jewargi, S., & Sridevi, G. (2022). To Evaluate the Properties of Concrete Including using Oyster Shell Powder in Place of Cement. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29167.92325.

Moon, D. H., Cheong, K. H., Khim, J., Wazne, M., Hyun, S., Park, J. H., Chang, Y. Y., & Ok, Y. S. (2013). Stabilization of Pb2+ and Cu2+ contaminated firing range soil using calcined oyster shells and waste cow bones. Chemosphere, 91(9), 1349-1354. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.007.

Pessoa, K., Salgado, R., Mata, A. M., & Quintella, C. (2019). Concha de ostra: Tendências recentes dos usos ambientais visando à economia circular. Cadernos de Prospecção, 12(4), 849-864. http://dx.doi.org/10.9771/cp.v12i4.

Phaal, R., & Muller, G. (2009). An architectural framework for roadmapping: Towards visual strategy. Technological Forecasting and Social Change, 76(1), 39-49. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.03.018.

Shih, O. K., & Chang, W. L. (2015). The effect of water purification by oyster shell contact bed. Ecological Engineering, 77, 382-390. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.014.

Topić Popović, N., Lorencin, V., Strunjak-Perović, I., & Čož-Rakovac, R. (2023). Shell waste management and utilization: Mitigating organic pollution and enhancing sustainability. Applied Sciences, 13(1), 623. https://doi.org/10.3390/app13010623.

Tsai, H. C., Lo, S. L., & Kuo, J. (2011). Using pretreated waste oyster and clam shells and microwave hydrothermal treatment to recover boron from concentrated wastewater. Bioresource Technology, 102(17), 7802-7806. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.036.

Wang, Z., Kong, J., Cong, G., Ni, S., Sun, J., Guo, C., Chen, M., & Quan, H. (2022). Recycling of waste oyster shell and recycled aggregate in the porous ecological concrete used for artificial reefs. Construction and Building Materials. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126447.

Yoon, H., Park, S., Lee, K., & Park, J. (2004). Oyster Shell as Substitute for Aggregate in Mortar. Waste Management & Research, 22(3), 158-170. https://doi.org/10.1177/0734242X04042456.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO USINADO

Cristian Sotomayor [a]; Mayela Castillo[a];
Francisco Gladston Holanda[b]; Raphael Vieira de Carvalho Holanda[b]

[a]Consulcreto, Av. Mariscal la Mar 550, Miraflores - Lima, Perú cristian.sotomayor@consultcreto.com
mayela.castillo@consultcreto.com

[b] Holanda Engenharia, Rod. Presidente Dutra, km 316 – Itatiaia, Rio de Janeiro, Brasil francisco@holandaengenharia.com.br
raphael@holandaengenharia.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta as diretrizes técnicas de ensaios e conclusões de estudos de escória de aciaria tendo como finalidade o aproveitamento como agregado para o emprego na produção de concreto estrutural e massivo.

O material corresponde ao resultante como rejeito nos processos da indústria de aciaria em instalações no Peru, tendo sido separado em três granulometrias distintas e denominado como ecogravilla, da fração não magnética do resíduo de rejeito.

As frações de agregado foram submetidas em processo de britagem, depois de ser resfriado na saída do forno elétrico e feita a recuperação do ferro metálico.

No processo da britagem para a obtenção das frações dos agregados, estabeleceu-se três faixas de tamanhos de agregados:

- Ecogravilla grossa: na faixa de 12,5 mm a 50 mm;
- Ecogravilla média: na faixa de 3,0 mm a 12,5 mm;
- Ecogravilla fina: na faixa de 0 a 3 mm.

Foram formuladas misturas de concreto empregando-se 100% da ecogravilla e uma segunda bateria de ensaios levando em conta a substituição de parte do cimento por escória finamente dividida por moagem prévia.

Para viabilizar o aproveitamento da escória e neutralizar reações de natureza expansiva devido à reatividade álcali-sílica ou álcali-silicato (RAS) bem como devido aos sulfatos (formação de etringita tardia) e limitação da penetração de cloretos nos concretos, foram realizados ensaios especiais de caracterização que nortearam na escolha do cimento adequado na formulação das misturas de concreto.

Palavras-chaves: Durável, sustentável, resíduos, escória, ecogravilla, RAS, sulfatos e etringita tardia.

1 INTRODUÇÃO

As escórias, de modo geral, representam um problema em muitos países, como no Brasil, onde se acumula esse tipo de resíduo em quantidades em geral superiores ao seu reaproveitamento na construção civil.

Viabilizar condições de aproveitamento deste tipo de material de rejeito, representa uma possibilidade para economizar recursos naturais e outras fontes de energias não renováveis.

Neste trabalho, apresenta-se os resultados de estudos efetuados com emprego de escória resultante do aproveitamento de sucata de ferro em uma importante indústria peruana com sede em Arequipa, partindo-se das patologias manifestadas de expansões e trincas ocorridas por reações internas da massa de concreto até as etapas de identificação dos agentes agressores aos concretos.

De posse da identificação da origem das expansões ocorridas, foram retomados os estudos de laboratório e determinadas uma série de misturas de concreto visando a neutralização dos mecanismos de expansão e desta forma, apresentando concretos empregando 100% de escória para esta situação específica de rejeito como agregado (fino e graúdos) para emprego no concreto.

Uma importante referência para os estudos específico apresentados neste documento, se refere aos estudos de cinzas volantes, dosagem de mistura de concretos contendo apenas cinzas volantes como aglutinante, métodos para melhorar a reatividade das cinzas volantes através de nano modificação ou do uso de calcário fino e cimentos à base de fosfato de que trata especificamente a publicação SP -294 do ACI – *American Concrete Institute* em referência. Além disso, novos métodos de utilização de resíduos de pó de vidro e cinza de casca de arroz como materiais de cimentação são detalhados. Os editores acreditam que esta coleção será uma adição útil à biblioteca para qualquer pesquisador, produtor de materiais ou usuário final interessado em materiais de ligação alternativos e sustentáveis para concreto.

2 ESTUDOS EFETUADOS

2.1 OBJETIVO

Neste caso específico, os estudos realizados visam a minimização de exploração e uso de materiais pétreos provenientes de pedreiras e de leito dos rios, com o incentivo de uso da escória resultante do processo de aproveitamento da sucata de ferro em misturas de concreto assim como material de aterro em pistas e estradas (bases e sub-bases).

2.2 OBTENÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS NOS AGREGADOS

2.2.1 Obtenção das Frações de Agregados

A Figura 1 apresenta a sequência de campo para a obtenção do agregado, que ora em diante, denominaremos como ecogravilla, termo cunhado em seu original no Peru (Cidade de Arequipa).

A principal matéria-prima utilizada para a fabricação do aço em um Forno EAF é a sucata de ferro. Minério de ferro e ferro ligas também podem ser carregados como elementos auxiliares. A etapa de fusão inclui uma série de fases como a oxidação, que visa eliminar as impurezas de manganês e silício, a desfosforação e a formação de escória de espuma onde se acumulam todas as impurezas.

Figura 1 – Sequência de Campo Para a Obtenção da Escória

2.2.2 Ensaios Realizados com a escória

- Análise da escória como agregado total, após os tratamentos:

Figura 2 – Escória Após Tratamento Antes de Passar pelo Britador e Peneiramento (aspecto visual)

Quadro 1 – Análise Química da Escória Como Agregado Total

Elemento	Unidade	Resultado
Al_2O_3	%	6.18
CaO	%	32.56
Cr_2O_3	%	0.77
Fe_2O_3	%	19.9
K2O	%	0.13
MgO	%	7.76
MnO	%	2.83
Na_2O	%	0.63
P_2O_5	%	0.28
SiO_2	%	24.21
TiO_2	%	0.52
		95.77

A determinação total de rochas é utilizada como ferramenta de classificação de rochas e matérias-primas para a indústria de materiais cerâmicos. Refere-se à análise química dos principais óxidos (Al2O3, CaO, Fe2O3, K2O, MgO, MnO, Na2O, P2O5, SiO2 e TiO2) em uma matriz mineral.

Quadro 2 – Análise Por Difratometria de Raio X

Mineral	Fórmula Química	%
Bredigita	$Ca_{1.7}Mg_{0.3}SiO_4$	24.00
Gehlenita	$Ca_2Al(AlSi)O_7$	13.00
Larnita	Ca_2SiO_4	13.00
Cuspidina	$Ca_4Si_2O_7F_2$	11.00
Wustita	FeO	10.00
Merwinita	$Ca_3MgSi_2O_8$	9.00
Magnetita	Fe_3O_4	9.00
Periclasa	MgO	7.00
Cuarzo	SiO_2	<L.D
		100.00

A técnica de DRX identifica espécies mineralógicas acima de 1,0%.

Quadro 3 – Gravimetria

Gravimetria	%
+125.0 (5")	4.9
-125.0 (5") a +50.0 (2")	29.8
-50.0 (2") a +25.0 (1")	45.8
-25.0 (1") a +19.5	2.4
-19.0 a + 12.5	3.4
-12.5 a +6.3	4.4
-6.3 +2.8	4.6
-2.8 +1.0	3.3
-1.0 +0.5	0.7
-0.5 +0.3	0.8

Quadro 4 – Periculosidade

Parâmetro	Unidade	LMP	Resultado
Reatividade HCN	mg/kg	250	<0.125
Reatividade H2S	mg/kg	500	<0.01
Inflamabilidade	mm/s	2.2	<2.2
Corrosividade	mmpy	6.35	<6.35
Toxicidade	mg/L	Metal Pesado	Não apresenta

Quadro 5 – Outras Propriedades Características Relevantes

Parâmetro	Unidade	Resultado
pH em pasta	Unidades de pH	11.6
Potencial de Acidez (PA)	T $CaCO_3$/1000 T da amostra	0.9
Potencial de Neutralização (PN)	T $CaCO_3$/1000 T de muestra	99.6
Potencial Neto de Neutralização(PNN)	T $CaCO_3$/1000 T de muestra	98.6
Relação (PN/PA)	---	106.2
Enxofre Total	%	0.12
Enxofre como sulfato	%	0.09
Enxofre como sulfeto	%	0.03

3 ESTUDOS EFETUADOS

Dois grupos de estudos de misturas de concreto foram considerados, sendo que em uma primeira etapa o aglomerante utilizado foi de 100% de uso nas misturas de concreto e em uma segunda etapa, uma parte do cimento foi substituída pela escória finamente dividida com a finalidade de verificar a possibilidade de uso do material de rejeito para a substituição de parte do cimento, conforme características indicadas na figura 3. Os teores de substituição em relação ao peso sólido do cimento foram de 10 e 15%.

Seguindo as diretrizes da publicação SP–294 que explora a contribuição de materiais como cinza volante e pó de calcário dentre outras possibilidades, no caso específico apresentado se utiliza um cimento com adição de excelente pozolana de origem vulcânica, além de verificar a atuação de pó de escória siderúrgica como substituição parcial do cimento.

Figura 3 –Escória Após Ser Submetida a Processo de Moagem

São apresentados resultados de rutura à compressão simples para corpos de prova cilíndricos ensaiados nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Nos dois grupos de estudos de dosagens foram verificadas misturas de concreto para atender valores característicos de resistência para 250 kgf/cm^2, 280 kgf/cm^2 e 350 Kgf/cm^2.

Foram realizados ensaios de verificação da expansibilidade nos concretos de resistência característica de 250 kgf/cm^2 segundo a norma ASTM C 157 - *Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*, tendo sido obtidos os resultados apresentados no quadro 6 a seguir.

Quadro 6 – Verificação da Expansão Em Misturas de concreto segundo a norma ASTM C157

Amostra	Idade (Dias)	Expansão (%)	Temperatura de Leitura (ºC)	Umidade Relativa (%)	Efeito Resultante	Contração Máxima (%)
C250-IP-55/45-M1-E1	1	0,0000	25,8	73,0	Expansão	0,020
	3	0,0100	25,3	73,0	Expansão	
	6	0,0100	25,1	73,0	Expansão	
	9	0,0000	25,4	73,0	Contração	
	12	0,0000	25,3	73,0	Contração	
	15	0,0000	25,3	73,0	Contração	
	18	-0,0100	25,3	73,0	Contração	
	21	-0,0100	25,3	73,0	Contração	
	24	-0,0100	25,3	73,0	Contração	
	26	-0,0100	25,3	73,0	Contração	
	28	-0,0200	25,3	73,0	Contração	
C250-IP-55/45-M1-E1	1	0,0000	25,8	73,0	-	0,0300
	3	-0,0100	25,3	73,0	Contração	
	6	-0,0100	25,1	73,0	Contração	
	9	-0,0100	25,4	73,0	Contração	
	12	-0,0200	25,3	73,0	Contração	
	15	-0,0200	25,3	73,0	Contração	
	18	-0,0200	25,3	73,0	Contração	
	21	-0,0300	25,3	73,0	Contração	
	24	-0,0300	25,3	73,0	Contração	
	26	-0,0300	25,3	73,0	Contração	
	28	-0,0300	25,3	73,0	Contração	

Os resultados obtidos, com o uso do cimento pozolânico IP Yura, indicam de modo geral uma discreta contração para as misturas de concreto estudadas, confirmando a eficiência da adição pozolânica na contenção da expansão.

3.1 MISTURAS DE CONCRETO – PRIMEIRA ETAPA

Nesta etapa, conforme concluído nos estudos efetuados, foi empregado 100% de cimento pozolânico (cimento IP Yura) que na composição apresenta 30% de adição de pozolana de origem vulcânica.

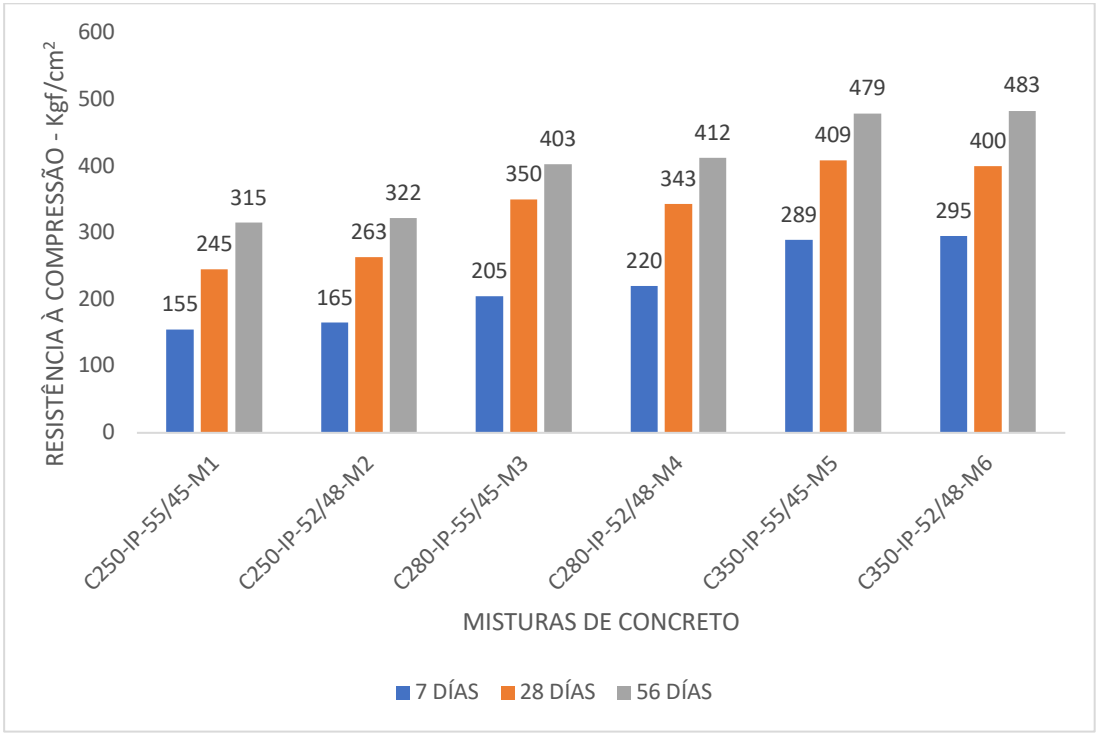


Figura 4 – Resistência à Compressão – 100% Cimento IP Yura como material aglomerante

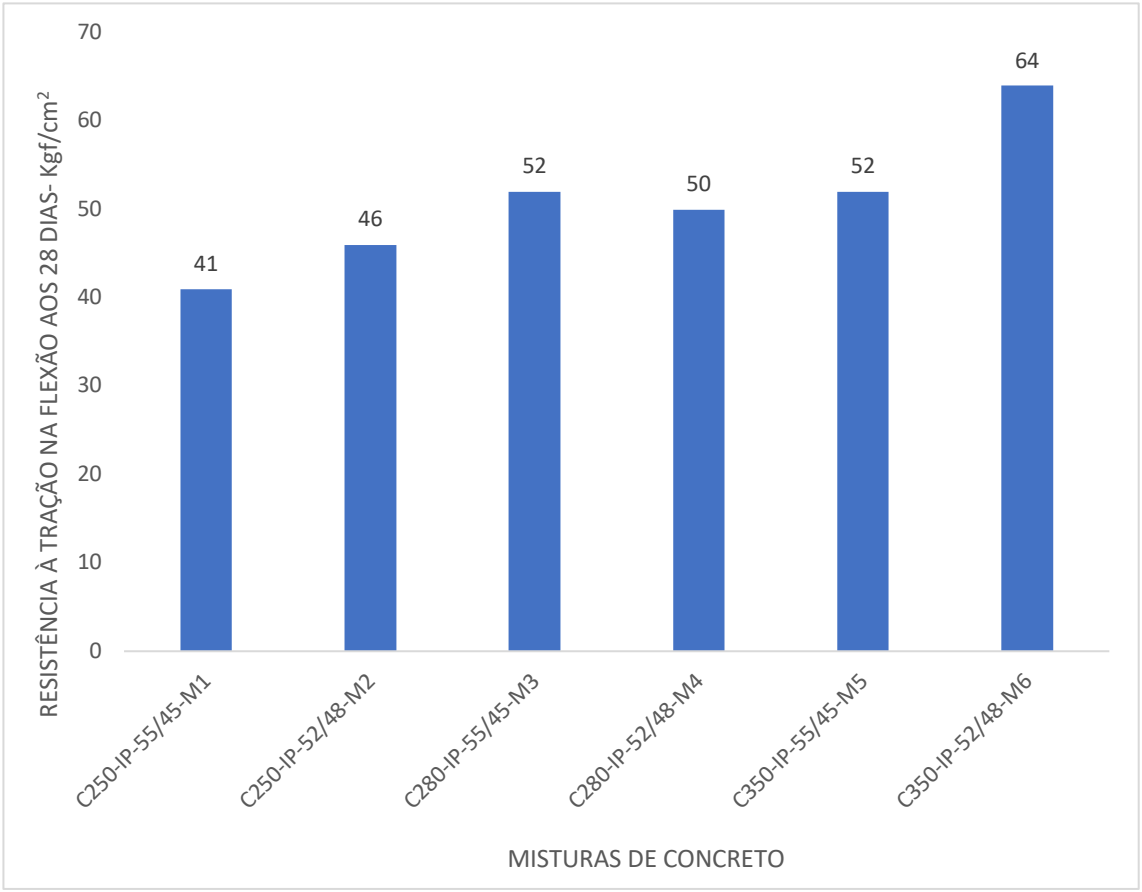


Figura 5 – Resistência à Flexão – 100% Cimento IP Yura como material aglomerante

Quadro 7 – Resumo das Composições das Misturas de Concreto (em kg/m^3) - 100% de cimento pozolânico IP Yura

MATERIAIS (Kg/m^3)	PROCEDÊNCIA	C250-IP-55/45-M1	C250-IP-52/48-M2	C280-IP-55/45-M3	C280-IP-52/48-M4	C350-IP-55/45-M5	C350-IP-52/48-M6
Cimento tipo Pozolânico IP	Fábrica de Cimento YURA Arequipa - Peru	320	320	360	360	430	430
Água		225	220	220	215	220	215
Ecogravilla fina	CAASA, Pisco - Peru	1128.0	1074.8	1110.8	1058.8	1066.6	979.4
Ecogravilla grossa	CAASA, Pisco - Peru	470.8	506.1	463.6	498.5	445.1	438.9
Ecogravilla Intermediaria	CAASA, Pisco - Peru	466.8	501.8	459.7	494.3	441.3	445.0
Aditivo Dynamon Xtend W575	Fabricante MAPEI	2.56	2.56	2.88	2.88	3.01	3.01
Aditivo Mapetard	Fabricante MAPEI	1.12	1.12	1.26	1.26	1.29	1.29
TOTAL		**2614**	**2626**	**2618**	**2631**	**2607**	**2513**

3.2 MISTURAS DE CONCRETO SEGUNDA ETAPA

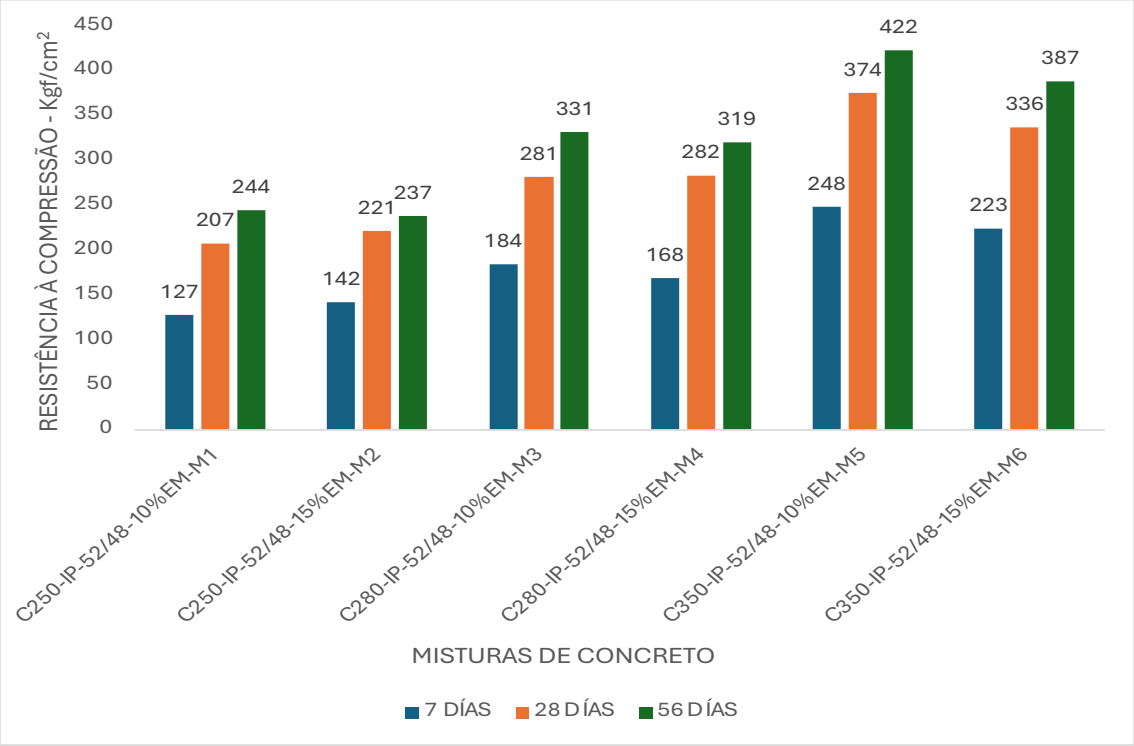


Figura 6 – Resistência à Compressão – Cimento IP Yura com 10 e 15 % de substituição de escória em relação ao peso sólido do cimento

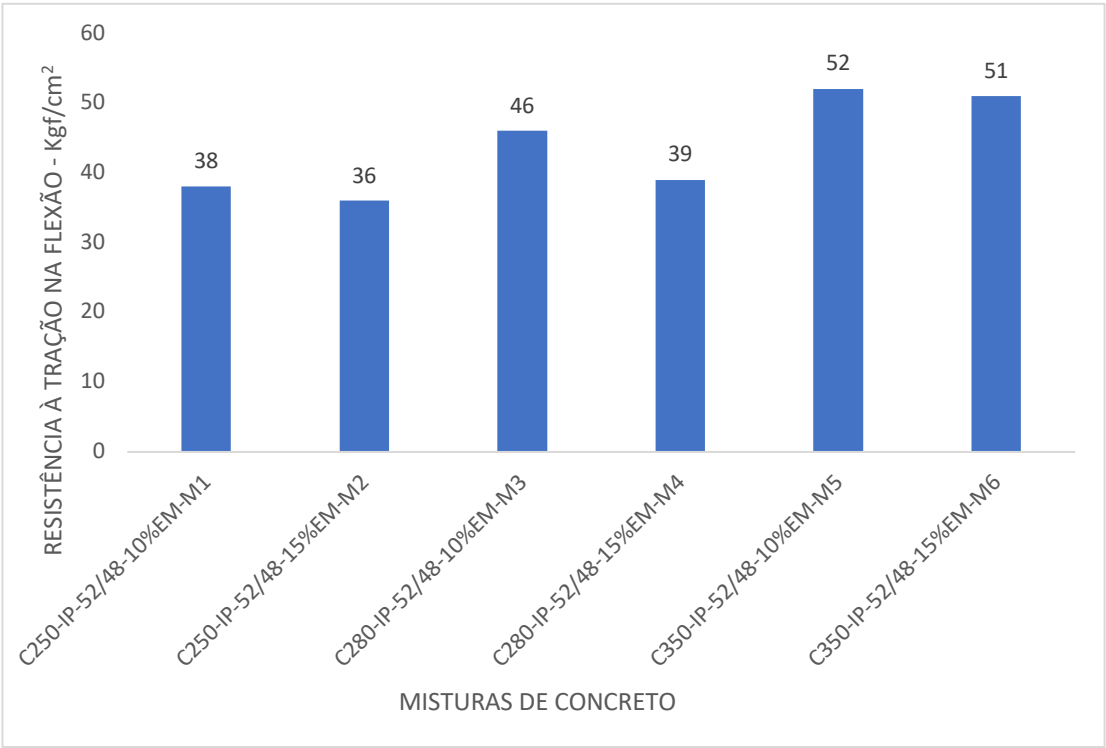


Figura 7 – Resistência à Tração na Flexão – Cimento IP Yura com 10 e 15 % de substituição de escória em relação ao peso sólido do cimento

4 CONCLUSÕES

Os estudos efetuados indicaram que as trincas ocorridas nos elementos pré-moldados no início da produção dos concretos, tiveram origem na utilização de escória com elevada concentração de álcalis na composição química da escória utilizada.

Com base nesta constatação, foi elaborado um critério seletivo de modo a melhorar o processo de resfriamento da escória e limitar o equivalente alcalino do material de rejeito.

Também foi controlado o teor de SO_3, de modo a mitigar o risco de ocorrência de etringita tardia "DEF" (*Delayed Etringitte Formation*).

Considerando que a falta de controle dos álcalis advindos da escória na etapa inicial e ainda o fato de ser empregado cimento do tipo comum nas misturas de concreto, a mudança para o cimento IP Yura, do tipo pozolânico, indicou pelos ensaios realizados, que a atividade pozolânica do aglomerante foi suficiente e necessária para neutralizar a expansão alcalina devido a RAS.

Foi proposta a idade de controle de 56 dias, sempre que a condição de uso do concreto fosse possível conforme a aplicação de projeto, visando diminuir ainda mais a carga de álcalis por m^3 de concreto com o potencial de reagir com o agregado de escória.

Com base nestes estudos, foram retomadas a produção de concreto para uso de modo geral, fabricação de pré-moldados e outras aplicações.

Figura 8 – Pré-moldados de vias de acesso de pedestres internos à fábrica

Figura 9 – Pré-moldados de Contenções de Zonas de Aterro

REFERÊNCIAS

Narayanna Neithalath e James Hicks (2013). *Advances in Green Binder Systems, American Concrete Institute*, SP – 294.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE OS ESTUDOS DOS MATERIAIS METÁLICOS

Adolpho Guido de Araújo[a, c]; Arnaldo Manoel Pereira Carneiro[b]; Paulo Martin Souto Maior[c]; Anne Marie Pessis[c]

[a]Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Pernanbuco, Rua Benfica, Madelena, 50.720-001, Recife, Brasil), aguia@poli.br

[b]Universidade Federal de Pernambuco (Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Av Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530, Recife, Brasil), adolpho.guido@ufpe.br

[c]Universidade Federal de Pernambuco (Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Arqueologia – Universidade Federal de Pernambuco, Av Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530, Recife, Brasil), pmsmaior@yahoo.com

RESUMO

Os estudos sobre os materiais metálicos antigos representaram informações que puderam ampliar a compreensão da evolução dos materiais metálicos no mundo. Este estudo teve como objetivo investigar de forma sistemática as pesquisas publicadas sobre arqueometalurgia com intuito de elucidar os principais aspectos dos materiais metálicos produzidos na antiguidade. Esta pesquisa direcionou as buscas sobre o tema na base de dados da *Web of Science* no período de 1945 até 2022 utilizando o *string* arqueometalurgia. A metodologia desta pesquisa seguiu uma abordagem de métodos mistos de revisão sistemática com a utilização do método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis*) para realização da pesquisa bibliométrica quantitativa e posteriormente, uma avaliação dos artigos incluídos através de métodos qualitativos. Em paralelo, um *software* denominado de *VOSviewers* foi utilizado para análise quantitativa dos documentos, periódicos, autores, países e instituições mais citadas. Os resultados demonstraram que as publicações referentes ao tema iniciaram a partir de 1987. Os periódicos, autores, instituições, artigos e países mais citados, em sua maioria, concentraram-se na America do Norte, Europa e Asia. As técnicas utilizadas para investigação dos materiais metálicos foram microscopia eletrônica de varredura com 28%, microscopia óptica com 26%, fluorescência de raio-x com 18%, microdureza com 9%, difração de raio-x com 8%, outros com 8%, raio-x com 2% e scanner com 1%. Finalmente, os estudos sobre os materiais metálicos puderam fornecer uma compreensão da história da tecnologia de produção e contribuir para ampliação do conhecimento de como as civilizações viviam no passado, bem como serviram de parâmetro para o desenvolvimento de materiais alternativos e sustentáveis.

Palavras-chave: Materiais Metálicos, Arqueometalurgia, Ciência dos Materiais, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

As investigações sobre os materiais metálicos representaram informações que ampliaram a compreensão da evolução da metalurgia (Hernandez-Escampa *et al.* 2010). O registro material do passado teve um papel importante (Wayman 2000) que permitiu a datação e o controle do contexto espacial dos dados (Levy *et al.* 2008). Os processos das produções dos materiais foram medidos por vários critérios, como o conteúdo total de emissões (gases de efeito estufa, poeira, outros produtos químicos e naturais), uso de matérias-primas, geração e reciclagem de resíduos (Giama e Papadopoulos 2015).

Os estudos dos materiais metálicos foram de grande importância para a compreensão das redes sócio-políticas existentes (Hsu *et al.* 2020). Determinar a composição química de objetos individuais puderam ajudar a localizar a origem do metal e potencialmente a data de produção (Alipour *et al.* 2021). Logo, os conhecimentos sobre os impactos ambientais dos materiais de construções permaneceram relativamente escasso (Ng *et al.* 2017).

A pesquisa em metalurgia deve continuar no ritmo acelerado (Wells 2014). As investigações sobre as origens e as composições dos materiais de construções são necessárias, pois as matérias-primas (agregados, areia, solo e água) e produtos manufaturados (cimento, tijolo, metais, madeira, gesso) promovem os bens para atender a indústria as custas de impactos negativos ao meio ambiente (Firmawan *et al.* 2016).

O desenvolvimento da engenharia civil vem sendo ampliado através das investigações dos materiais de construção, principalmente dos três materiais mais utilizados, a saber: cimentícios, cerâmicos e metálicos. Este artigo teve como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura sobre materiais metálicos no campo da arqueometalurgia, por se tratar da ciência que estuda os procedimentos de fabricação dos materiais metálicos antigos.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

Inicialmente utilizou-se a palavra-chave *Arqueometallurgy* para obteção ampla de um maior número de documentos/publicações no banco de dados da *Web of Science*. A pesquisa foi realizada em 15 de dezembro de 2022 e incluiu trabalhos publicados até o final de 2022. A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodológico desta pesquisa.

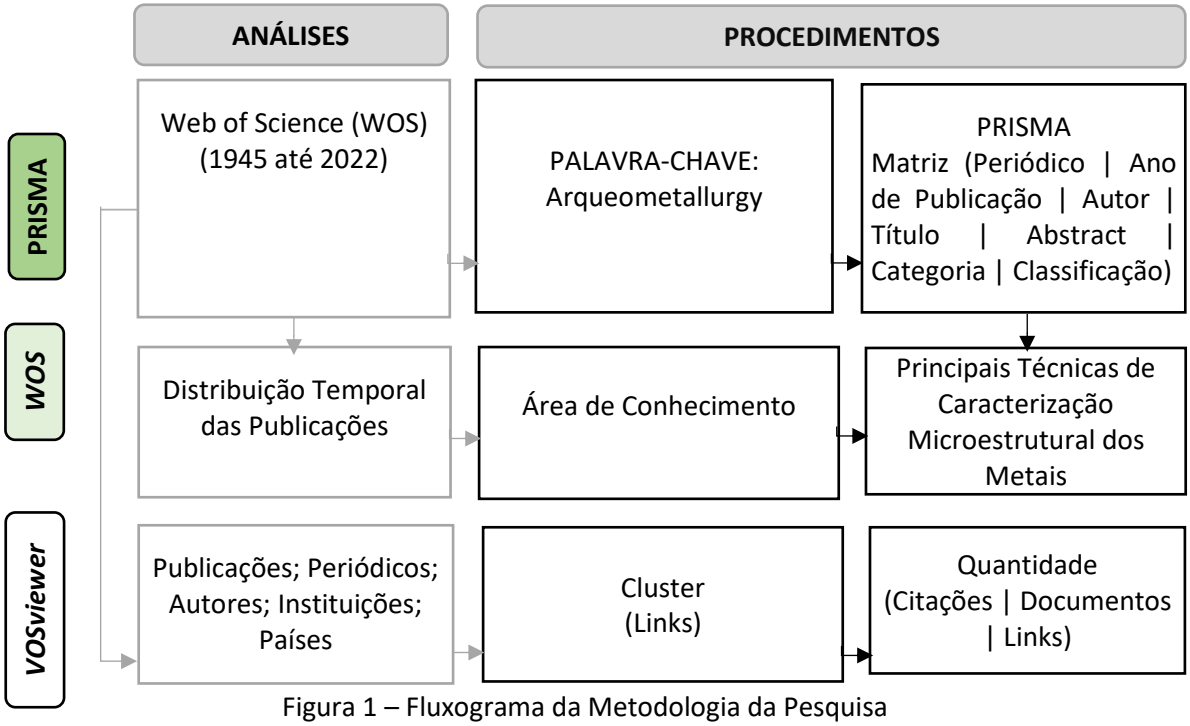


Figura 1 – Fluxograma da Metodologia da Pesquisa

A metodologia PRISMA foi aplicada para construção de um procedimento sistemático de investigação. O processo de recuperação dos documentos foi decomposto em quatro fases, divididas em: (i) Identificação; (ii) Seleção; (iii) Elegibilidade; e (iv) Inclusão (Moher et al. 2010). Na fase de Identificação foi utilizada a Palavra-Chave *Arqueometallurgy* e foram incluídos de forma prioritária os artigos das áreas de conhecimentos da ciência dos materiais e da engenharia, oriundos da base de dados da *Web of Science*, onde todos os artigos identificados foram recuperados para as demais fases. Na última fase foi incluido 64 artigos na pesquisa.

2.1 APLICAÇÃO DO *SOFTWARE (VOSVIEWER)*

O programa de computador denominado *VOSviewer* foi utilizado para realizar uma análise bibliométrica com algoritmos estruturados programados em java. Foram desenvolvidos mapas que indicaram os principais trabalhos e links das publicações de um grande conjunto de dados, possibilitando uma análise assertiva da produção intelectual da área pesquisada.

Segundo Eck e Waltman (2018), *VOSviewer* foi uma ferramenta de software desenvolvida para construção e visualização de mapas baseados em dados de redes bibliométricas onde o tamanho do círculo e da fonte de um item foi determinado pelo seu peso. A ferramenta computacional limitou-se a um tipo de análise (Citações) e a cinco unidades da análise: artigos, periódicos, autores, instituições e países.

2.2 ANÁLISE QUALITATIVA

O método qualitativo explicou os motivos dos números significativos de citações das unidades de análises, bem como verificaram horizontes de relevância desses achados. Todos os documentos incluídos na pesquisa foram lidos na íntegra para obtenção das informações substanciais nas identificações das técnicas utilizadas pelos pesquisadores para obtenções das descobertas sobre as composições e fabricações dos materiais metálicos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados promoveram as obtenções dos padrões gerais das áreas de conhecimentos e das publicações, periódicos, autores, instituições e países mais citados e, finalmente, as principais técnicas utilizadas.

3.1 PADRÕES GERAIS

O artigo mais antigo identificado na busca dentro da base de dados da Web of Science foi publicado no ano de 1987 e nos vinte anos subsequentes, (até 2007) não se observou um crescimento significativo de publicações. Entretanto, a partir de 2008 notou-se um interesse da ciência em relação ao tema e o quantitativo de pesquisas publicadas demosntrou um crescimento exponencial ao longo do tempo. Porém, outras bases de dados podem apresentar resultados mais antigos de publicação sobre arqueometalurgia. A Figura 2 apresenta os resultados da distribuição temporal das publicações sobre arqueometalurgia recrutadas na base de dados da *Web of Science*.

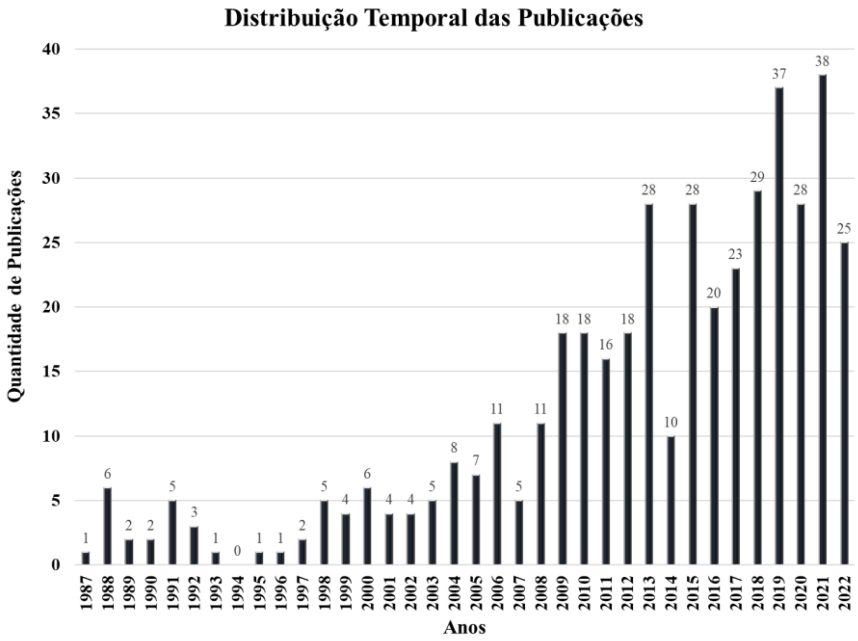


Figura 2 – Distribuição Temporal das Publicações

As publicações sobre os materiais metálicos antigos apresentaram um crescimento exponencial a partir de 1997 corroborando com a afirmação de Wells (2014) sobre a continuação do ritmo acelerado das pesquisas em metalurgia na direção da arqueometalurgia e surgimento de novidades na área.

3.2 DISTRIBUIÇÃO POR ÁREA DE CONHECIMENTO

Todos os 478 artigos foram analisados e identificados em 58 áreas do conhecimento que publicaram sobre arqueometalurgia. As dez áreas que obtiveram as maiores quantidades de pesquisas foram: (1) *archaeology* com 253; (2) *anthropology* com 136; (3) *geosciences multidisciplinary* com 135; (4) *metallurgy metallurgical engineering* com 63; (5) *materials science multidisciplinary* com 56; (6) *chemistry analytical* com 52; (7) *chemistry inorganic nuclear* com 27; (8) *history* com 26; (9) *mineralogy* com 21; (10) *materials science characterization testing* com 17. A Figura 3 apresenta distribuição das principais com mais de quatro trabalhos, por área de conhecimento.

Figura 3 – Distribuição por Área de Conhecimento

A área de arquoelogia obteve 253 publicações sobre os materiais metálicos através dos estudos voltados para arqueometalurgia. Reafirmado por Ružicka *et al.* (2020) que anunciaram a existência do interesse de pesquisa na área de conhecimento da arqueologia, mais especificamente a arquoemetalurgia para os estudos dos meios históricos utilizados para as fabricações dos materiais metálicos.

3.3 PUBLICAÇÕES MAIS CITADAS

Foram identificadas pelo *Software VOSviewers* um total de 142 publicações e classificadas pelo número de links de citações. Do total de 142 publicações foram selecionadas as publicações com maiores números de *links* resultando em 94 publicações (Figura 4).

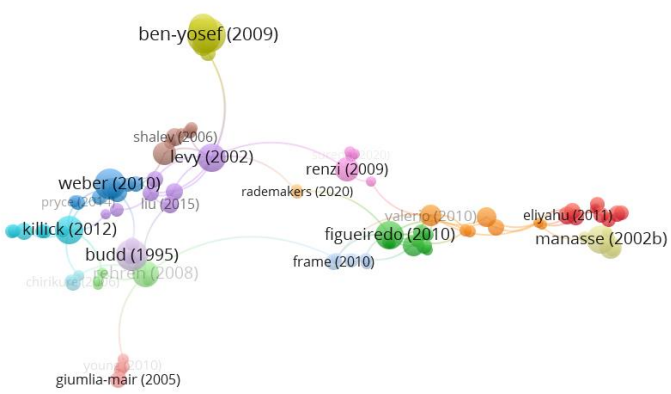


Figura 4 – *Cluster* das Publicações mais Citadas

A publicação mais citada foi classificada para este tópico da pesquisa e dissertou sobre o seguinte assunto, a saber: 1º) aumento de intensidade geomagnética registrado em depósito de escória de alta resolução no sul da Jordânia com 101 citações (Ben-Yosef *et al.* 2009), conforme Tabela 1.

Tabela 1– A Publicação mais Citada

A	B	C	D	E	F
1	Earth and Planetary Science Letters	2009	Ben-Yosef, E. et al.	Aumento de intensidade geomagnética registrado em depósito de escória de alta resolução no sul da Jordânia	101

Nota: **A**: número de ordem; **B**: Periódico da Publicação; **C**: Ano de Publicação; **D**: Autor; **E**: Título do Artigo; **F**: Quantidade de Citações.

Esta publicação (artigo), mais citada foi publicado pelo autor Erez Ben-Yosef em 2009 no periódico *Earth and Planetary Science Letters* com 101 citações até dezembro de 2023. O artigo de forma disruptiva, relatou a eficácia de combinar alta precisão no registro arqueológico, alta resolução de datação por radiocarbono e experimentos sistemáticos de arqueointensidade para rastrear e estudar carcterísticas incomuns do campo geomagnético (Ben-Yosef *et al.* 2009).

3.4 PERIÓDICOS MAIS CITADOS

Os periódicos mais citadas foram identificados pelo *software VOSviewers* considerando o seguinte parâmetro: número mínimo de 03 publicações e de 03 citações por periódico, onde no total de 148 periódicos recrutados nas 478 apenas 31 atenderam aos dois parâmetros definidos. A Tabela 2, apresenta o periódico mais citado com suas respectivas quantidades de publicações, citações e *links*.

Tabela 2– Periódico mais Citado

Nº	PERIÓDICO	DOCUMENTOS	CITAÇÕES	LINKS
1	*Journal of Archaeological Science*	49	956	90

Foram identificados 148 periódicos pelo *Software VOSviewers* e calculada a força total dos *links* de citações com outros periódicos. Do total de 148 periódicos foram selecionados os 31 periódicos com maiores números de *links*, entretanto alguns dos 31 periódicos da rede não estavam conectados entre si e precisaram ser excluídos da amostra o que resultou em 27 publicações com os maiores conjuntos de periódicos conectados no cluster (Figura 5).

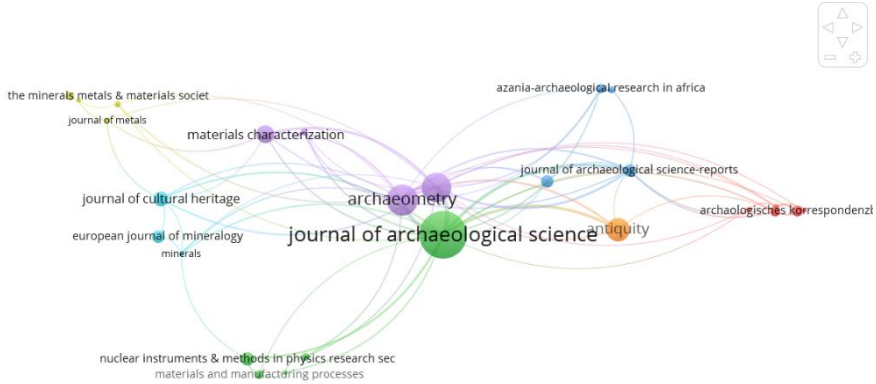


Figura 5 – *Cluster* dos Periódicos mais Citados

O periódico mais citado foi *Journal of Archaeological Science* com 956 citações em 49 artigos com 90 links. Este periódico é internacional dirigido aos centistas com interesses particulares no avanço do desenvolvimento e aplicação de técnicas e metodologias científicas na área da arqueologia (JAS, 2024).

3.5 AUTORES MAIS CITADOS

Os autores mais citadas em arqueometalurgia foram identificado pelo *software VOSviewers* considerando o seguinte parâmetro: ignorar as publicações com um número de autores maior e igual a 10 e incluir as publicações de autores com o número mínimo de 03 publicações e de 03 citações. As publicações recrutadas na *WOS* identificaram 1.141 autores, porém apenas 83 atenderam aos parâmetros definidos. O Tabela 3, apresenta o autor mais citado com suas respectivas quantidades de publicações, citações e *links* .

Tabela 3– Autor mais Citado

Nº	AUTORES	DOCUMENTOS	CITAÇÕES	LINKS
1	Ben-Yosef, Erez	6	256	39

Do total de 83 autores, foram selecionados os 74 com maiores números de *links* e conectados entre si para a construção do cluster encontrado na Figura 6.

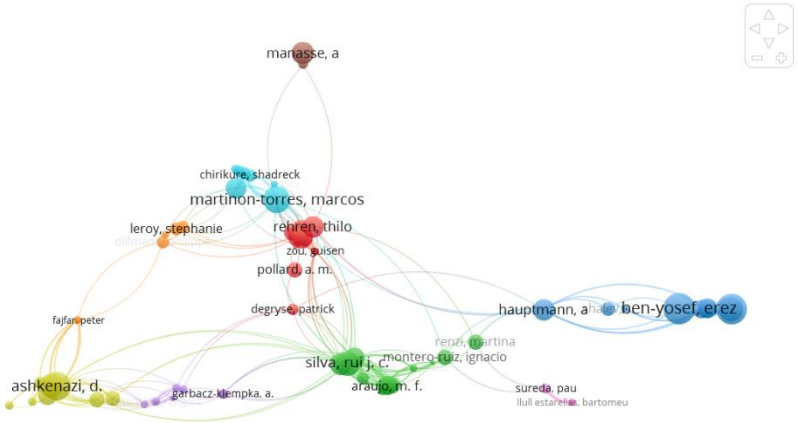


Figura 6 – *Cluster* dos Autores mais Citados

O autor mais citado foi Erez Ben-Yosef inserido no cluster azul com 256 citações em 06 artigos e 99 links na área de materiais metálicos antigos. Ele é autor de vários artigos de pesquisa sobre arqueometalurgia, arqueomagnetismo e arqueologia da idade do ferro (TVU, 2024).

3.6 INSTITUIÇÕES MAIS CITADAS

As Instituições mais citadas no campo da arqueometalurgia foram identificadas pelo *Software VOSviewers* considerando os seguintes parâmetros: ignorar as publicações com um número de Instituições maior e igual a 05 em sua co-autoria, número mínimo de 03 publicações e de 03 citações por Instituição. As publicações recrutadas na *WOS* totalizaram 515 Instituições, nas quais 73 atenderam aos parâmetros definidos. A Tabela 4 apresenta a instituição mais citada com suas respectivas quantidades de publicações, citações e *links*.

Tabela 4 – Instituição mais Citada

Nº	UNIVERSIDADES	DOCUMENTOS	CITAÇÕES	LINKS
1	University of California San Diego	12	537	68

Do total de 73 Instituições da rede, 08 não estavam conectadas entre si e o maior conjunto de Universidades conectadas no cluster consistiram em 65 Instituições (Figura 7).

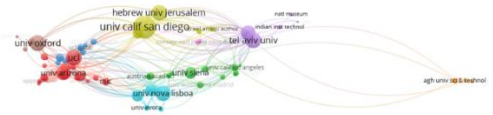


Figura 7 – *Cluster* das Instituições mais Citadas

A instituição mais citada foi *University of California San Diego* com 537 citações em 12 artigos com 68 *links*. Esta universidade oferece laboratórios e instalações de pesquisa de última geração com espaços inovadores para explorar e promover a criatividade (UCSD, 2024).

3.7 PAÍSES MAIS CITADOS

As análises dos Países com mais citações na área da arqueometalurgia foram identificadas pelo *Software VOSviewers* considerando os seguintes parâmetros: ignorar as publicações com números de países maiores e iguais a 05 na co-autoria das publicações, número mínimo de 03 publicações e de 03 citações por países. As publicações recrutadas na *WOS* identificaram 58 Países de um total de 193 reconhecidos no mundo segundo a Organização das Nações Unidas. Do total de 58 países identificados nas publicações, 37 atenderam aos parâmetros definidos na configuração de análise do *software*. A Tabela 5 apresenta o País mais citado com suas respectivas quantidades de publicações, citações e *links*.

Tabela 5 – País mais Citado

Nº	PAÍSES	DOCUMENTOS	CITAÇÕES	LINKS
1	USA	63	1208	275

Do total de 37 Países da rede, 01 não fazia parte das conexões e, dessa forma, o maior conjunto de Países conectados no cluster consistiu em 36 Países (Figura 8).

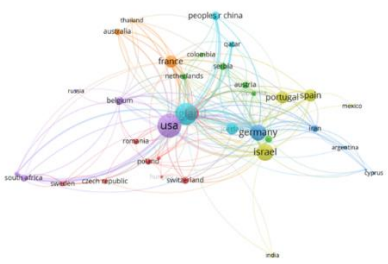


Figura 8 – *Cluster* dos Países mais Citados

O país com a maior quantidade de citação foi os Estados Unidos da América com 1.208 citações em 63 artigos com 275 *links*. A ciência, a tecnologia e a inovação são os pilares da economia americana e contituem as forças dominantes da sociedade moderna e do desenvolvimento econômico internacional (USDS, 2024).

3.8 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS METAIS

Na fase qualitativa, durante as leituras dos artigos, foi possível verificar que quase todas as publicações utilizaram alguma técnica de análise microestrutural, tais como microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia óptica (MO), fluorescência de raio-x (FR-X), difração de raio-x (DR-X), radiografia (raio-x), scanner 3D e outras técnicas como radiocarbono e avaliação eletroquímica (Figura 9).

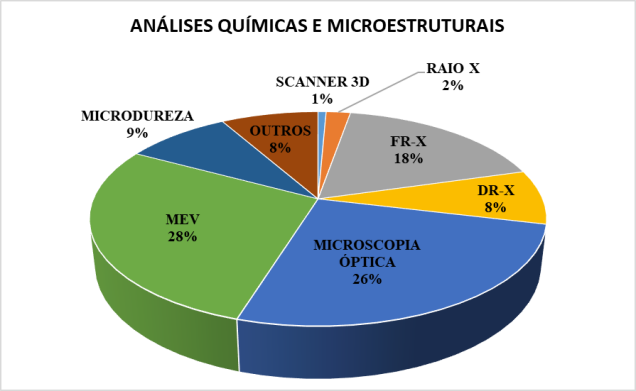


Figura 9 – Distribuição Gravimétrica das Técnicas de Analíticas para Caracterização dos Materiais Metálicos

As técnicas foram classifcadas e utilizadas conforme a seguinte distribuição: microscopia eletrônica de varredura com 28% como técnica qualitativa e quantitativa nas obtenções das informações do material metálico, seguida da microscopia óptica com 26%, em sequência foi a fluorescência de raio-x com 18%, em quarto foi a difração de raio-x com 8%, raio-x com 2%, e, finalmente, scanner 3D com 1%. Outras técnicas como radiocarbono e avaliação eletroquímica somaram 8%. As pesquisas realizadas por Ruiz (2010) no período de 1975 até 2000 revelaram outras técnicas utilizadas para as análises com abordagens analíticas nas quais 82,4% dos artigos forneceram informações estas técnicas que se cintituíram de metalografia (10,6%), estudos de isótopos planos (9,4%), microscopia óptica (8,2%), test físico (3,3%), estadística (9,0%) e radiografia (2,4%).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise elementar de espectroscopia de raios-X (EDS) de energia dispersiva serviu para identificar a morfologia e a composição química (Golan *et al.* 2019). Logo, o microscópio eletrônico de varredura foi utilizado em diversas áreas de interesse e associado à microscopia óptica para obter com precisão informações morfológicas e composicionais respectivamente (Bellanova *et al.* 2019).

A microscopia óptica serviu para identificação das características visuais da microestrutura tais como cor, textura, luz, refletância e forma. De acordo com Bellanova *et al.* (2019), a microscopia óptica foi adotada principalmente para analisar microestruturas e granulometrias, identificar defeitos e fornecer uma descrição do material metálico.

O equipamento de fluorescência de raio-x foi utilizado nas pesquisas para identificar os elementos químicos e estabelecer as concentrações em partes por milhões (ppm) dos elementos químicos identificados. Essa descrição foi apoiada por Rogan *et al.* (2019) que afirmaram que a fluorescência de

raios X portátil baseou-se no princípio de que os elementos têm uma energia de ligação única dos elétrons associados e permite que seja gerada a identificação precisa dos elementos químicos constituintes do material metálico.

A difração de raio-x foi uma técnica semi-quantiativa de identificação dos minerais através da incidência de raio-x característicos e contínuos. Afirmação compatível com Dinneker e Billinge (2008) que declararam que a difração de pó moderna forneceu um arquivo bruto de alguns milhares de dados de varredura passo a passo de fótons de raio-x contados por passo. Este arquivo bruto conteve todas as informações necessárias para a realizar uma análise cristalográfica gerando difratogramas com informações criptografadas sobre a estrutura do material da amostra, onde as posições e as intensidades dos picos de difração revelaram informações sobre uma estrutura cristalina ideal.

A radiografia (raio-x) identificou a zona de transição do núcleo original da liga metálica e sua camada de concreção ferruginosa e outros materiais que contaminaram a superficie do material metálico. Em concordância com Golan *et al.* (2019), o ensaio radiográfico (RT) serviu para examinar o estado de conservação do objeto e observar defeito material. Logo, a radiografia de raios-X foi uma técnica realizada em diferentes locais e projeções que pôde também revelar as localizações das linhas de solda-forja e a qualidade do material metálico (Aronson *et al.* 2013).

O ensaio de microdureza foi utilizado nos estudos dos metais para fornecer informações da dureza superficial na formação microestrutural dos cristais. Segundo Bellanova *et al.* (2019), o ensaio de dureza Vickers (HV) foi amplamente utilizado através de um equipamento denominado durômetro, que aplica um carga máxima de 10 kgf (HV10) durante o tempo de 15 segundos.

O scanner 3D serviu para registrar o volume e textura nas três dimensões do plano cartesiano (x, y e z) e pôde registrar toda a superfície da peça metálica preservando a peça em um arquivo digital com a possibilidade de reprodução utilizando uma impressora 3D.

4 CONCLUSÕES

Finalmente, entender a produção dos materiais do passado podem orientar as pesquisas de reprodução no contexto da conservação e preservação dos patrimônios histórico. Bem como, conduzir a indústria da construção na direção do desenvolvimento sustentável atendendo as suas três dimensões, a saber: social (preservação da história), econômica (redução do custo da construção) e ambiental (minimização da exploração de materias-primas). Logo, este artigo tratou de uma revisão sistemática da literatura relacionada aos estudos dos materiais metálicos antigos. Foi possível observar que os países desenvolvidos forneceram importantes contribuições na utilização da ciência dos materiais para elucidar evidências históricas das civilizações.

Um total de 148 periódicos publicaram artigos relacionados ao tema que foram distribuidos em 58 áreas do conhecimento, demonstrando a multidisciplinaridade dos estudos sobre arqueometalurgia. O mais influente dos periódicos com o maior número de documentos publicados (49), de citações (956) e de Links (90), registrados no banco de dados da *Web of Science* foi o *Journal of Archaeological Science*. Os maiores números de citações nos itens pesquisados foram do artigo “Aumento de Intensidade Geomagnética Registrao de Escória de Alta Resolução no Sul da Jordânia” com 101 citações, do autor “Erez Ben-Yosef” com 256 citações, da instituição “Universidade da California” com 537 citações e do país “Estados Unidos da America” com 1.208 citações. Essas informações solidificam a tese de que a concentração das maiores universidade do mundo estão no continente norte americano e da real existência de investimentos em pesquisas acadêmicas nos Estados Unidos da América ao longo dos anos.

Nesta pesquisa, foram investigadas prioritariamente as publicações indexadas à base de dados da *Web of Science*. Os autores realizaram ampliações nas buscas recrutando artigos interessantes descobertos nas referências bibliográficas dos artigos incluídos pelo método PRISMA, a fim de reduzir as perdas de artigos interessantes não encontrados pelo processo sistemático de revisão da literatura. Logo, foi possível perceber que existe uma necessidade iminente para a promoção de pesquisas direcionadas ao tema "Arqueometalurgia" nos países em desenvolvimento haja a vista a infraestrutura laboratorial reprimida existentes nesses países. Nessa perspectiva, os materiais de construções das edificações antigas situadas nos sítios históricos ficam limitados aos estudos observacionais e descritivos com base em evidências subjetivas. Diante disso, urge a necessidade de investimentos em equipamentos nos países em desenvolvimento para fornecer resultados objetivos corroborando e/ou discordando das evidências históricas subjetivas publicadas e visando um maior aprofundamento/investigação das informações.

REFERÊNCIAS

Alipour, R., Rehren, T., & Martinón-Torres, M. (2021). Chromium crucible steel was first made in Persia. *Journal of Archaeological Science*, *127*. https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105224

Aronson, A., Ashkenazi, D., Barkai, O., & Kahanov, Y. (2013). Archaeometallurgical investigation of the iron anchor from the Tantura F shipwreck. *Materials Characterization*, *78*, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.01.004

Bellanova, M., Baggioli, A., Rivolta, B., & Felicetti, R. (2019). Metallurgical characterisation of a historical metal tie-rod from Milan Cathedral. *Construction and Building Materials*, *226*, 888–898. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.272

Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T. E., Shaar, R., Ron, H., & Najjar, M. (2009). Geomagnetic intensity spike recorded in high resolution slag deposit in Southern Jordan. *Earth and Planetary Science Letters*, *287*(3–4), 529–539. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.001

Dinneker, & Billinge. (2008). *Powder Diffraction Theory and Practice* (R. E. Dinnebier & S. J. L. Billinge, Eds.). RSCPublishing.

Eck, N. J. Van, & Waltman, L. (2018). *VOSviewer Manual*.

Firmawan, F., Othman, F., Yahya, K., & Haron, Z. (2016). The green construction site index (GCSI): A quantitative tool used to assess an ongoing project to meet the green construction concept. *International Journal of Technology*, *7*(4), 530–543. https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i4.2660

Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2015). Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. *Journal of Cleaner Production*, *99*, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.006

Golan, O., Cvikel, D., & Kahanov, Y. (2019). Archaeometallurgical analysis of the bow drill from the fifth century BC Ma'agan Mikhael shipwreck. *Archaeological and Anthropological Sciences*, *11*(6), 2581–2595. https://doi.org/10.1007/s12520-018-0683-x

Hernandez-Escampa, M., Gonzalez, J., & Uruchurtu-Chavarin, J. (2010). Electrochemical assessment of the restoration and conservation of a heavily corroded archaeological iron artifact. *Journal of Applied Electrochemistry*, *40*(2), 345–356. https://doi.org/10.1007/s10800-009-0003-3

Hsu, Y. K., Sabatini, B., Bayarkhuu, N., Turbat, T., Giscard, P. H., & Klein, S. (2020). Discerning social interaction and cultural influence in Early Iron Age Mongolia through archaeometallurgical investigation. *Archaeological and Anthropological Sciences*, *12*(1). https://doi.org/10.1007/s12520-019-00952-y

JAS. (2024, July 25). *Journal of Archaeological Science*. Journal of Archaeological Science. https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-archaeological-science

Levy, T. E., Higham, T., Bronk Ramsey, C., Smith, N. G., Ben-Yosef, E., Robinson, M., Münger, S., Knabb, K., rgen Schulze, J. P., Najjar, M., & Tauxe, L. (2008). High-precision radiocarbon dating and historical biblical archaeology in southern Jordan. *PNAS*, *105*(43), 16460–16465. www.pnas.org/cgi/content/full/

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, *8*(5), 336–341. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007

Ng, T. S. T., Chan, J. H. L., Chan, G. K. C., & Zou, J. W. W. (2017). Environmental impacts of construction material production. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, *170*(3), 169–184. https://doi.org/10.1680/jensu.15.00009

Rogan, G., Tighe, M., Grave, P., Kealhofer, L., Yukongdi, P., & Wilson, S. C. (2019). Optimization of portable X-ray fluorescence spectrometry for the assessment of soil total copper concentrations: application at an ancient smelting site. *Journal of Soils and Sediments*, *19*(2), 830–839. https://doi.org/10.1007/s11368-018-2091-3

Ruiz, I. M. (2010). *Manual de Arqueometalurgia*.

Ružicka, J., Machu, M., & Hašcin, J. (2020). Archaeometallurgy - Experimental ferrous metallurgy. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 144–149. https://doi.org/10.37904/metal.2020.3454

TVU. (2024, June 25). *Tel Aviv University*. https://telaviv.academia.edu/ErezBenYosef

UCSD. (2024, June 25). *University of California San Diego*. University of California San Diego. https://ucsd.edu/about/visiting-tours/index.html

USDS. (2024, June 25). *U.S. Department of State*. U.S. Department of State. https://www.state.gov/policy-issues/science-technology-and-innovation/

Wayman, M. L. (2000). Archaeometallurgical contributions to a better understanding of the past. *Materials Characterization*, *45*(1044–5803), 259–267.

Wells, E. C. (2014). Archaeometallurgy in Mesoamerica: Current Approaches and New Perspectives, edited by Aaron N. Shugar & Scott E. Simmons, 2013. Boulder (CO): University of Colorado Press; ISBN 978-1-60732-200-9 hardback £43 & US$70; xviii + 258 pp., 74 ills., 15 tables. *Cambridge Archaeological Journal*, *24*(3), 561–563. https://doi.org/10.1017/s0959774314000973

Tema 3. Economia circular na construção

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE UM PROJETO RODOVIÁRIO BRASILEIRO: UMA ABORDAGEM POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Bruno Vendramini dos Santos[a,b]; Maruska Lima de Sousa Holanda[a]; Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira [a]; João Henrique da Silva Rêgo[a]

[a]Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, vendramini.bruno@gmail.com; maruskalimaholanda@gmail.com; claudiopereira@unb.br; jhenriquerego@unb.br

[b]Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Brasília, Brasil.

RESUMO

O setor de transportes impulsiona o crescimento socioeconômico, mas também gera consideráveis impactos ambientais. No Brasil, a manutenção e expansão da malha rodoviária federal entram em conflito com as metas de neutralidade climática do país. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável pelas rodovias federais brasileiras, carece de ferramentas para avaliar e mitigar as emissões de gases de efeito estufa de seus projetos, o que pode ser alcançado por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Além disso, a escassez e qualidade insuficiente de dados ambientais dos produtos rodoviários brasileiros levam à utilização de bases de dados estrangeiras nos estudos de ACV realizados no Brasil, gerando incertezas nos resultados. O objetivo geral desta pesquisa é aplicar a ACV para analisar as emissões de gases do efeito estufa de um projeto rodoviário desenvolvido pelo DNIT. A análise abrange as fases de produção de materiais, transporte e construção das obras. Adicionalmente, o estudo investiga a influência das principais disciplinas de projeto nos resultados, assim como as diferenças nos resultados decorrentes do uso de declarações ambientais do cimento *Portland* local em comparação com o uso declarações ambientais de seu equivalente produzido nos Estados Unidos da América e na Europa. Os resultados demonstram que a produção de materiais é a fase mais impactante nas emissões globais do projeto, contribuindo com mais de 78% em todos os cenários. A fase de transporte é a segunda maior contribuinte, representando mais de 16% das emissões globais. Por outro lado, a fase de construção das obras teve uma participação muito baixa em todos os cenários analisados. As disciplinas de pavimento novo e restaurado lideram em termos de emissões unitárias, seguidas pela disciplina de terraplanagem. O uso de declarações ambientais dos cimentos estrangeiros resultou em um aumento de 7,31% (Europa) e 12,9% (EUA) nas emissões globais do projeto. Em conclusão, a pesquisa oferece uma abordagem para estimar a carga ambiental dos projetos das rodovias federais brasileiras, permitindo a mitigação precoce das emissões de gases de efeito estufa na fase de desenvolvimento desses projetos, com foco em disciplinas e materiais-chave. Além disso, demonstra as potenciais distorções associadas ao uso de dados ambientais estrangeiros nos resultados dos estudos de ACV das rodovias federais brasileiras.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida, gases de efeito estufa, rodovia, projeto, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transporte tem um papel crucial no desenvolvimento social e econômico de qualquer nação e deve ser planejada adequadamente para atender à crescente demanda por mobilidade de passageiros e cargas. A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que em 2050 as viagens globais de passageiros e de transporte de cargas dobrem em relação aos níveis de 2010, o que demandará a construção de aproximadamente 25 milhões de quilômetros de novas faixas de rodovias pavimentadas e investimentos acumulados na ordem de 45 trilhões de dólares (Dulac, 2013). No Brasil, em um dos cenários simulados pelo Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035), estima-se que sejam aplicados 1,2 trilhão de reais em obras de infraestruturas de transportes até 2035, com um retorno de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de 11% (EPL, 2021).

No entanto, o papel-chave do setor de transportes não se limita aos aspetos econômico e social, tendo um impacto significativo também sobre o meio ambiente. Estima-se que cerca de 25% das emissões globais de CO_2 sejam atribuídas ao setor de transportes, cuja taxa atual tem uma previsão de crescimento de 60% até 2050 caso não sejam tomadas medidas adequadas para conter a sua evolução (WBG, 2021).

Segundo Diaz-Sarachaga *et al.* (2017), a influência do setor de transportes sobre o meio ambiente torna-se ainda mais relevante para as economias emergentes que planejam grandes investimentos para a expansão e manutenção das suas infraestruturas de transportes, como o Brasil. A matriz de transportes brasileira é dominada pelo modo rodoviário, com um total aproximado de 1,72 milhões de quilômetros de rodovias nos âmbitos federal, estadual e municipal. Desse total, aproximadamente 1,35 milhões de quilômetros são compostos por rodovias não pavimentadas (78,5%), e outros 157 mil quilômetros por rodovias planejadas (9,1%), que, somadas, representam um potencial aproximado de 1,5 milhões de quilômetros de vias a serem pavimentadas ao longo dos próximos anos no Brasil (DNIT, 2024a).

No entanto, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável pela administração direta das rodovias federais e pelo desenvolvimento das principais especificações técnicas para projetos de infraestrutura de transporte no Brasil, carece de uma ferramenta para avaliar e mitigar os impactos ambientais associados às soluções de engenharia de seus projetos rodoviários (DNIT, 2024b). Além disso, o Brasil enfrenta dificuldades em relação à disponibilidade e qualidade dos dados ambientais sobre os principais insumos rodoviários, levando a uma dependência de dados estrangeiros para o desenvolvimento de estudos nacionais de ACV (Vigon *et al*., 2017)

Nesse contexto, observa-se que o desafio a ser enfrentado pelo Brasil apresenta duas vertentes interligadas. A primeira refere-se à necessidade de ampliar e manter adequadamente a infraestrutura de transporte rodoviário, impulsionando setores econômicos cruciais para o desenvolvimento do país. A segunda vertente está relacionada às metas divulgadas pelo governo federal do Brasil na 28.ª Conferência das Partes da Organização das Nações Unidas (MMA, 2023) e consiste em conciliar os avanços impulsionados pela construção e manutenção das infraestruturas rodoviárias com os impactos negativos sobre o meio ambiente (Santero; Masanet; Horvath, 2011). O equilíbrio entre esses dois desafios pode ser alcançado com o emprego da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nos projetos rodoviários brasileiros (ABNT NBR ISO 14040, 2014; ABNT NBR ISO 14044, 2014).

Neste contexto, o objetivo principal desta pesquisa consiste no desenvolvimento de um modelo de ACV para investigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de um projeto executivo desenvolvido pelo DNIT para uma rodovia federal (nomeada BR-080/DF), localizada em Brasília – Distrito Federal, considerando as fases de produção de materiais, transporte e obras. Além disso, analisa-se a influência

das principais disciplinas de projeto nos resultados da ACV, bem como as diferenças nos resultados decorrentes do uso de declarações ambientais do cimento *Portland* local em comparação com o uso de declarações ambientais do tipo equivalente produzido nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa.

2 VISÃO GERAL DO ESTUDO DE CASO

O diagrama linear com o detalhamento das soluções de pavimentação do projeto da BR-080/DF consta na Figura 1. A construção da BR-080/DF está dividida em duas fases distintas. A fase inicial, que é o objeto deste estudo, abrange o segmento que vai do km 0 ao km 24,60, enquanto a fase subsequente será realizada entre o km 24,62 e o km 40,30.

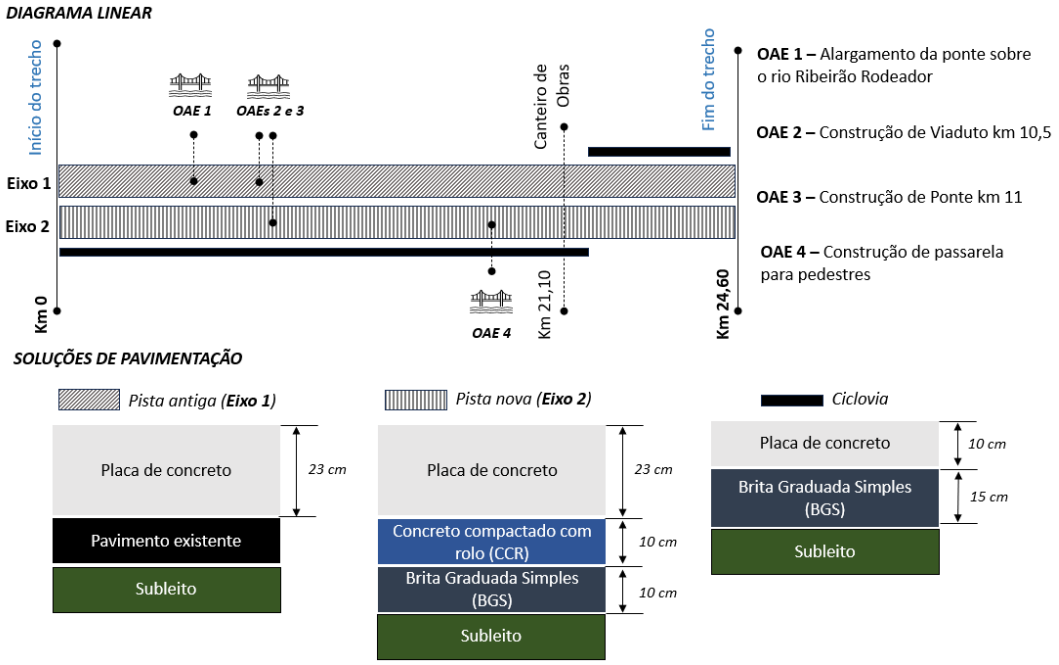


Figura 1 – Diagrama linear com as soluções de pavimentação do projeto da BR-080/DF
Fonte: Adapatado de DNIT, 2022.

As características predominantes do projeto da BR-080/DF estão listadas a seguir (DNIT, 2022):

- Nível de detalhamento do projeto: executivo;
- Trecho/segmento: Entr. BR-251(A)/DF-001/240(A) (Brasília) – Entr. DF-180(B) (Div. DF/GO) – km 0,00 ao km 24,60;
- Classe de projeto da rodovia: I-A (pista dupla com controle parcial de acesso);
- Tipo de região: predominantemente plana com superelevação máxima de 10%;
- Velocidade diretriz: 80 km/h;
- Seção transversal tipo: duas pistas de rolamento independentes, cada uma com 2 faixas com larguras individuais de 3,60 m, largura de acostamento externo de 3,0 m, largura de acostamento interno de 1,20 m e largura de canteiro central variável com média de 8,0 m; ciclovia paralela ao eixo da via e adjacente ao acostamento externo;
- Soluções de pavimentação: pistas de rolamento e acostamentos – implantação da pista nova com pavimento rígido de concreto e restauração da pista antiga usando a solução *whitetopping* (sobreposição de pavimento de concreto sobre o pavimento asfáltico antigo existente); e ciclovia – pavimento rígido de concreto;

- Vida útil de projeto dos pavimentos das pistas de rolamento: 20 anos, com o início da operação programado para o ano de 2025;
- Volume total de veículos comerciais ao longo da vida útil de projeto dos pavimentos: aproximadamente 17.000.000, sendo 18% ônibus e 82% caminhões, e
- Obras de Arte Especiais (OAEs): alargamento de uma estrutura existente e construção de três novas.

3 DADOS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesta pesquisa para o desenvolvimento do modelo de ACV incorporou as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT NBR ISO 14040, 2014; ABNT NBR ISO 14044, 2014) ou suas versões correspondentes na *International Organization for Standardization* (ISO), bem como as especificações de projeto das rodovias federais brasileiras, com ênfase particular nas normas do Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR) (DNIT, 2024b) e no Sistema de Custos de Referência de Obras (SICRO) (DNIT, 2024c). As fases metodológicas deste estudo incluem definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados.

3.1 OBJETIVO E ESCOPO

Como mencionado anteriormente, o objetivo principal deste estudo é desenvolver um modelo de ACV para avaliar as emissões de GEE associadas às fases de produção, transporte e construção de uma rodovia federal brasileira, seguido pela aplicação subsequente do modelo desenvolvido em um estudo de caso. As emissões de GEE são quantificadas e expressas em termos de CO_2 equivalentes (CO_2 eq.), e o estudo de caso selecionado é o projeto executivo do DNIT para a BR-080/DF (DNIT, 2022). O escopo do estudo abrange todo o projeto e a análise individual de disciplinas específicas, incluindo o pavimento novo, pavimento restaurado, terraplenagem, OAEs, drenagem e obras de arte correntes (OAC), e demais serviços como sinalizações vertical, horizontal e de obras, obras complementares como cercas, dispositivos de segurança viária, execução de paradas de ônibus, além de serviços ambientais e de paisagismos. Como objetivo secundário, dado o papel significativo do cimento no projeto da BR-080/DF (com 78.727 toneladas), foram investigadas as diferenças nos resultados de ACV com base no uso de declarações ambientais do cimento *Portland* produzido na região de execução das obras em comparação com o uso de declarações ambientais de seu equivalente produzido nos EUA e na Europa.

3.2 LIMITES DO SISTEMA, DADOS DE INVENTÁRIO E SAÍDAS DO MODELO DE ACV

Os limites do sistema são definidos pelos processos unitários considerados no estudo de ACV e foram projetados para abranger o ciclo de vida representado pelas fases de produção de materiais, transporte e construção das obras (ABNT NBR ISO 14040, 2014). A Figura 2 fornece uma visão geral dos limites do sistema considerados para o desenvolvimento do modelo de ACV, estruturado em três fases: Fase 1 – dados de engenharia, Fase 2 – dados ambientais e Fase 3 – Resultados.

A Figura 2 demonstra que a Fase 1 – dados de engenharia é a responsável por organizar os dados provenientes do orçamento do projeto da BR-080/DF nas fases de ACV Material (M), Transporte (T) e Obra (O). Isso inclui obter os parâmetros de desempenho dos equipamentos utilizados no projeto, o tipo de fonte de energia consumida (combustíveis ou eletricidade) e o total de horas produtivas de cada equipamento, além da relação de materiais com seus quantitativos correspondentes. As descrições associadas a cada uma dessas fases de ACV são: Material: engloba todas as operações necessárias para a produção dos materiais utilizados na execução dos serviços do projeto, desde a

extração da matéria-prima da natureza até o seu processamento final nas instalações industriais do canteiro de obras ou do centro comercial produtor/fornecedor. Todos os materiais listados no projeto, incluindo os equipamentos utilizados em sua produção, estão classificados nesta fase; Transporte: abrange todas as operações de transporte necessárias para a execução do projeto, e Obra: compreende todas as operações realizadas pelos equipamentos que atuam diretamente no campo, incluindo máquinas utilizadas nos serviços de terraplanagem, como motoniveladoras e escavadeiras, e na pavimentação, como texturizadora e vibroacabadora.

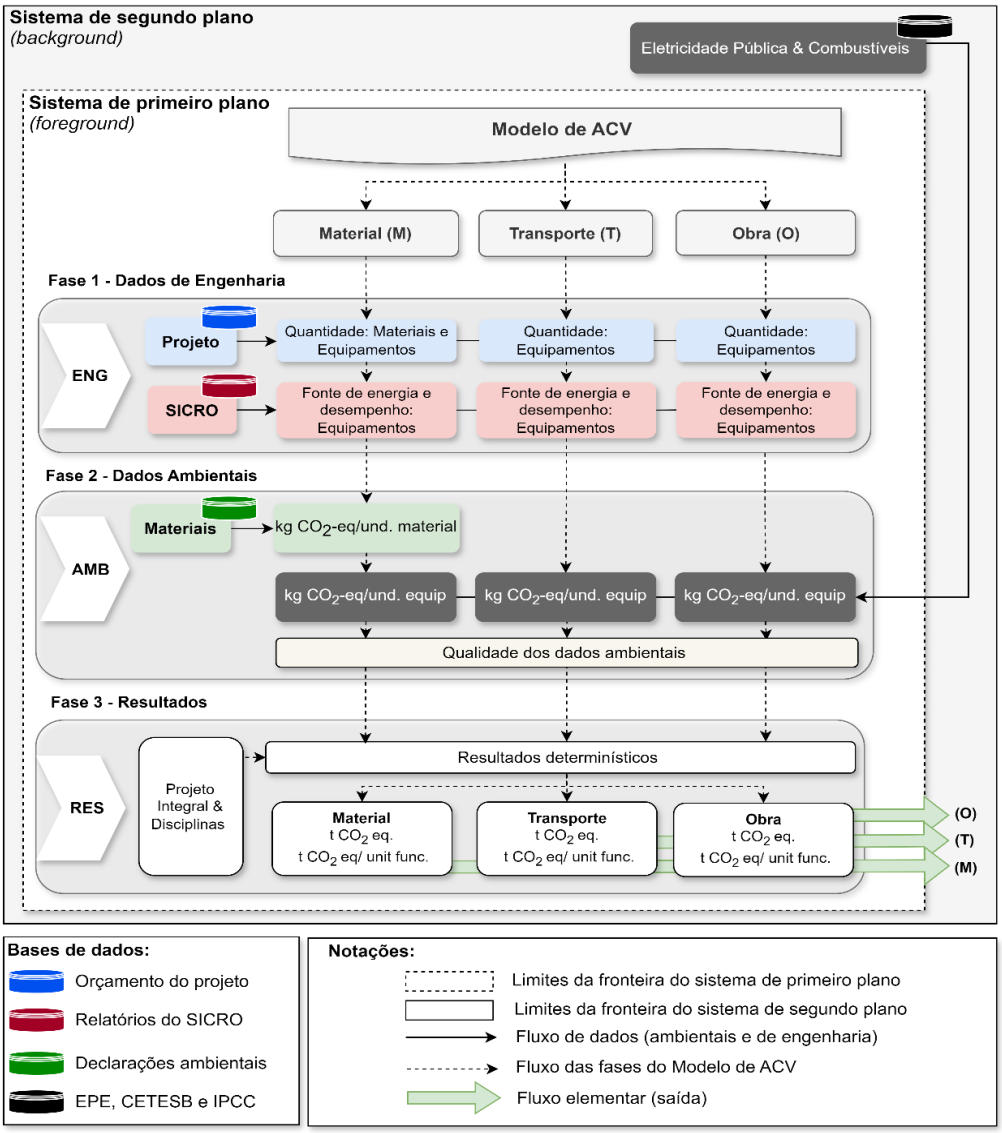


Figura 2 – Fluxograma do modelo de ACV
Fonte: Autores

Na Fase 2 - dados ambientais, são incorporadas ao inventário do modelo de ACV as informações sobre os fatores de emissão (kg CO_2 eq./und. funcional) relacionados ao processo de produção dos materiais (FEM), à geração de energia elétrica pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) (FEE) e à queima de combustíveis durante as atividades de operação dos equipamentos (FEC). Para os materiais, optou-se por selecionar referências de acesso público e cujas declarações ambientais tenham seguido as recomendações das normas ABNT NBR ISO 14040 (2014) e ABNT NBR ISO 14044 (2014), ou suas versões equivalentes publicadas pela ISO. Para o cálculo do FEE foram considerados os dados médios

nacionais divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (EPE, 2023), referentes ao período de jan./2023 a jul./2023, e para o FEC foram considerados os dados publicados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022) e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Esse último fator foi subdividido em dois: FEC_{gas} (relativo à queima da gasolina comercial brasileira) e FEC_{diesel} (relativo à queima do diesel comercial brasileiro).

De forma complementar, para a seleção dos FEMs foi considerada a Matriz de Pedigree proposta por Weidema (1998). Essa matriz emprega cinco indicadores para avaliar a qualidade dos dados ambientais dos estudos de ACV: confiabilidade da fonte, completude, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica. Esses indicadores são pontuados em uma escala de 1 (qualidade inferior) a 5 (qualidade superior), permitindo uma avaliação semiquantitativa da qualidade dos dados ambientais do inventário. Neste estudo, foram selecionados os FEMs com os melhores índices de qualidade.

Além dos requisitos anteriormente mencionados, foram incluídos no inventário do modelo de ACV materiais e equipamentos que representassem, em conjunto, pelo menos 95% da emissão total de CO_2 eq. do projeto selecionado. Com todos esses critérios, foram considerados no inventário do modelo deste estudo 11 materiais e 33 equipamentos.

Na Fase 3 – resultados, são apresentadas as saídas do modelo de ACV para os cenários de análise do Brasil (BR), Europa (EUR) e Estados Unidos da América (EUA). A única variável entre os três cenários é o FEM dos cimentos, cujas características principais estão descritas a seguir:

- Cenário BR
  Tipo de cimento: Cimento *Portland* CP II-F 32
  Declarante: VOTORANTIM CIMENTOS
  Representatividade geográfica: Sobradinho, Distrito Federal-DF, Brasil
  Representatividade temporal do inventário: 09/2022 – 09/2023
  Tipo de declaração ambiental: declaração ambiental sem validação por terceiros
  $FEM_{CIMENTO\text{-}BR}$: 606 kg CO_2 eq./ t de cimento
- Cenário EUR
  Tipo de cimento: *Portland Composite Cement* CEM II
  Declarante: CEMBUREAU (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION)
  Representatividade geográfica: Europa (dados médios)
  Representatividade temporal do inventário: 2016
  Tipo de declaração ambiental: declaração ambiental com validação por terceiros
  $FEM_{CIMENTO\text{-}EUR}$: 683 kg CO_2 eq./ t de cimento
- Cenário EUA
  Tipo de cimento: *Blended cement types* (IP, IS, IL, IT)
  Declarante: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)
  Representatividade geográfica: EUA (dados médios)
  Representatividade temporal do inventário: 2019
  Tipo de declaração ambiental: declaração ambiental com validação por terceiros
  $FEM_{CIMENTO\text{-}EUA}$: 742 kg CO_2 eq./ t de cimento

Procurou-se estabelecer a maior equivalência possível entre os tipos de cimento dos cenários de análise com base nas informações do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2022).

Os resultados do modelo de ACV são expressos em termos de emissão total, medidos em toneladas de CO_2 equivalente (t CO_2 eq.), e baseados nas unidades funcionais estabelecidas neste estudo (t CO_2 eq./ unidade funcional) (item 3.3). A Figura 3 contém o detalhamento das rotinas de cálculo da Fase 3 do modelo de ACV.

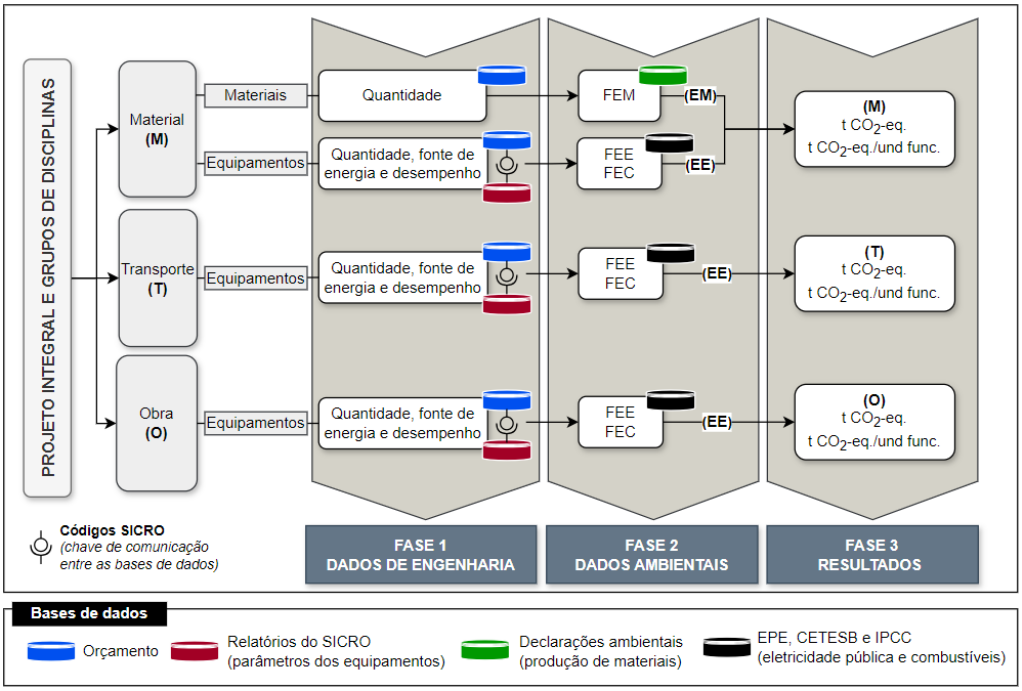


Figura 3 – Rotinas de cálculo da Fase 3 do modelo de ACV
Fonte: Autores

As expressões EM e EE da Figura 3 representam as equações utilizadas para obter os valores de emissão, tanto em termos de emissão total (t CO_2 eq.) quanto unitária (t CO_2 eq./und funcional), relativos à produção dos materiais e à operação dos equipamentos do projeto, respectivamente. As formulações dessas equações são detalhadas a seguir.

$$EM = \sum_{i=1}^{n} FEM_i \times QM_i \times 10^{-3} \quad (1)$$

Onde FEM_i é o fator de emissão referente ao processo de produção de cada material (em kg CO_2 eq/ und. de referência do material) e QM_i é a quantidade do material presente no projeto integral e indivialmente nas disciplinas (em unid. de referência do material).

$$EE = EE_{elet} + EE_{comb} \quad (2)$$

Sendo EE_{elet} e EE_{comb} os valores de emissão (em t CO_2 eq. ou t CO_2 eq./und. funcional) associados às atividades de operação dos equipamentos que funcionam com energia elétrica gerada pelo SIN e combustíveis comerciais brasileiros (diesel ou gasolina), respectivamente. As formulações dessas duas expressões são apresentadas a seguir.

$$EE_{elet} = \sum_{i=1}^{n} QHe_i \times Pe_i \times FEE \times 10^{-3} \quad (3)$$

Onde QHe_i é a quantidade total de horas operacionais de cada equipamento que utiliza eletricidade como fonte de energia (em h), Pe_i a potência nominal do equipamento (em kW) e FEE o fator de emissão relacionado à geração de energia elétrica pelo SIN (em kg CO_2 eq./kW h).

$$EE_{comb} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} QHc_i \times Pc_i \times CC_i \times FEC_j \times 10^{-3} \quad (4)$$

Em que QHc_i é a quantidade total de horas operacionais de cada equipamento que utiliza combustível como fonte de energia (em h), Pc_i a potência nominal do equipamento (em kW), CC_i o consumo médio de combustível pelo equipamento (em L/kW h) e FEC_j o fator de emissão da queima de combustível durante as atividades de operação do equipamento (em kg CO_2 eq./L).

Os resultados em termos de emissão unitária foram obtidos dividindo os valores de emissão total por 24,60 km (extensão linear total do projeto) para o projeto integral e as disciplinas: terraplanagem, pavimento-restauração, pavimento-novo, drenagem e OAC, e demais serviços. Para a disciplina de OAE, a emissão unitária foi obtida dividindo o valor de emissão total correspondente por 2.018,18 m² (área total de tabuleiro a executar). A rotina de cálculo apresentada na Figura 3 foi aplicada individualmente aos três cenários de análise: BR, EUA e EUR.

3.3 UNIDADES FUNCIONAIS

Os resultados do modelo de ACV estão vinculados a duas unidades funcionais. A primeira unidade funcional é representada pela construção de uma rodovia federal brasileira classe I-A de 1 km de extensão em uma região plana, com uma velocidade diretriz de 80 km/h e apresentando uma pista duplicada (2 pistas de rolamento independentes, cada uma com 2 faixas, com larguras individuais de 3,60 m), com um volume acumulado de veículos comerciais no 20º ano de 17.000.000. Essa unidade funcional foi aplicada aos resultados do projeto integral e aos grupos de disciplinas: terraplanagem, pavimento-restauração, pavimento-novo, drenagem e OAC, e demais serviços. A segunda unidade funcional refere-se à disciplina de OAE e consiste em 1 m² de tabuleiro de OAE construído em uma rodovia federal brasileira classe I-A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EMISSÃO TOTAL

A Tabela 1 apresenta os resultados de emissão total de CO_2 equivalente, segundo as fases de ACV, cenários de análise, projeto integral e suas disciplinas. Também estão descritos os valores globais de emissão associados a cada disciplina de projeto e cenário de análise, que representam o somatório dos valores correspondentes às emissões totais de CO_2 equivalente de suas fases de ACV.

Tabela 1 - Emissão total de CO_2 eq. segundo fases de ACV e cenários (em t CO_2 eq.)

Disciplina	Fase de ACV e Cenário					Valor global		
	Material			Obra	Transp.			
	BR	EUR	EUA	BR EUR EUA	BR EUR EUA	BR	EUR	EUA
Projeto integral	65.334	71.396	76.040	2.261	15.365	82.960	89.022	93.667
Terraplanagem	2.283	2.283	2.283	975	6.785	10.044	10.044	10.044
Pav. restauração	15.608	16.940	17.960	195	2.000	17.804	19.136	20.156
Pav. novo	37.245	41.281	44.373	340	4.184	41.770	45.805	48.897
OAE	1.948	2.076	2.174	173	95	2.216	2.344	2.443
Drenagem e OAC	4.075	4.424	4.692	147	77	4.300	4.649	4.916
Demais serviços	4.174	4.392	4.558	430	2.221	6.826	7.044	7.211

Na Tabela 1, observa-se que a fase Material se destaca na emissão total de CO_2 equivalente do projeto integral em todos os cenários avaliados. No cenário BR, essa fase de ACV contribui com 78,8% das emissões totais do projeto, enquanto no cenário EUR esse valor é de 80,2%. No cenário EUA, essa

contribuição é de 81,2%. A análise dos valores relativos à fase Material revela ainda que as principais diferenças entre os cenários estão nas disciplinas de pavimento novo, restauração do pavimento e drenagem/OAC. Essas disciplinas de projeto apresentam uma maior proporção de cimento em suas composições de serviço, o que contribui para as maiores diferenças relativas nos resultados de ACV.

A Figura 4 apresenta a contribuição individual das disciplinas na emissão total de CO_2 equivalente do projeto integral, segundo as fases de ACV e os cenários de análise.

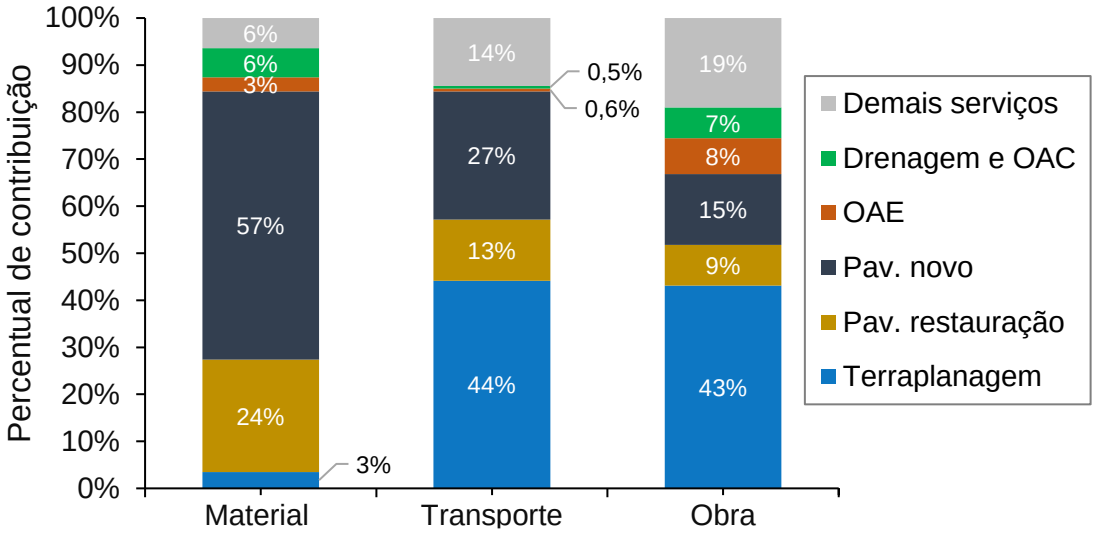


Figura 4 - Contribuição das disciplinas na emissão total de CO_2 eq. segundo fases ACV[1]

Nota (1): para a fase Material foram adotadas as médias dos valores entre os três cenários.

Observa-se que as disciplinas relacionadas à pavimentação predominam na contribuição do total de CO_2 equivalente da fase Material. Considerando a média entre os três cenários, o pavimento novo responde por 57% da emissão total dessa fase, seguido pela restauração do pavimento com 24%. Em conjunto, essas duas disciplinas respondem por aproximadamente 81% da emissão total de CO_2 equivalente da fase Material do projeto da BR-080/DF.

Na fase Obra, nota-se na Figura 4 que a disciplina de terraplanagem se destaca em relação às outras na emissão total de CO_2 equivalente, contribuindo com 43% de seu valor total. Em seguida, os demais serviços (com 19%) e o pavimento novo (com 15%) ocupam o segundo e terceiro lugares em termos de contribuição para o total de CO_2 equivalente dessa fase. As proporções identificadas estão relacionadas às diferenças de desempenho dos equipamentos de campo e aos volumes de serviços relacionados a cada disciplina de projeto, refletidos na carga horária total de operação e, consequentemente, no consumo total de combustível pelos equipamentos.

Quanto à fase Transporte, observa-se na Figura 4 que as emissões de CO_2 equivalente são lideradas pelas disciplinas de terraplanagem (44%) e pavimento novo (27%), seguidas pelos demais serviços (14%) e restauração do pavimento (13%). As disciplinas de OAE e drenagem/OAC apresentam contribuições individuais muito baixas nessa fase, próximas de 1%. O predomínio da disciplina de terraplanagem nessa fase é justificado pela natureza de seus serviços, como o transporte de materiais das jazidas de empréstimo para as frentes de obra, onde a Distância Média de Transporte (DMT) chega a alcançar 61,56 km para uma das jazidas indicadas no projeto. Para a disciplina de pavimento novo, o predomínio é explicado pelo transporte de grandes quantidades de insumos, como aço (com DMT de 60,4 km) e cimento (com DMT de 65,6 km), dos centros fornecedores para o local das obras.

A Figura 5 mostra a influência média das fases de ACV na emissão total das disciplinas, destacando a participação da fase Material sobre as emissões totais das disciplinas de pavimento novo, pavimento

restaurado, OAE, drenagem/OAC e demais serviços. Em relação à disciplina de terraplanagem, suas emissões são majoritariamente governadas pela fase Transporte com 67,6%, seguida pela fase Material, contribuindo com 22,7%, enquanto a fase Obra contribui com 9,7%. Deve-se ponderar que a contribuição da fase Material no resultado da disciplina de terraplanagem provavelmente não segue o padrão observado em outros empreendimentos rodoviários de características semelhantes. Isso se deve ao fato de que o projeto da BR-080/DF prevê a execução pontual de aterros estaqueados com perfis metálicos, o que aumenta significativamente a participação da fase Material nessa disciplina.

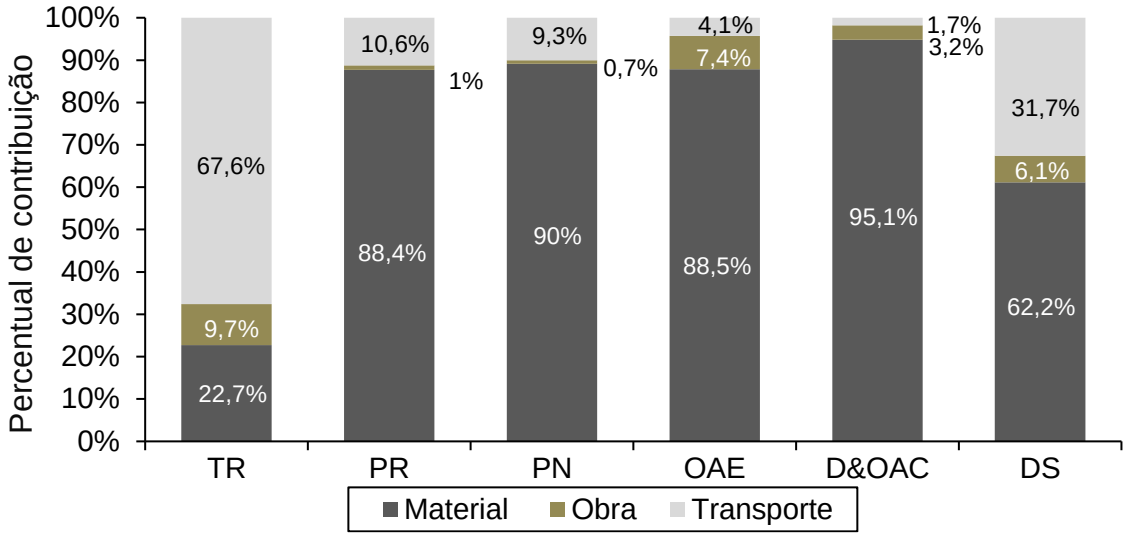


Figura 5 - Contribuição das fases ACV na emissão total de CO_2 eq. das disciplinas de projeto [1]. Nota (1): para a fase Material, foram adotadas as médias de valor entre os três cenários para todas as disciplinas. Acrônicos: TR: terraplanagem; PR: pavimento-restauração; PN: pavimento novo; OAE: obra de arte especial; D&OAC: drenagem e obra de arte corrente; DS: demais serviços.

4.2 EMISSÃO UNITÁRIA

A Tabela 2 apresenta os resultados de emissão unitária de CO_2 equivalente segundo as fases de ACV, cenários de análise, projeto integral e suas disciplinas.

Tabela 2 - Emissão unitária de CO_2 eq. segundo fases de ACV e cenários (em t CO_2 eq./und. func.[1])

Disciplina	Fase de ACV e Cenário					Valor global		
	Material			Obra	Transp.			
	BR	EUR	EUA	BR EUR EUA	BR EUR EUA	BR	EUR	EUA
Projeto integral	2.653,68	2.899,90	3.088,56	91,83	624,09	3.369,61	3.615,83	3.804,49
Terraplanagem	92,72	92,72	92,72	39,62	275,60	407,95	407,95	407,95
Pav. restauração	633,97	688,05	729,50	7,93	81,27	723,17	777,25	818,69
Pav. novo	1.512,80	1.676,71	1.802,31	13,80	169,98	1.696,57	1.860,49	1.986,09
OAE	0,97	1,03	1,08	0,09	0,05	1,10	1,16	1,21
Drenagem e OAC	165,53	179,70	190,57	5,98	3,14	174,64	188,81	199,68
Demais serviços	169,55	178,38	185,15	17,47	90,25	277,27	286,10	292,87

Nota (1): para a OAE a unidade funcional é expressa em 1 m², enquanto para o projeto integral e as demais disciplinas em 1 km, conforme descrito no item 3.3.

Os resultados da Tabela 2 destacam o pavimento novo como a principal fonte de emissão unitária global de CO_2 equivalente do projeto, com valores de 1.696,57 t CO_2 eq./km no cenário BR, 1.8060,49 t CO_2 eq./km no cenário EUR e 1.986,09 t CO_2 eq./km no cenário EUA. Esses resultados apresentam uma ordem de grandeza similar ao observado na literatura (Souza, 2017). Na sequência, a restauração

do pavimento, com resultados que variam entre 723,17 t CO_2 eq./km (cenário BR) e 818,69 t CO_2 eq./km (cenário EUA), e a terraplanagem com 407,95 t CO_2 eq./km, ocupam respectivamente a segunda e terceira posições em termos de emissões unitárias globais do projeto da BR-080/DF.

Por fim, ao analisar os valores relativos ao projeto integral, verifica-se que o cenário BR exibe a menor emissão unitária global de CO_2 equivalente entre os cenários investigados, totalizando 3.369,61 t CO_2 eq./km. As diferenças percentuais em relação ao resultado do cenário nacional são de 7,31% para o cenário EUR e 12,9% para o cenário EUA. Essas diferenças demonstram a elevada sensibilidade dos resultados do modelo de ACV às variações de valor do FEM do cimento.

5 CONCLUSÕES

O modelo de ACV desenvolvido possibilitou o cumprimento dos objetivos estabelecidos. As principais conclusões deste estudo estão descritas a seguir:

- O cenário BR possui as menores emissões totais de CO_2 eq., tanto para o projeto integral quanto para suas disciplinas, seguido pelo cenário EUR e, por fim, o cenário EUA, que apresentou as maiores emissões. As variações nos resultados derivam dos diferentes FEM do cimento;
- A fase Material contribuiu significativamente para a emissão total de CO_2 eq. do projeto integral, seguida pela fase Transporte. Por outro lado, a fase Obra teve contribuições mínimas em todos os cenários;
- Na fase Material, as disciplinas de pavimento novo e restaurado são responsáveis por aproximadamente 81% das emissões totais dessa fase. Isso demonstra a importância das disciplinas de pavimentação nas emissões totais do projeto investigado e ajuda a compreender o comportamento das pesquisas de ACV de rodovias encontradas na literatura, que frequentemente dão prioridade a essas disciplinas em seus estudos;
- A fase Transporte, sendo a segunda maior fase de ACV em termos de contribuição para a emissão total de CO_2 eq. do projeto integral, também pode desempenhar um papel ambiental significativo, dependendo das DMTs do projeto;
- Os resultados de emissão unitária de CO_2 eq. mantiveram a ordem de classificação dos cenários, portanto com o cenário BR apresentando as menores emissões, seguido pelos cenários EUR e EUA. Em todos os cenários, a disciplina de pavimento novo apresentou as maiores emissões unitárias de CO_2 eq., seguida pelas disciplinas de pavimento restaurado e de terraplanagem, e
- As disciplinas de demais serviços, drenagem/OAC e OAE ficaram respectivamente na quarta, quinta e sexta posições em termos de emissões unitárias de CO_2 eq., com os menores resultados.

No entanto, deve-se notar que esta pesquisa não analisou a influência da qualidade dos dados ambientais sobre as incertezas dos resultados do Modelo de ACV. Nesse sentido, considerando que o cimento é a única variável presente nos três cenários e que há variações nos parâmetros das suas declarações ambientais — como a ausência de validação por terceiros da declaração produzida no Brasil, ao contrário das outras duas declarações —, é possível que a comparação entre os resultados dos cenários seja afetada pela qualidade dos dados ambientais utilizados para o cimento.

Dessa forma, como nova perspectiva de pesquisa, pode-se considerar a possibilidade de incluir no Modelo de ACV desenvolvido técnicas que permitam avaliar a influência da qualidade dos dados ambientais de seu inventário sobre as estimativas de emissões de CO_2 eq. Isso deve transformar os resultados pontuais do atual modelo em resultados caracterizados por distribuições de probabilidade, o que, provavelmente, melhorará a representação das variações entre o uso de diferentes declarações ambientais para insumos como o cimento *Portland* nos estudos de ACV das rodovias brasileiras.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR ISO 14040, 2014). Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR ISO 14044, 2014). Gestão ambiental avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 46 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT, 2022). EDITAL RDC ELETRÔNICO N° 0484/22-00. Brasília-DF:. Disponível em: <www1.dnit.gov.br/editais/consulta/resumo.asp?NUMIDEdital=9291>. Acesso em: 20 nov. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT, 2024a). PNV/SNV: Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação. Brasília-DF. Disponível em: <www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>. Acesso em: 5 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT, 2024b). Coletânea de Normas do IPR. Brasília-DF. Disponível em: <www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas>. Acesso em: 6 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT, 2024c). SICRO - Sistema de Custos Referencias de Obras: Manuais de Custos. Brasília-DF. Disponível em: <www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 6 jan. 2024.

Diaz-Sarachaga, J. M.; Jato-Espino, D.; Castro-Fresno, D. (2017). Methodology for the development of a new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC). Environmental Science and Policy, v. 69, p. 65–72. https://10.1016/j.envsci.2016.12.010

Dulac, J. (2013). Global Land Transport Infrastructure Requirements: Estimating Road and Railway Infrastructure Capacity and Costs to 2050. 1. ed., p. 1-54. Paris: Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em 20 ago. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE, 2023). Inventário Nacional do Setor de Energia: Período de jan./julho de 2023. Rio de Janeiro. Disponível em: <www.epe.gov.br/pt. Acesso em 25 de nov. 2023.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA (EPL, 2021). Plano Nacional de Logística 2035. Brasília-DF. Disponível em: <www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/copy_of_planejamento-de-transportes/pnl-2035>. Acesso em: 10 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON, 2022): Concreto: Ciência e Tecnologia. 3. ed., v. 1, p. 217-290. São Paulo: Editora Arte Criativa, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Energia. IPCC, 2006b. v 2, cap. 3, p. 1-78. Disponível em: <www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html>. Acesso em 12 dez. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA, 2023). COP 28: Brasil nos Emirados Árabes. Disponível em:<www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima>. Acesso em 18 nov. 2023.

Santero, N. J.; Masanet, E.; Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. Resources, Conservation and Recycling. https://10.1016/j.resconrec.2011.03.010

Souza, L. P. (2017). Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação. 2017. 116 p. Dissertação (Mestrado – Departamento de Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

Vigon, B. et al. (2017). Review of LCA datasets in three emerging economies: a summary of learnings. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, n. 11, p. 1658–1665. https://10.1007/s11367-016-1198-2

Weidema, B. P. (1998). LCA Data Quality. Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 3, n. 5, p. 259–265, 1998.

WORLD BANK GROUP (WBG, 2021). Plan de acción sobre el cambio climático 2021-25. 1. ed., p. 1-61, 2021. Washington, DC. Disponível em: <www.worldbank.org>. Acesso em: 12 fev. 2024.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CIRCULARIDADE DE MATERIAIS E ENERGIA INCORPORADA - KRISTIAN AUGUSTS GATE 13 (OSLO)

Paula Couto[a]; Maria João Falcão Silva[a]; Filipa Salvado[a]

[a]LNEC, Av. Brasil 101, Portugal, (pcouto@lnec.pt, mjoaofalcao@lnec.pt, asalvado@lnec.pt,)

As consequências visíveis das alterações climáticas exigem mudanças no modo de vida da humanidade, particularmente na forma como são consumidos os recursos naturais. Estudos recentes mostram que desde o aumento da atividade económica após a revolução industrial, as sociedades passaram a consumir estes recursos de forma mais intensa, e os processos de transformação, utilizados em larga escala na indústria, geraram um desequilíbrio no clima, principalmente devido às emissões de CO_2 para a atmosfera da Terra. A contribuição do setor AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação), para a redução dos impactos negativos nas alterações climáticas, é necessária devido à sua importância na economia global e no volume de matérias-primas consumidas. De acordo com o Relatório Global sobre a Situação dos Edifícios e Construção 2022, os edifícios consomem cerca de 30% da energia produzida, com um aumento de cerca de 4% desde 2020 até à publicação do relatório em 2022. Na busca por soluções que possam viabilizar as mudanças necessárias no setor AEC, as principais alternativas para reduzir o consumo de recursos naturais são a recuperação, reutilização e reciclagem de materiais. Com a necessidade de melhorar o desempenho das construções, o setor está a recorrer a tecnologias inovadoras.

Este artigo apresenta os resultados de uma intervenção no edifício Kristian Augusts, na Gate 13, em Oslo, na Noruega, destacando as dificuldades enfrentadas e necessidades de novos processos no setor AEC em Portugal. O objetivo principal foi reduzir o consumo de materiais e energia através da recuperação, reutilização e reciclagem. A intervenção preservou a estrutura original do edifício, minimizando o uso de matérias-primas e conservando a memória histórica, além de reduzir o consumo de energia incorporada. O artigo conclui com as considerações finais sobre o trabalho realizado.

PALAVRAS-CHAVE

Sustentabilidade, Economia circular, BIM, Eficiência energética, Energia incorporada

1 INTRODUÇÃO

Entre os diversos desafios enfrentados pela humanidade, as alterações climáticas mostram a necessidade premente de ações significativas para mitigar as consequências desse fenómeno global. O crescimento da atividade económica pós-industrial tem levado as sociedades a consumirem os recursos ambientais do planeta de forma cada vez mais intensa. Os processos de transformação em larga escala, usados pela indústria, resultaram num desequilíbrio ambiental provocado pela libertação excessiva de CO_2 na atmosfera terrestre. Neste sentido, torna-se essencial implementar medidas eficazes para reduzir o impacto das alterações climáticas e promover práticas sustentáveis, visando a preservação do meio ambiente para as gerações futuras (Comissão Europeia, 2014; Comissão Europeia, 2015; Comissão Europeia, 2020).

Relativamente à necessidade de implementação deste tipo de medidas, o setor AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação) não é uma exceção. Este é um dos setores mais exigentes globalmente em termos do uso de recursos naturais. Estima-se que, em termos nacionais, este setor tenha uma participação de cerca de 10% na economia portuguesa e um consumo de cerca de 50% dos recursos naturais. Essa desproporção mostra que há muito a ser feito para alcançar resultados ecologicamente mais equilibrados e eficientes. Além disso, o total do consumo de energia e água dos edifícios representa cerca de 40% do consumo de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa na União Europeia (European Parliament, 2010). Neste contexto, são necessárias ações para atender às metas de descarbonização da economia adotadas pela União Europeia no âmbito do Pacto Ecológico Europeu. O objetivo é reduzir as emissões líquidas de gases com efeito de estufa, em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990, e tornar o continente europeu o primeiro continente neutro em carbono até 2050 (European Comission, 2019).

Figura 1 – Circularidade dos materiais na indústria da construção (adaptado Copilot designer, 2024)

Este artigo tem como objetivo de mostrar os resultados obtidos numa intervenção efetuada num edifício na Noruega, apresentar as dificuldades enfrentadas e apontar possíveis necessidades para implementação de novos processos e modelos no setor AECO em Portugal, nomeadamente na procura da redução do consumo de materiais e energia, através da recuperação, reutilização e reciclagem de produtos e sistemas. O caso de estudo corresponde ao edifício Kristian Augusts Gate 13, localizado na cidade de Oslo, cuja intervenção registou uma aplicação ambiciosa dos conceitos da circularidade no setor AECO em termos de materiais reutilizados, reciclados e recuperados, com origem em edifícios

anteriores. O projeto foi desenvolvido e planeado com a manutenção da estrutura original do edifício, evitando um maior consumo de matérias-primas, preservando a memória histórica do território e, consequentemente, reduzindo o consumo de energia incorporada destes materiais. No artigo são também apresentadas algumas considerações finais sobre o trabalho realizado.

2 ENQUADRAMENTO

2.1. RCD E ECONOMIA CIRCULAR

No Setor da Construção (SC), o fecho dos ciclos de materiais é a força motriz para a transição de uma economia linear para uma economia circular. Neste contexto, além da minimização dos materiais descartados como resíduos, a reintrodução de materiais no ciclo como matéria-prima é de extrema relevância. A nível mundial, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) representam cerca de um terço dos resíduos gerados, sendo compostos, principalmente, por recursos minerais que podem ser valorizados. O processamento de RCD é fundamental para a manutenção dos materiais no ciclo de produção por mais tempo, maximizando o seu valor e garantindo a qualidade adequada para a aplicação pretendida (Martins et. al, 2022; Martins et. al, 2023).

Segundo o Eurostat, em Portugal foram gerados cerca de 2,5 milhões de toneladas de RCD em 2018. Os RCD são compostos por diversos materiais, mas os minerais representam a maior percentagem deste fluxo. Estes minerais podem ser utilizados em obras de construção desde que cumpram os requisitos especificados para os mesmos e, desta forma, o SC contribui para a implementação dos princípios da economia circular. Em Portugal, embora a preparação de materiais a partir de RCD para reutilização ou reciclagem já ultrapasse a meta de 70 %, ditada pela Diretiva-Quadro de Resíduos 2008/98/CE, verifica-se que uma parcela significativa corresponde a misturas de minerais mais difíceis de serem reintroduzidos no mercado. Esse facto evidencia a necessidade de uma melhor gestão de resíduos para recuperar os diferentes tipos de materiais por si só, ou seja, melhorando a triagem. Prevê-se ainda que a reutilização de materiais aumente, bem como a reciclagem, permitindo uma maior incorporação de materiais provenientes de RCD nas obras de construção, nomeadamente em edifícios (Martins et. al, 2022).

Outro desafio enfrentado pela gestão de RCD é a contaminação por substâncias perigosas, as quais dificultam o processo de reciclagem e outras formas de valorização desses resíduos, bem como a sua preparação para a reutilização. Os materiais contaminados apresentam obstáculos significativos para a economia circular, já que o ciclo dos materiais não se completa. Pelo contrário, essa contaminação perpetua uma economia linear, uma vez que os RCD continuam a ser considerados resíduos e não são reintegrados de forma eficaz no sistema produtivo. A presença de substâncias perigosas nos RCD acaba por dificultar a transição para práticas mais sustentáveis e impede o fecho do ciclo de vida dos materiais, prejudicando os esforços para promover uma economia mais circular e eficiente (Martins et. al, 2023).

Os principais impactos esperados com a triagem, reciclagem e reutilização são: i) redução dos teores de substâncias perigosas nos RCD a recuperar, com a consequente redução dos impactos ambientais associados à eliminação dos RCD contaminados, e a melhoria das condições de trabalho dos operadores de gestão de resíduos, à medida que processam materiais mais seguros; ii) aumento da produção, a partir de RCD, de matérias-primas secundárias mais homogéneas ao longo do tempo, o que resultará em maior confiança e qualidade dos materiais reciclados; iii) definição das aplicações finais das matérias-primas obtidas a partir dos RCD, o que permite o reconhecimento do valor intrínseco desses materiais; e iv) disponibilização de mais informações sobre a recuperação e

reciclagem de RCD, permitindo um melhor desempenho das partes interessadas no processo de demolição e / ou reabilitação (Martins et. al, 2022; Martins et. al, 2023).

2.2. ABORDAGEM LEVEL(S)

Ao nível europeu, a existência de diferentes metodologias e critérios para avaliação da sustentabilidade dos edifícios conduziu ao desenvolvimento de um enquadramento com indicadores e métricas comuns intitulado Level(s). Este Quadro Europeu para os Edifícios Sustentáveis, de caráter voluntário, foi lançado em outubro de 2020 pela Comissão Europeia e faz parte das ações previstas no Novo Plano de Ação para a Economia Circular (Dodd et al., 2020; Migliore et al., 2020). O Level(s) foi desenvolvido visando minimizar o consumo de materiais e energia em edifícios residenciais e de escritórios, novos ou existentes, e é aplicável desde as fases iniciais do projeto até o fim da vida útil do edifício. Acresce ao referido que, o Level(s) visa ainda unir toda a cadeia de valor do setor AECO em torno de uma linguagem comum europeia e proporcionar uma visão completa de todo o ciclo de vida dos edifícios (Sinkevicius, 2020).

A abordagem Level(s) tem como principais objetivos: i) proporcionar um ponto de entrada simples à circularidade e ao pensamento do ciclo de vida; ii) identificar pontos-chave para edifícios pensados para o futuro, tornando-os mais sustentáveis e eficientes em termos de carbono; iii) apoiar as discussões iniciais entre os agentes sobre o que focar para tornar o projeto mais sustentável; iv) demonstrar como as iniciativas políticas podem alinhar-se com um enquadramento europeu que foi desenvolvido, experimentado e testado por um grande número de profissionais da construção em toda a UE; v) proporcionar flexibilidade aos utilizadores durante a implementação, adaptando-a às suas necessidades, ritmo e compreensão da abordagem; e vi) ter uma ferramenta valiosa, comum aos estados-membros e sem custos para todos aqueles empenhados em melhorar o desempenho ambiental e a utilização de recursos (Lima et. al, 2022, Lima et. al, 2023).

Para medir, reportar e partilhar o desempenho ambiental dos edifícios, o Level(s) propõe 3 níveis de aplicação: i) Nível 1 - Avaliação do desempenho comum, que é o mais simples; ii) Nível 2 - Avaliação comparativa do desempenho, que permite comparar edifícios funcionalmente equivalentes; e iii) Nível 3 - Avaliação otimizada do desempenho, que corresponde ao processo mais avançado. Para além dos níveis de aplicação, e estrutura da abordagem Level(s) está dividida em 3 (três) áreas por temas (uso de recursos e desempenho ambiental; saúde e conforto; custo, valor e risco), cada uma com o seu próprio assunto e respetivos resultados desejados. As áreas por temas dividem-se em 6 (seis) objetivos macro: 1. Emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar ao longo do ciclo de vida dos edifícios; 2. Ciclos de vida de materiais circulares e eficientes em termos de recursos; 3. Uso eficiente dos recursos hídricos; 4. Espaços saudáveis e confortáveis; 5. Adaptação e resiliência às mudanças climáticas; e 6. Custo e valor do ciclo de vida otimizado. Estes macro objetivos descrevem quais as prioridades estratégicas para a contribuição dos edifícios para os objetivos políticos da UE, em domínios como: a energia, a utilização de materiais e resíduos, a água e a qualidade do ar interior. A abordagem sugere 16 (dezasseis) indicadores de desempenho para edifícios: 1.1 Desempenho energético no estágio de utilização; 1.2 Potencial de aquecimento global do ciclo de vida; 2.1 Lista de quantidades, materiais e vida útil; 2.2 Materiais e resíduos de construção e demolição; 2.3 Projeto para adaptabilidade e renovação; 2.4 Conceção para desconstrução, reuso e reciclagem; 3.1 Consumo de água no estágio de utilização; 4.1 Qualidade do ar interno; 4.2 Tempo fora da faixa de conforto térmico; 4.3 Iluminação e conforto visual; 4.4 Acústica e proteção sonora; 5.1 Proteção da saúde e do conforto térmico dos ocupantes; 5.2 Aumento do risco de condições meteorológicas extremas; 5.3 Drenagem sustentável; 6.1 Custos do ciclo de vida; e 6.2 Criação de valor e exposição ao risco. O Level(s) utiliza indicadores básicos de sustentabilidade, que têm em consideração os custos do ciclo de vida e as

avaliações de valor, testados com e pelo SC, para medir carbono incorporado, materiais, água, saúde e conforto e ainda os impactos decorrentes das alterações climáticas (Lima et.al, 2023).

No que respeita à eficiência de recursos, o Level(s) utiliza como indicador a estimativa e a quantidade total de materiais e resíduos gerados nas atividades de construção, renovação e demolição, no caso dos resíduos discriminados pelos principais tipos de RCD, indicados no capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos e expressos em kg, depois normalizada para a área útil interior do edifício, expressa em m^2. O objetivo principal deste indicador é promover as operações de reutilização, reciclagem ou recuperação de elementos, materiais e resíduos nas atividades de construção, renovação e demolição através de um planeamento metódico das mesmas (Lima et. al., 2022).

A abordagem do Level(s) promove também, ao nível europeu, a aplicação dos métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV). Assim, o indicador relativo aos materiais e RCD (expresso em kg/m^2) incide principalmente na fase A5, para novos projetos de construção, e nas fases B4 e B5 para projetos de reabilitação. No final da vida útil, estimativas futuras para o destino dos elementos de construção e materiais afetam os resultados no módulo C, relativo à fase de fim de vida, e no módulo D, associado aos benefícios / cargas além dos limites do sistema (ISO 15686-5, 2008).

Figura 2 – Abordagem Level(s) e aplicação dos Métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e de Avaliação do Custo do Ciclo de vida (ACCV) (adaptado Copilot designer, 2024)

3 CASO DE ESTUDO

3.1. ENQUADRAMENTO

O edifício Kristian Augusts Gate 13, localizado em Oslo, na Noruega (Figura 3), é reconhecido como uma referência de inovação no setor AECO. A sua relevância reside na maneira progressista com que aborda a circularidade, adotando práticas que enfatizam a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos. Este projeto destaca-se por uma abordagem holística que integra princípios de reutilização, reciclagem e recuperação de materiais provenientes de construções anteriores, demonstrando um compromisso genuíno com a redução do impacto ambiental e a promoção da economia circular. Além disso, o projeto destaca-se, não apenas pela inovação em termos de materiais, mas também pela estética moderna e arrojada, bem como pela sua funcionalidade.

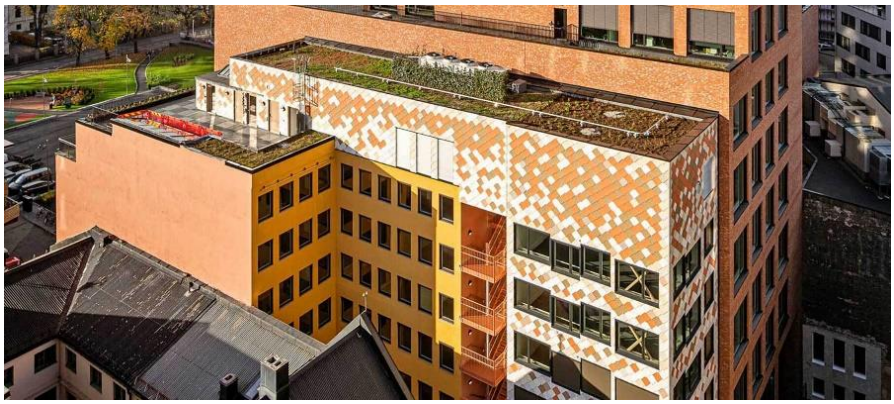


Figura 3 – Vista geral do edifício (google images, 2024)

A intervenção no edifício destaca-se por uma abordagem ambiciosa na aplicação dos princípios da economia circular. O foco na reutilização de materiais já existentes, na reciclagem de componentes e na recuperação de elementos que, de outra forma, seriam descartados, demonstra um compromisso sólido com a sustentabilidade e com a eficiência de recursos. Esta estratégia, não apenas minimizou a geração de resíduos, mas também maximizou a utilização dos recursos disponíveis, sinalizando uma mudança significativa em direção a práticas mais ecológicas e responsáveis no setor da construção. Ao adotar uma abordagem proativa e inovadora, o projeto da intervenção no edifício Kristian Augusts Gate 13, não só alcançou sucesso na implementação da economia circular, mas também serviu de inspiração para futuras intervenções, demonstrando como a arquitetura e a sustentabilidade podem andar de mãos dadas, criando espaços elegantes e *eco-friendly*.

Um dos aspetos centrais do projeto foi a decisão de manter a estrutura original do edifício. Essa escolha preserva a integridade e a história arquitetónica do edifício, mas também evita a necessidade de novos materiais de construção. Manter a estrutura existente minimiza o impacto ambiental associado à extração e processamento de novas matérias-primas, além de reduzir os custos e o tempo de construção. O edifício Kristian Augusts Gate 13 serve como modelo exemplar de práticas sustentáveis no setor AECO, demonstrando que é possível realizar intervenções significativas, que promovem o uso eficiente de recursos, sem comprometer a funcionalidade ou a estética do edifício. O projeto também sublinha a importância da conservação de recursos e da minimização de resíduos, tendências que são cada vez mais cruciais num mundo que enfrenta desafios ambientais significativos.

A abordagem de manter a estrutura original e de reutilizar materiais existentes contribui significativamente para a redução do consumo de energia incorporada. A energia incorporada refere-se à quantidade total de energia necessária para produzir os materiais de construção e para as atividades de construção de um edifício. Ao reutilizar materiais, o projeto reduz a procura por novos recursos e a energia necessária para produzi-los, transportá-los e instalá-los, alcançando 80% de reutilização e 70% de redução de carbono incorporado. Esta prática é essencial para reduzir a pegada de carbono do setor AECO e contribuir para metas globais de sustentabilidade.

3.2. MEDIDAS IMPLEMENTADAS

Além dos princípios e práticas mencionados, o projeto do Kristian Augusts Gate 13 incluiu uma série de medidas específicas para implementar a economia circular, designadamente; i) inventário de materiais; ii) parcerias e colaboração; e iii) inovação tecnológica.

Previamente à intervenção, foi realizado um inventário detalhado dos materiais presentes no edifício e da sua condição. Isso permitiu a identificação de componentes que poderiam ser recuperados e

reutilizados. Foram catalogados diversos tipos de materiais recicláveis, incluindo metais como aço e alumínio, que podem ser refundidos e empregados na fabricação de novos produtos. Também foram identificados vidros, que podem ser processados e transformados em novas peças de vidro reutilizável. Alguns dos materiais plásticos recolhidos puderam ser regranulados e servir para a produção de novos artigos plásticos. A madeira proveniente de estruturas antigas pôde ser restaurada e utilizada em projetos de carpintaria ou na fabricação de móveis. Além disso, elementos cerâmicos e tijolos recuperáveis puderam ser reutilizados na intervenção (Figura 4), bem como na construção de novas edificações, reduzindo a necessidade de fabricar esses materiais do zero. Também o mobiliário proveniente de outras construções foi utilizado na intervenção efetuada no edifício Kristian Augusts Gate 13 (Figura 5). Com atenção a cada detalhe, o inventário tornou possível um diagnóstico minucioso, promovendo uma intervenção sustentável e alinhada com as práticas da economia circular.

a)

b)

Figura 4 – Reutilização no edifício Kristian Augusts Gate 13 de elementos cerâmicos antigos de fachada de Steni: a) vista geral b) detalhe (google images, 2024)

a)

b)

Figura 5 – Reutilização no edifício Kristian Augusts Gate 13 de: a) mobiliário proveniente de outros edifícios; b) outros elementos (google images, 2024)

O projeto envolveu parcerias e colaboração entre as diversas partes interessadas, incluindo arquitetos, engenheiros, gestores de resíduos e outros especialistas, para garantir uma abordagem integral e eficiente. A integração de diferentes áreas de conhecimento e especialidade foi essencial para promover práticas sustentáveis no manuseamento de RCD, contribuindo de forma muito significativa para a economia circular. Os arquitetos e engenheiros trabalharam juntos desde a fase de planeamento para projetar soluções que facilitassem a desmontagem e reciclagem de materiais, reduzindo ao máximo o desperdício. Os gestores de resíduos desempenharam um papel fundamental na implementação de estratégias para a segregação e o correto encaminhamento dos resíduos, identificando materiais que poderiam ser reciclados ou reutilizados no projeto do Kristian Augusts Gate 13 ou em novos projetos de construção. Além disso, houve a colaboração com empresas especializadas em reciclagem de RCD, que trouxeram o seu conhecimento técnico sobre as melhores

práticas para transformar resíduos em recursos valiosos e utilizáveis. Este tipo de parcerias possibilitou o envio de resíduos como betão, tijolos e cerâmicos para instalações de reciclagem, onde foram processados para serem reutilizados como agregados para a reabilitação no próprio projeto e na construção de novas estruturas, fechando o ciclo destes materiais. Também foram envolvidas organizações locais (nacionais) e internacionais, promovendo o desenvolvimento de guias, regulamentos e iniciativas para incentivar práticas de construção sustentável. Acresce ao referido, a participação de Universidades e Centros de Investigação em projetos de investigação e desenvolvimento tecnológico empreendidos, que contribuíram com estudos e tecnologias inovadoras para melhorar a eficiência dos processos de reciclagem e reutilização. Esta rede colaborativa solidificou uma abordagem holística e sustentável, promovendo a economia circular. O resultado foi uma gestão de RCD mais eficiente, reduzindo o impacto ambiental e fomentando a reutilização de materiais, evidenciando que parcerias estratégicas são fundamentais para a transformação do setor da construção.

Foram também empregues tecnologias avançadas e inovadoras para avaliar a integridade dos materiais reutilizados e assegurar que eles atendem às exigências de segurança e desempenho. No contexto dos RCD e na promoção da economia circular, o uso de tecnologias de ponta é essencial para maximizar a eficiência e a sustentabilidade dos processos de reciclagem e reutilização de materiais. Foram usadas técnicas de levantamento e análise digital para identificar possíveis falhas ou degradação nos diversos materiais, garantindo que apenas os componentes adequados sejam reutilizados. A implementação de *software* sofisticado de gestão de resíduos também desempenhou um papel essencial, permitindo o rastreamento e a documentação de todo o ciclo de vida dos materiais, desde o momento em que são desmontados até à sua reintegração em novos projetos de construção. Este procedimento, não só melhora a eficiência logística, mas também assegura a conformidade com os regulamentos ambientais e de segurança. Para materiais específicos como o betão, foram utilizadas técnicas de reciclagem inovadoras. As técnicas de descontaminação avançadas, incluindo métodos biológicos e químicos, também foram aplicadas para tratar materiais que contêm substâncias nocivas, tornando-os seguros para reutilização. Outra inovação foi a aplicação de tecnologias de impressão 3D com materiais reciclados. Esta tecnologia permite a fabricação de componentes de construção personalizados, como blocos de construção e elementos decorativos, a partir de resíduos tratados e processados, reduzindo a necessidade de materiais virgens. Ao integrar essas inovações tecnológicas, foi possível não só garantir a segurança e a eficiência no uso de materiais reciclados, mas também promover uma economia circular robusta no projeto. A utilização destas tecnologias avançadas assegurou que os RCD fossem transformados em recursos valiosos, minimizando o impacto ambiental e promovendo práticas sustentáveis de longo prazo.

3.3. APLICABILIDADE DOS INDICADORES LEVEL(S)

Após a análise da abordagem Level(s) e o confronto com os seus objetivos, o projeto decidiu iniciar as suas classificações com base no **Macro objetivo 2 – Ciclos de vida de materiais circulares e eficientes em termos de recursos**. A decisão foi fundamentada por este macro objetivo contemplar os indicadores mais ligados à reutilização e reciclagem de materiais, isto é, ao desperdício gerado pelos processos de construção e desconstrução, com foco nas listas de quantidade de materiais importantes para as análises LCA (Life Cycle Analysis) e na adaptabilidade de desmontagem das edificações que forneceram elementos para o edifício Kristian Augusts Gate 13.

O ***Indicador 2.1 - Lista de quantidades, materiais e vida útil*** permite converter a lista de quantidades (BoQ – *Bill of Quantities*) numa lista de materiais (BoM – *Bill of Materials*), compatível com os requisitos de reporte sobre RCD, estimando e medindo a massa dos produtos e materiais de construção

necessários para completar partes definidas do edifício, agrupadas sob a estrutura / invólucro, núcleo ou aspetos externos do edifício. Para cada entrada, a massa é desagregada em diferentes frações de material. Podem ser introduzidos dados de custos opcionais, sendo os custos de cada entrada medidos. Acresce ainda que, sendo introduzidos dados opcionais de vida útil para cada entrada, as massas e custos dos materiais ao longo da vida útil do edifício podem ser medidos, assumindo uma substituição semelhante. Com base neste indicador são sugeridas algumas possíveis classificações ou propriedades e respetivas descrições, compreendendo o Nível 1 e o Nível 2, que poderão ter apoiado o gestor de projeto da intervenção no edifício Kristian Augusts Gate 13 no momento de organizar os dados a serem utilizados na folha de cálculo fornecida pelo Level(s) e em diferentes análises. Assim, para o Nível 1 do Level(s), considera-se como possível classificação ou propriedade: o local de aplicação, a constituição do material e a vida útil presumida do produto / material. Considerando o local de aplicação para um Nível 2, podemos ter como possível classificação ou propriedade: a estrutura / invólucro, o núcleo e a envolvente externa que, na generalidade, correspondem à classificação do local de aplicação do produto ou do elemento, conforme parâmetros exigidos numa ACV (LCA – *Life-Cycle Analysis*), e usando como base a classificação da folha de cálculo *BoQ Template*, fornecida na Abordagem Level(s). Admitindo a constituição do material podemos ter como possível classificação ou propriedade o seu tipo: em betão, azulejos, pedras naturais ou cerâmicos; em madeira; em vidro; em plástico; de misturas betuminosas; em metal; em gesso; de materiais misturados; e equipamentos eletrónicos e elétricos (EEE) que, na generalidade correspondem à classificação do tipo de produto ou elemento com base na sua composição, conforme parâmetros exigidos numa análise de ACV, usando como base a classificação da folha de cálculo *BoQ Template* (Lista de Quantidades do Indicador 2.1), utilizada na Abordagem Level(s). Finalmente, a vida útil presumida do produto / material compreende a informação do número de anos que o material ou produto deve durar no edificado antes de precisar de ser substituído.

O ***Indicador 2.2 - Materiais e resíduos de construção e demolição*** identifica os tipos de resíduos e materiais de construção e demolição, sendo estas classificações importantes no processo de decisão de reutilização dos produtos, bem como para a determinação do estado em que estes se encontram, permitindo identificar ações capazes de os fazer regressar ao ciclo de vida e, consequentemente, prologando a vida útil dos materiais. Estimam e medem ainda a quantidade total de resíduos gerados pelas atividades de construção, renovação e demolição (em kg) que, quando desagregada nos principais tipos de RCD, de acordo com as entradas da Lista Europeia de Resíduos, resultam num mapeamento para melhor destinação destes (por exemplo, reciclagem, aterro etc.). Com base neste indicador são sugeridas algumas possíveis classificações ou propriedades e respetivas descrições, compreendendo o Nível 1 e o Nível 2 do Level(s). Assim, para o Nível 1 do Level(s) considera-se como possível classificação ou propriedade: o tipo de resíduo, a constituição do resíduo e o destino do material residual. Considerando o tipo de resíduo para um Nível 2, podemos ter como possível classificação ou propriedade: a estrutura / invólucro, o núcleo e a envolvente externa que, na generalidade, correspondem à classificação do local de aplicação do produto ou do elemento, conforme parâmetros exigidos numa ACV e usando como base a classificação da folha de cálculo *BoQ Template*, fornecida na Abordagem Level(s). Admitindo a constituição do resíduo podemos ter como possível classificação ou propriedade: serem constituídos por betão, por tijolos, por telhas, por cerâmicos, por madeira, por vidro, por plásticos, por misturas betuminosas, por cobre / bronze / latão, por alumínio, por ferro / aço, por outros metais, por cabos, por solo e pedras, por despojo de drenagem, por lastro de pista, por materiais de isolamentos, por materiais contendo amianto, por materiais à base de gesso, por elementos de portas, por elementos de janelas, que na generalidade correspondem à classificação do tipo de resíduo a ser gerado, com base na sua composição, segundo a Lista Europeia de Resíduos (Código LER), a mesma classificação utilizada na folha de cálculo:

Estimativa de quantidades de desperdício do Indicador 2.2 da abordagem Level(s). Finalmente, no que se refere ao destino do material residual considera-se a classificação material residual para reutilização (Nível 2), indicando o destino dos materiais que possam apoiar na medição de quanto a construção ou demolição estão associadas à reciclagem, reutilização e desperdício de materiais.

O ***Indicador 2.3 - Conceção para adaptabilidade e renovação*** fornece uma avaliação semi-quantitativa da medida em que a conceção de um edifício poderia facilitar a adaptação futura à evolução das necessidades dos ocupantes e das condições do mercado. Trata-se de um indicador da capacidade de um edifício para continuar a cumprir a sua função e para prolongar a sua vida útil no futuro. São avaliados os aspetos de conceção e manutenção de particular relevância, identificados com base em estudos de mercado e experiência. Os aspetos avaliados diferem consoante se trate de um edifício de escritórios ou residencial. Tendo por base este indicador são sugeridas algumas possíveis classificações ou propriedades e respetivas descrições, compreendendo o Nível 1 e o Nível 2 do Level(s). Assim para o Nível 1 do Level(s) considera-se como parâmetros a ser classificados a distribuição dos espaços internos, as alterações nas instalações dos edifícios e as alterações na fachada e estrutura do edifício. Quanto ao Nível 2, e no que se refere à distribuição dos espaços internos, considera-se a métrica dos pilares (vãos entre pilares mais largos permitirão uma disposição mais flexível do piso), o padrão da fachada (vãos mais estreitos permitirão mais configurações de espaço interno), o sistema de parede interna (as paredes internas não portadoras de carga permitirão que sejam feitas mais facilmente alterações na disposição do pavimento) e o tamanho das unidades e acessos (ao assegurar que o acesso é possível a partir de subdivisões dos espaços, proporcionando mais opções de relocação). No que se refere às alterações nas instalações dos edifícios considera-se a facilidade de acesso às condutas de instalações MEP (o acesso é melhorado se as instalações MEP não forem incorporadas na estrutura do edifício), a facilidade de acesso às salas das instalações (as futuras mudanças de equipamento técnico são facilitadas se houver facilidade de acesso às salas e equipamentos), as condutas longitudinais para rotas de serviço (a inclusão de condutas longitudinais proporcionará flexibilidade na localização dos pontos de serviço), os tetos mais altos para rotas de serviço (a utilização de maiores alturas de teto proporciona maior flexibilidade no encaminhamento das tubagens das instalações) e as instalações para subdivisões (ao assegurar que a alteração individual das instalações sanitárias é possível para subdivisões dos espaços, isto proporciona mais opções de relocação). Finalmente, para alterações na fachada e estrutura do edifício, e considerando um Nível 2 do Level(s), admite-se como parâmetros: fachadas não portadoras de carga / não estruturais (as fachadas não portadoras de carga permitirão que as alterações sejam feitas mais facilmente, tanto nos *layouts* internos como nos elementos externos), a prova futura da capacidade de suporte de carga (a incorporação de capacidade redundante de carga suportará potenciais mudanças futuras na fachada e nos usos do edifício) e conceção estrutural para apoiar a expansão futura (os projetos estruturais que têm a força vertical para suportar andares adicionais permitirão uma futura expansão da área do pavimento).

O ***Indicador 2.4 - Conceção para desconstrução, reutilização e reciclagem*** fornece uma avaliação semi-quantitativa na medida em que a conceção de um edifício poderia facilitar a futura recuperação de materiais para reutilização de reciclagem. Fornece, portanto, um substituto para: a contribuição do edifício para a economia circular, medindo a facilidade de desmontagem para um âmbito mínimo de peças de construção, seguido da facilidade de reutilização e reciclagem para estas peças e seus subconjuntos e materiais associados. Os parâmetros que servem de base para uma classificação que determina o estado dos sistemas e produtos para a sua utilização ou ação necessária que a possibilite, a sua condição de uso e fator de facilidade de recuperação e desmontagem encontram-se descritos em seguida. Assim para um Nível 1 do Level(s), como parâmetros identificam-se a facilidade de recuperação, a facilidade de reutilização e a facilidade de reciclagem. Para o Nível 2, e no que se refere à facilidade de recuperação consideram-se que os elementos e as suas partes são independentes e

facilmente separáveis (o potencial de separar elementos que estão ligados entre si e de desmontar elementos nos seus componentes e partes constituintes), que as ligações são mecânicas e reversíveis (a utilização de ligações mecânicas, não destrutivas, em oposição à ligação química), que as ligações são facilmente acessíveis e sequencialmente reversíveis (acesso fácil e sequencial a fim de inverter as ligações mecânicas e remover elementos) e que o número e a complexidade das etapas de desmontagem são baixos (a desmontagem não deve supor a necessidade de complexas etapas preparatórias, a utilização intensiva de mão-de-obra e maquinaria e/ou processos fora do local). Relativamente à facilidade de reutilização, consideram-se a especificação de elementos e peças utilizando dimensões normalizadas (especificação de elementos e peças que são de uma especificação normalizada, a fim de fornecer um *stock* futuro consistente), a especificação de serviços de construção modular (especificação de sistemas modulares que podem reter valor aquando da desinstalação ou que podem ser mais facilmente trocados e atualizados) e se o projeto apoia a adaptação futura a mudanças nas necessidades funcionais (conceção das peças do edifício para apoiar a utilização contínua no mesmo ou numa configuração de conceção diferente no mesmo edifício). Finalmente, para a facilidade de reciclagem e considerando um Nível 2 do Level(s), admite-se como parâmetros as peças serem feitas de materiais compatíveis ou homogéneos (especificação de componentes e partes constituintes feitas de materiais homogéneos, os mesmos materiais ou materiais mutuamente compatíveis com os processos de reciclagem; acabamentos, revestimentos, adesivos ou aditivos não devem inibir a reciclagem), os materiais constituintes poderem ser facilmente separados (deve ser possível separar componentes e peças nos seus materiais constituintes) e se existem opções de reciclagem estabelecidas para as partes ou materiais constituintes (a peça ou material é facilmente reciclável em produtos com um campo de aplicação e função semelhante, maximizando assim o seu valor circular).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho explorou a aplicação dos princípios de economia circular na construção e gestão de edifícios, com foco no projeto localizado na Kristian Augusts Gate 13, em Oslo. Demonstrou-se como a redução de resíduos e a reutilização de materiais são, não apenas viáveis, mas também vantajosas. A implementação de técnicas de demolição seletiva e a reutilização de componentes estruturais e acabamentos reduziram significativamente a quantidade de resíduos. A utilização de materiais reciclados e de baixo impacto energético, aliada a soluções de eficiência energética, contribuem para a redução da pegada de carbono.

Este edifício contém tecnologias avançadas de isolamento térmico, sistemas de ventilação eficientes e fontes de energia renovável, maximizando assim o seu desempenho energético. Por outro lado, o seu projeto está pensado para permitir que o edifício seja facilmente desmontado no final de sua vida útil, facilitando novamente a reciclagem e reutilização dos seus elementos, prolongando-se assim a vida útil dos materiais. A colaboração entre os diversos intervenientes (e.g., arquitetos, engenheiros, construtores, fornecedores) revelou-se crucial para o sucesso deste projeto. A comunicação eficaz e o alinhamento de objetivos entre todas as partes garantiram que os princípios de circularidade fossem incorporados em todas as fases do projeto.

A aplicação de práticas de circularidade não só é benéfica para o meio ambiente, mas também pode ser economicamente vantajosa. A redução de custos com materiais novos, a diminuição das despesas associadas a resíduos e os benefícios económicos associados à eficiência energética destacam a viabilidade económica deste edifício.

Em resumo, o edifício Kristian Augusts Gate 13, em Oslo, é um marco de inovação e sustentabilidade no setor AECO, representando um avanço significativo na adoção de práticas de economia circular e na promoção de um futuro mais sustentável e eficiente em termos de recursos.

REFERÊNCIAS

Comissão Europeia (2014) Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Oportunidades de Eficiência de Recursos no Setor da Construção, COM(2014) 445 final.

Comissão Europeia (2015) Fechar o ciclo - Plano de Ação da UE para a Economia Circular. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, COM(2015) 614 final.

Comissão Europeia (2020) Um novo Plano de Ação para a Economia Circular. Para uma Europa mais limpa e competitiva. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. COM(2020) 98 final.

Copilot designer (2024) https://www.copilot.live/products/design-copilot

Dodd, N., Donatello, S., Cordella, M. (2020). Level(s) indicator 2.1: Bill of quantities, materials and lifespans 1–34.

European Commission, (2019). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council," 19 05 2010. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031. [Accessed 12 11 2022].

European Commission, (2019) The European Green Deal, 11 12 2019. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640. [Accessed 11 11 2022].

Google Images (2024)

Lima, R., Couto, P., Falcão Silva, M.J., Salvado, F. (2022). Sistemas de classificação de construção adaptados à sustentabilidade: Abordagem LEVEL(S) na economia circular, 4º Congresso Português de Building Information Modelling, Universidade do Minho.

Lima, R., Couto, P., Falcão Silva, M.J., Salvado, F. (2023). Certificações de sustentabilidade de edifícios e o quadro comum europeu LEVEL(S). CIRMARE 2023, Universidade da Beira Interior.

Migliore, M., Talamo, C., Paganin, G. (2020). Level(s) indicator 2.2: Construction and Demolition waste and materials. Springer Tracts Civ. Eng. 45–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30318-1_2.

Martins, I., Rezvani, S., Falcão Silva, M.J., Salvado, F. (2022). Auditorias de pré-demolição: Enquadramento concetual - RELATÓRIO 321/2022 – DM/NBPC

Martins, I., Rezvani, S., Falcão Silva, M.J., Salvado, F. (2023). Guia Português para Auditorias de Pré-demolição - RELATÓRIO 438/2023 – DM/NBPC

Sinkevicius, V. (2020) Introducing Level(s). Europeaan Commission - Energy, Climate change, Environment. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels/introducing-levels_en. Acesso em: 04 25 2024.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

GUIA PORTUGUÊS PARA AUDITORIAS DE PRÉ-DEMOLIÇÃO E SUA APLICAÇÃO NUMA INTERVENÇÃO DE REABILITAÇÃO

Isabel M. Martins[a]; Seyed Rezvani[b.] Maria João Falcão Silva[c], Filipa Salvado[c], Paula Couto[c], António Vilhena[c]

[a] LNEC, Materials Department, Av. Brasil 101, Portugal, (imartins@lnec.pt)

[b] IST, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Av. Rovisco Pais 1, Portugal, (seyedi.rezvani@tecnico.ulisboa.pt)

[c] LNEC, Buildings Department, Av. Brasil 101, Portugal, Portugal, (mjoaofalcao@lnec.pt, asalvado@lnec.pt, pcouto@lnec.pt, avilhena@lnec.pt)

RESUMO

Embora várias políticas europeias visem minimizar a produção de resíduos de construção e demolição (RCD) e incentivar a transição do setor da construção para um modelo de economia circular, existe a necessidade de implementar ações específicas para atingir estes objetivos.

Atualmente, e considerando apenas a fase final do ciclo de vida dos materiais, estas ações incluem, entre outras, a aplicação em casos reais de medidas que demonstrem as vantagens nas diferentes vertentes da sustentabilidade, bem como inovações em termos de materiais de construção, ou a disponibilização de informação de qualidade sobre fluxos de materiais.

As auditorias de pré-demolição permitem identificar os tipos e quantidades de materiais existentes, obtendo assim a constituição confiável dos fluxos de materiais, e apresentar potenciais campos de aplicação. Para a realização destas auditorias foi desenvolvido, no âmbito do projeto CLOSER, um «Guia Português para Auditorias de Pré-Demolição», bem como uma folha de cálculo com modelos tipo para a realização de um inventário dos recursos materiais presentes no edifício.

O modelo de inventário baseou-se nas diretrizes da União Europeia, no quadro europeu de avaliação da sustentabilidade de edifícios, Níveis, e nas práticas adotadas noutros Estados-Membro. Como caso de estudo, para a implementação do guia proposto, foi realizada uma auditoria de pré-demolição ao edifício do Cais Coberto da Malveira, enquadrado na empreitada de "Modernização do Troço Mira Sintra-Meleças - Torres Vedras, da Linha do Oeste".

São também apresentadas as principais conclusões sobre o estudo desenvolvido, nomeadamente benefícios ambientais e económicos.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, Guia, Auditorias de pré-demolição, Economia circular

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de recursos e a implementação de políticas visando atingir uma estabilidade ecológica e económica foi destacado em *Os Limites do Crescimento* (Meadows *et al.*, 1972). Mais de 50 anos depois, o aumento do consumo e o esgotamento de recursos exigem atuar de forma eficiente visando minimizar o consumo de matérias-primas naturais. Este aspeto é da maior relevância para o sector da construção, que representa 40% do consumo de todos os materiais utilizados nas zonas urbanas e um terço do total de resíduos produzidos (Olubukola *et al.*, 2022).

No setor da construção, têm sido propostas diferentes estratégias, ao longo de todo o ciclo de vida dos materiais, com o objetivo de diminuir os elevados impactos ambientais e para impulsionar a transição para um ambiente construído com baixo teor de carbono. Exemplos dessas estratégias incluem a escolha de materiais na fase de projeto, a pré-fabricação e a modularidade na fase de construção e a desconstrução e valorização dos resíduos de construção e demolição (RCD) no fim de vida.

Os resíduos de construção e demolição foram identificados como um fluxo prioritário. Uma gestão adequada dos materiais associados às atividades de construção e demolição requer a promoção da reutilização de materiais e elementos de construção, antes da sua classificação como resíduos, bem como a melhoria do seu processo de reciclagem. Neste contexto, a implementação de auditorias de pré-demolição (APD), como ação prévia e complementar à desconstrução, em intervenções de demolição total e de reabilitação de edifícios, é uma ação conducente à obtenção de materiais de maior qualidade passíveis de serem reintroduzidos no ciclo de vida dos materiais de construção, evitando a sua desvalorização e contribuindo para a diminuição do carbono incorporado (Wahlström *et al.*, 2020).

O Guia Português de Auditorias de Pré-Demolição, que agora se apresenta, estabelece requisitos e fornece recomendações às diversas partes envolvidas sobre o planeamento e os procedimentos a adotar antes da demolição ou da reabilitação de edifícios, de modo a minimizar o risco de contaminação dos materiais e elementos existentes e dos RCD gerados. Este documento define métodos para a quantificação daqueles materiais e elementos reutilizáveis e dos RCD produzidos, assim como indica possíveis destinos para a sua futura utilização.

Este guia fornece informação sobre o conceito geral e aspetos específicos da APD e tem como base as melhores práticas utilizadas atualmente na UE. O documento encontra-se alinhado com os princípios de gestão de RCD, nomeadamente o protocolo de gestão de RCD da UE (Comissão Europeia, 2016) e as orientações para auditorias aos resíduos provenientes da demolição e renovação de edifícios (Comissão Europeia, 2018), bem como com outras estratégias europeias relativas à eficiência de recursos na construção (Comissão Europeia, 2014) ou os Planos de Ação Europeu para a Economia Circular (Comissão Europeia, 2020, 2015).

A implementação deste guia ao nível nacional assegura que os RCD gerados durante a demolição e a reabilitação de edifícios cumprem as disposições relativas a este tipo de resíduos estabelecidas no novo Regime Geral de Gestão de Resíduos (nRGGR), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro, e que são maximizadas as taxas de reutilização de materiais e elementos presentes nos edifícios assim como a reciclagem de RCD.

De salientar que, ao nível municipal, podem ser estabelecidos requisitos adicionais aplicáveis às demolições e reabilitações de edifícios, dentro da sua jurisdição, que podem ser complementares e mais exigentes que os estabelecidos neste guia. A conformidade com as disposições descritas neste guia não significa necessariamente o cumprimento de todas as obrigações legais a que as partes interessadas estão sujeitas relativamente à demolição e reabilitação de edifícios.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÂO E DEMOLIÇÃO

No setor da construção existem elevados fluxos de entrada e de saída de recursos materiais. No caso dos edifícios, estes fluxos vão variando ao longo de todo o ciclo de vida (*e.g.*, fase de construção propriamente dita, nas intervenções de manutenção ou de reabilitação) para manter a funcionalidade do edifício durante o seu uso e na fase de demolição. Em todas estas fases são gerados resíduos de construção e de demolição.

Segundo o Artigo 3.º do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, RCD são resíduos provenientes de atividades de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações.

Os resíduos de construção e demolição são categorizados no capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (LER) em subcapítulos, identificados por um código de 4 dígitos, que abrangem resíduos de diferente constituição, identificados por um código de 6 dígitos. A lista completa de códigos dos subcapítulos de RCD de acordo com a LER é: i) 17 01 betão, tijolos, telhas e outros materiais cerâmicos; ii) 17 02 madeira, vidro e plástico; iii) 17 03 misturas betuminosas, alcatrão de carvão e produtos alcatroados; iv) 17 04 metais (incluindo ligas); v) 17 06 materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto; vi) 17 08 material de construção à base de gesso; vii) 17 09 outros resíduos de construção e demolição.

Alguns RCD são classificados como resíduos perigosos por terem na sua constituição substâncias perigosas ou por estarem contaminados por substâncias perigosas em teores superiores aos limites legais. Nestes casos, são necessárias precauções específicas no manuseamento desses resíduos para evitar que afetem o ambiente e a saúde pública. Num processo de demolição parcial ou total de edifícios é essencial identificar previamente as substâncias perigosas, ou os materiais/elementos contendo substâncias perigosas, e encaminhá-las para os circuitos próprios. De referir que a contaminação pode impossibilitar as operações de reutilização e de reciclagem. O International Living Future Institute elaborou uma lista, designada por *Red List*, abrangendo os seguintes grupos de compostos químicos passíveis de serem responsáveis pela perigosidade de materiais de construção e, consequentemente, dos resíduos de construção e demolição correspondentes (International Living Future Institute, 2020): i) Alquilfenóis e compostos relacionados; ii) antimicrobianos; iii) amianto e compostos relacionados; iv) bisfenol A (BPA) e análogos estruturais; v) polímeros clorados; vi) clorobenzenos; vii) clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC); viii) formaldeído; ix) retardadores de chama monoméricos, poliméricos e organofosforados halogenados (HFRs); x) compostos organoestânicos (COEs); xi) substâncias alquílicas perfluoradas e polifluoradas (PFAS) / compostos perfluorinados (PFCs); xii) ftalatos (e ortoftalatos); xiii) policlorobifenilos (PCB); xiv) hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP); xv) parafinas cloradas de cadeia curta e média; xvi) metais pesados tóxicos; xvii) compostos orgânicos voláteis (COV) (produtos aplicados por via húmida); xviii) tratamentos de madeira contendo creosoto ou pentaclorofenol.

Em termos da LER, os resíduos classificados como resíduos perigosos são identificados com o símbolo asterisco (*). Esses resíduos podem apresentar uma ou mais características de perigosidade, conforme o indicado no Regulamento (UE) n.º 1357/2014: i) HP 1 Explosivo; ii) HP 2 Comburente; iii) HP 3 Inflamável; iv) HP 4 Irritante -irritação cutânea e lesões oculares; v) HP 5 Tóxico para órgãos-alvo específicos (STOT) / tóxico por aspiração; vi) HP 6 Toxicidade aguda; vii) HP 7 Cancerígeno; viii) HP 8 Corrosivo; ix) HP 9 Infecioso; x) HP 10 Tóxico para a reprodução; xi) HP 11 Mutagénico; xii) HP 12 Libertação de um gás com toxicidade aguda; xiii) HP 13 Sensibilizante; xiv) HP 14 Ecotóxico; xv) HP 15 Resíduo suscetível de apresentar uma das características de perigosidade acima enumeradas não diretamente exibida pelo resíduo original.

Na LER, os resíduos são ainda distribuídos por tipologias designadas como entradas absolutas ou como entradas espelho. No primeiro caso, enquadram-se entradas absolutas de resíduos perigosos que correspondem a resíduos que são sempre classificados como perigosos e as entradas absolutas de resíduos não perigosos que correspondem a resíduos que são sempre classificados como não perigosos. No caso das

entradas espelho é necessário realizar ensaios sobre os resíduos que permitam confirmar ou não a perigosidade, sendo depois considerada entrada espelho de resíduo perigoso ou entrada espelho de resíduo não perigoso. No caso concreto dos RCD há duas entradas absolutas de resíduos perigosos: RCD com alcatrão e RCD com amianto. Informação mais completa sobre este assunto é disponibilizada no guia de classificação de resíduos da Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA, 2020).

O Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, foi uma iniciativa nacional que estabelecia o regime das operações de gestão de RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação. Esse diploma foi revogado a 1 de julho de 2021, com a entrada em vigor do novo Regime Geral da Gestão de Resíduos (Decreto-Lei n.º 102-D/2020).

As alterações ao regime de gestão de RCD introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020 podem ser consultadas no relatório "Auditorias de Pré-Demolição: Enquadramento Concetual" (Martins *et al.,* 2022) elaborado no âmbito do projeto CLOSER. A aplicação da legislação referida deve ser articulada com a legislação relativa à construção, nomeadamente com o Código dos Contratos Públicos (CCP) e com o Regime Jurídico da Urbanização e Edificação (RJUE). De referir que desde a sua publicação, o nRGGR tem sido alvo de diversas alterações, sendo uma das mais recentes e importantes a necessidade de realização de auditorias de pré-demolição, promovidas pelos produtores de RCD, no caso de demolição ou renovação de edifícios ou infraestruturas de obras públicas, estabelecida no n.º 10 do artigo 49º do Decreto-Lei n.º 24/2024, de 26 de março.

No que respeita a materiais contendo amianto, a Portaria n.º 40/2014, de 17 de fevereiro, estabelece as normas para a sua correta remoção e para o acondicionamento, transporte e gestão dos respetivos resíduos de construção e demolição, enquadráveis nos códigos da LER 17 06 01* e 17 06 05* , tendo em vista a proteção do ambiente e da saúde humana. A operação de gestão de RCD com amianto é efetuada por operadores de gestão de resíduos devidamente licenciados em estabelecimento / locais para o respetivo tratamento, podendo ser consultada no Sistema de Informação do Licenciamento de Operações de Gestão de Resíduos (SILOGR) ,ou no site da Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA), a lista destas entidades. De referir que em Portugal não se encontram licenciadas operações para valorização de RCD com amianto.

3 AUDITORIAS DE PRÉ-DEMOLIÇÃO

3.1 ENQUADRAMENTO

A demolição tradicional de edifícios e de outras infraestruturas construídas resulta na produção de RCD com misturas de materiais que apresentam reduzida qualidade e baixo valor económico, não existindo uma preocupação com a utilização futura dos materiais; a eliminação por deposição em aterro ou a deposição ilegal são destinos muito prováveis. Em Portugal, os dados estatísticos relativos a RCD confirmam que continua a existir a prática de misturar diferentes materiais prejudicando a sua recuperação. Por outro lado, as práticas de reutilização, quase inexistentes, não previnem a produção de RCD.

Numa perspetiva de sustentabilidade na construção e de minimização do desperdício de materiais é necessário antecipar, antes da demolição, as melhores oportunidades para a reutilização de materiais e elementos de construção e a reciclagem de RCD, visando reduzir o recurso a materiais ou elementos de construção novos nas intervenções de reabilitação ou de construção nova de edifícios. Assim, é essencial que seja efetuada previamente uma cuidadosa identificação dos recursos materiais presentes nos edifícios visando a sua correta triagem e que sejam apresentadas recomendações para o seu destino. Esta gestão dos materiais existentes é assegurada pela realização de uma APD a todos os recursos que, posteriormente, se concretiza com a desconstrução ou demolição seletiva do edifício.

A APD tem como principal objetivo aumentar a taxa de recuperação de materiais e de RCD, ou seja, melhorar a eficiência de recursos, sendo uma ação prevista para o cumprimento dos objetivos de identificação de resíduos, separação na fonte e recolha e gestão da qualidade do Protocolo de Gestão de RCD da UE, mas a sua implementação tem reflexos também na melhoria da logística, nomeadamente na rastreabilidade, e no processamento.

Para isso, no âmbito da APD é realizada uma avaliação dos fluxos de materiais, elementos de construção e resíduos de construção e demolição associados à atividade de demolição ou reabilitação de edifícios, sendo identificados os diversos recursos, as respetivas quantidades e potenciais aplicações com base na sua condição, facilitando a sua reintrodução na economia.

O resultado da APD concretiza-se pela implementação de uma metodologia de desconstrução com separação na fonte dos diferentes fluxos e sua recolha, bem como o seu encaminhamento com base nos destinos recomendados. Acresce que os resultados da APD permitem também avaliar com precisão após a demolição as diferenças relativamente aos quantitativos reais resultantes da inspeção das operações de demolição e de reabilitação do edifício.

A APD fornece ao dono de obra, assim, um aconselhamento independente sobre materiais e elementos de construção que podem vir a ser reutilizados ou reciclados, previamente à demolição ou reabilitação.

3.2 GUIA PORTUGUÊS

O Guia Português para Auditorias de Pré-Demolição foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), juntamente com a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. e o Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I.P., no âmbito do projeto CLOSER, financiado pelo *EEA Grants*. Este Guia visa a melhoria da gestão dos recursos materiais na demolição parcial ou total de edifícios, dando uma ênfase especial à reutilização de materiais e elementos de construção, visto que esta permite minimizar a quantidade de RCD produzidos.

O procedimento para a execução das auditorias de pré-demolição ou reabilitação de edifícios assenta em duas fases de recolha de informação: i) estudo documental; ii) estudo *in situ*. O estudo documental baseia-se na memória descritiva do projeto original do edifício e nos documentos de alterações e manutenção, visando planear detalhadamente a visita ao local. Em caso de ausência daqueles documentos, é essencial conhecer a época de construção do edifício, de modo a inferir materiais e técnicas construtivas. Para edifícios industriais, o planeamento deve incluir informações sobre as atividades realizadas para identificar possíveis contaminações. O estudo *in situ* confirma a informação documental e esclarece dúvidas sobre os materiais aplicados, avaliando quantidades, tipologias, condição e perigosidade, podendo incluir a realização de ensaios. A abordagem sistemática facilita a recolha e revisão de dados, com mapeamento dos materiais da cobertura às fundações ou do exterior para o interior. Para o efeito, podem ser realizados pequenos ensaios destrutivos e não-destrutivos para inspecionar os elementos construtivos, identificar materiais sem, no entanto, danificar a estrutura.

Após a visita ao local, é apresentado um relatório da APD contendo o inventário resultante de uma análise objetiva e precisa dos materiais, elementos e resíduos existentes, com indicação das quantidades, da classificação dos resíduos com base na LER, da localização e condição, entre outros. Também a acessibilidade *in situ* deve ser registada e nas áreas do edifício de acesso limitado por obstáculos ou que são inseguras não será realizado o diagnóstico por parte do auditor devendo o dono de obra ser alertado para tomar providências que facilitem o acesso a essas áreas.

No relatório da APD consta ainda a indicação dos destinos aconselháveis para os RCD, com base nas características observadas e tendo em consideração a respetiva hierarquia. A hierarquia de resíduos dá

prioridade à prevenção da produção de RCD através da reutilização de produtos existentes em detrimento de outras operações de gestão de resíduos. No exercício das suas atividades de gestão de recursos, as autoridades públicas têm a obrigação de respeitar esta hierarquia, a qual deve ser estendida a entidades privadas, mesmo que com carácter voluntário.

Na Figura 1, apresenta-se a ordem de prioridades e a quem cabe a responsabilidade pelas decisões no que respeita à gestão dos elementos construtivos, dos resíduos recicláveis e dos restantes resíduos prevista nas diretrizes da APD para inventário dos resíduos e materiais provenientes de obras de renovação e demolição de edifícios (Comissão Europeia, 2018).

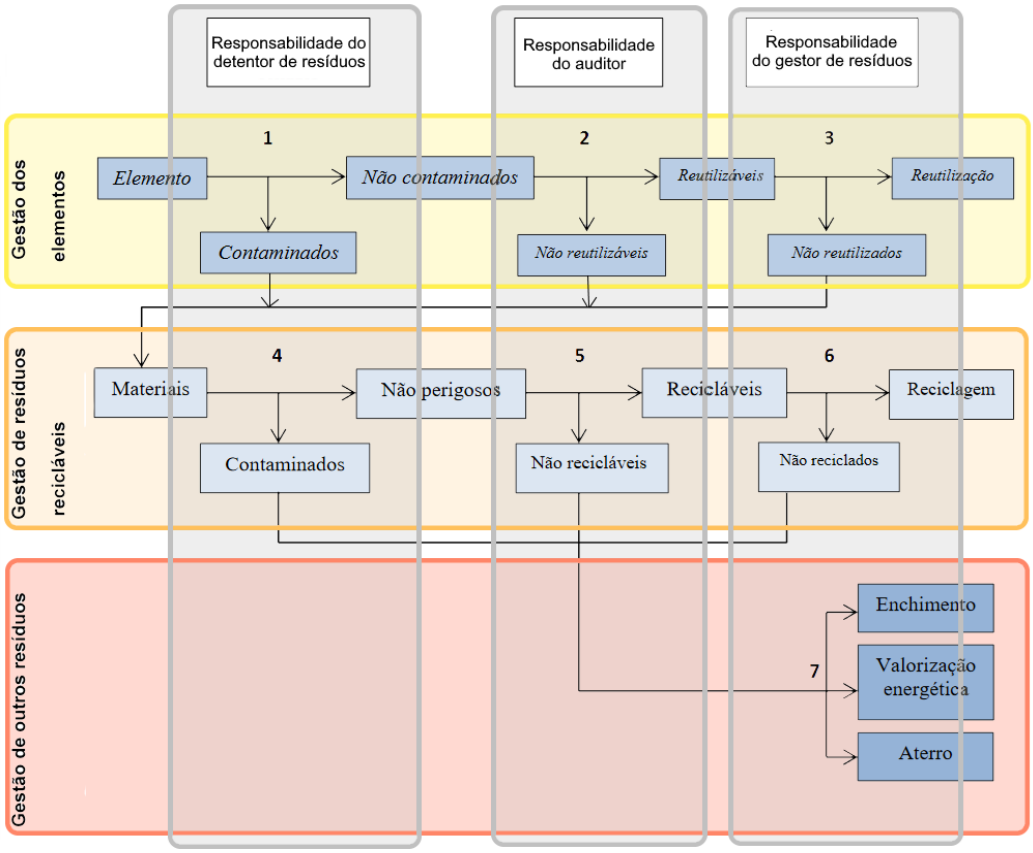


Figura 1 – Adaptação do processo de decisão na elaboração do inventário e das recomendações sobre gestão (Comissão Europeia, 2018)

No desenvolvimento deste Guia Português para Auditorias de Pré-Demolição foram elaborados modelos[1], em folha de cálculo, cujo objetivo é a inserção dos dados da auditoria: dados gerais do projeto de demolição ou reabilitação do edifício, dados do inventário com inclusão dos destinos recomendados e uma síntese da auditoria. Neste contexto, foram considerados os modelos definidos nas orientações para auditorias aos resíduos provenientes da demolição e renovação de edifícios da UE (Comissão Europeia, 2018) e os modelos para os indicadores e métricas relativos à eficiência de recursos e aos ciclos de vida circulares dos materiais do Quadro Europeu para os Edifícios Sustentáveis Level(s) no Nível 2 (Dodd *et al.,* 2020; Migliore *et al.,* 2020). Os modelos incluem a página de rosto com o índice geral, as instruções sobre a sua utilização, os detalhes do projeto, a síntese dos resultados da APD, o inventário de recursos (materiais, elementos e RCD), o cálculo das

[1] Os modelos são disponibilizados em http://closer.lnec.pt/guide.html

quantidades e a lista de RCD e de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) relevantes para operações de demolição de edifícios.

4 CASO DE ESTUDO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com este caso de estudo pretendeu-se verificar a exequibilidade e a adequabilidade dos modelos de auditorias de pré-demolição e / ou renovação de edifícios definidos e melhorar os modelos de recolha de informação. Seguindo o método definido, numa primeira fase foi realizado o estudo documental do edifício, visando obter o histórico da construção em análise, nomeadamente os materiais de construção utilizados, os sistemas construtivos implementados e as alterações e operações de manutenção que sofreram ao longo do seu ciclo de vida.

Na segunda fase realizou-se o inventário, tendo sido identificados os materiais e elementos de construção passíveis de reutilização e os RCD produzidos necessitando de ser valorizados. Posteriormente, foram apresentados possíveis destinos para os diferentes recursos.

Durante e após a realização da auditoria de pré-demolição houve contactos frequentes com o Dono de Obra e com a equipa de fiscalização presente na obra, que permitiram analisar as opções de recuperação dos recursos existentes.

4.2 DESCRIÇÃO

O caso de estudo envolve a demolição de um antigo edifício do cais coberto de uma estação ferroviária (Cais Coberto da Malveira) ao nível do solo e a construção de um novo edifício de comunicações nesse local. A área total do edifício a demolir era de 260 m^2 e a nova área de construção foi de 180 m^2.

O edifício, utilizado principalmente para armazenamento de diversos materiais, apresentava paredes resistentes de alvenaria de pedra, até uma altura de cerca de 4 m do solo, sobre as quais assentava uma estrutura de madeira que complementava a altura das paredes e formava a estrutura da cobertura. As fundações eram superficiais executadas em alvenaria de pedra. Na zona da alvenaria de pedra, as paredes eram revestidas com argamassa e acabadas com um revestimento por pintura enquanto que, nas zonas superiores orientadas a nascente e a poente, o revestimento até à cobertura era realizado com chapas de fibrocimento (as zonas mais elevadas, acima das paredes de alvenaria orientadas a norte e a sul, encontravam-se abertas). A cobertura apresentava uma estrutura de madeira tradicional (asnas, madres, varas e ripas), com um revestimento de telha cerâmica. No interior, o edifício não apresentava elementos de compartimentação, apresentando um espaço livre contínuo, sendo o pavimento constituído por uma betonilha de ligante cimentício. Relativamente às infraestruturas (*e.g.*, instalações de drenagem de águas residuais, de abastecimento de água, de eletricidade e de telecomunicações) o edifício apresentava apenas instalação de eletricidade, servida por uma rede privada.

4.3 APLICAÇÃO DO GUIA

As APD devem ser efetuadas antes do projeto de demolição ou de reabilitação. Este aspeto permite ao Dono de Obra colocar como requisitos, na contratação do projeto, os materiais ou elementos de construção que podem ser incorporados na nova obra, fundamentado na informação que consta do relatório da auditoria. No presente caso estudo o projeto de intervenção já se encontrava elaborado, não prevendo, inicialmente, potenciar a valorização de resíduos a retirar.

No que respeita à presença de substâncias perigosas, ou de materiais contendo substâncias perigosas, já tinha sido identificada a presença das referidas chapas de fibrocimento nas fachadas do edifício orientadas a nascente e a poente, fixas a uma estrutura de suporte em madeira (Figura 2). Estes elementos com amianto na sua constituição, necessitaram de ser removidos por empresa especializada, com os cuidados de manuseamento indicados para este tipo de materiais e encaminhados a destino final licenciado, seguindo a legislação específica existente. Foi ainda avaliada a possível contaminação das vigas de madeira que apoiavam as chapas de fibrocimento, por microscopia eletrónica de varrimento (MEV), não se tendo detetada a presença de fibras de amianto.

Figura 2 - Remoção de chapas de fibrocimento

Os materiais / elementos construtivos disponíveis no edifício em estudo para serem recuperados foram: i) estruturas de madeira; ii) paredes de alvenaria; iii) pilares e vigas de betão; iv) elementos de aço; v) componentes elétricos; vi) telhas; vii) caixas de madeira contendo amostras.

Entre os materiais disponíveis, alguns encontravam-se em bom estado de conservação, sendo possível a sua reutilização e reciclagem, na obra ou fora da obra. Houve casos em que se pôde propor a sua utilização em projetos similares, nomeadamente a asna de madeira. No acompanhamento deste caso de estudo foi também elaborada uma representação gráfica simplificada do processo de desconstrução (Figura 3).

O dono de obra disponibilizou os dados reais após a desconstrução que permitiram a avaliação dos impactos ambientais e económicos da recuperação dos recursos materiais.

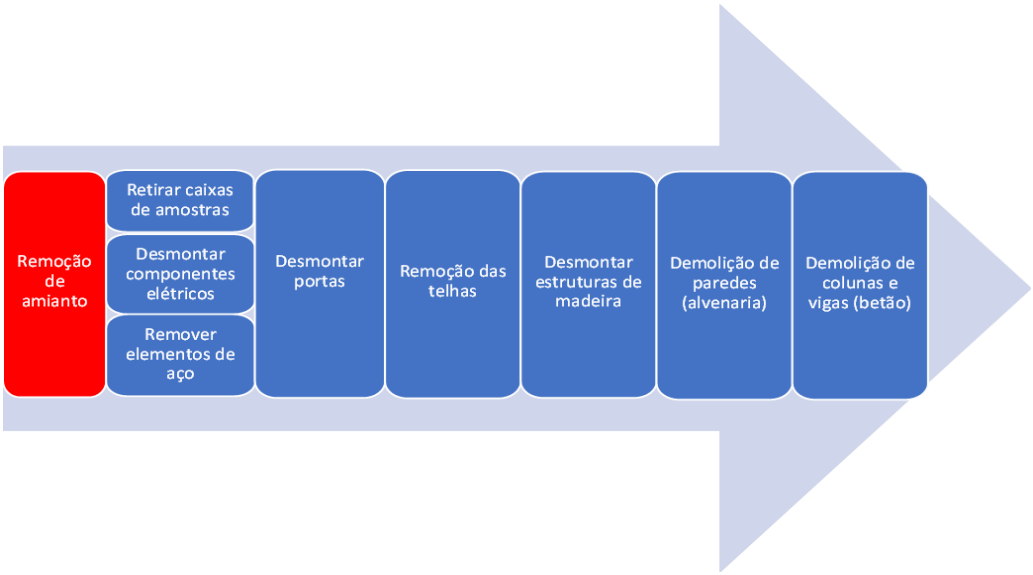


Figura 3 – Etapas da desconstrução no Caso de Estudo

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 4, apresenta-se parte do inventário de materiais, elementos construtivos e RCD. A Figura 5 contém a síntese da auditoria ao Caso de Estudo. Os resultados apontam para uma taxa de reciclagem de 45,9%, uma taxa de reutilização de materiais de 52,5% e de elementos de 0,4% e, por fim, uma taxa de eliminação de 1,4% (a qual inclui o fibrocimento removido apesar do mesmo não constar do inventário apresentado). De salientar que na situação mais favorável a taxa de reutilização é bastante elevada em especial quando comparada com o facto de o Plano de Prevenção e Gestão de Resíduos de Construção e de Demolição (PPGRCD) associado a esta obra não ter previsto a reutilização.

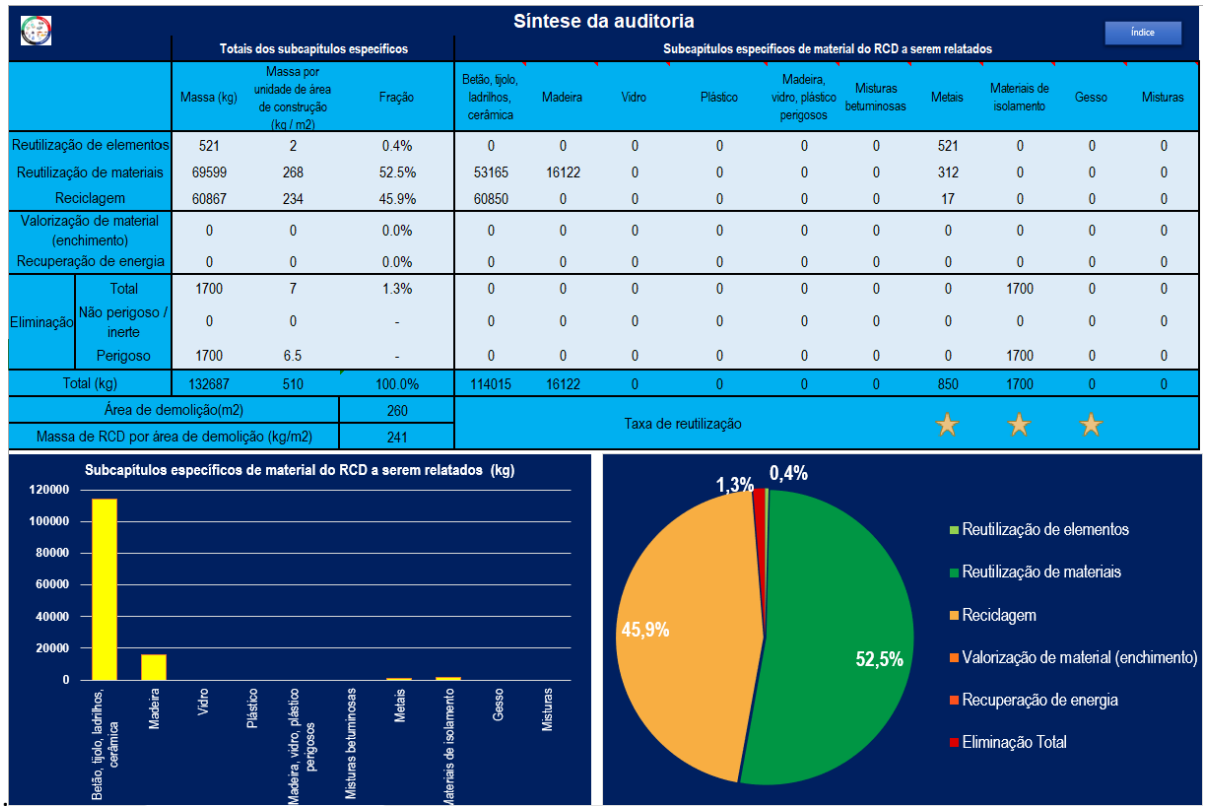
Inventário

Índice

Inventário de Materiais/Elementos e Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Material / Elemento	Código LER	Natureza do resíduos	Quantidade	Unidade	Fator de conversão	Quantidade estimada (kg)	Condição	Andar	Localização	Destino recomendado (auditor)	Precauções a tomar	Informações adicionais	Fotografia
betão	17 01 01	Inerte/Não perigoso	7.32	m3	2300	16837.0	Média - Anomalias que podem prejudicar a reutilização	0	Eixo Colunas e vigas	Reciclagem fora da obra	Demolição integral, na sequência estabelecida. Acondicionar em contentores de caixa aberta. Não misturar com outros materiais.	Processar para obter agregados reciclados de betão a utilizar no fabrico de betão ou em pavimentos de acessos à obra. A utilização de materiais provenientes de RCD em obra obedecem às Regras gerais aprovadas e às Especificações LNEC para as aplicações mencionadas.	
madeira	17 02 01	Inerte/Não perigoso	1.58	m3	600	948.0	Média - Anomalias que podem prejudicar a reutilização	0	Lado leste e oeste, acima da parede de alvenaria, estrutura de madeira com revestimento de chapas de fibrocimento.	Preparação do material para reutilização fora da obra	O material deve ser retirado com cuidado adequado para garantir a sua preservação física e ser acondicionado em pilhas.	Ensaio negativo	
ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	17 01 03	Inerte/Não perigoso	354.43	m2	150	53164.8	Boa - Anomalias estéticas; Média - Anomalias que podem prejudicar a reutilização	0	Telhas cerâmicas na cobertura	Preparação do material para reutilização na obra	O material deve ser retirado com cuidado para garantir a sua preservação física. Telhas que estiverem parcialmente danificadas devem ser recolhidas e armazenadas separadamente, visando a sua reciclagem. Telhas que conservem as características físicas integrais devem ser limpas, empilhadas e embaladas para possibilitar o seu transporte.	A maioria das telhas não se encontra quebrada e apresenta bom estado de conservação, exceto algumas, situadas no canto da parte leste. A qualidade das mesmas no que se refere a possibilidade de reutilização é elevada.	

Figura 4 – Inventário de recursos



Síntese da auditoria

Índice

		Totais dos subcapítulos específicos			Subcapítulos específicos de material do RCD a serem relatados									
		Massa (kg)	Massa por unidade de área de construção (kg / m2)	Fração	Betão, tijolo, ladrilhos, cerâmica	Madeira	Vidro	Plástico	Madeira, vidro, plástico perigosos	Misturas betuminosas	Metais	Materiais de isolamento	Gesso	Misturas
Reutilização de elementos		521	2	0.4%	0	0	0	0	0	0	521	0	0	0
Reutilização de materiais		69599	268	52.5%	53165	16122	0	0	0	0	312	0	0	0
Reciclagem		60867	234	45.9%	60850	0	0	0	0	0	17	0	0	0
Valorização de material (enchimento)		0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recuperação de energia		0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eliminação	Total	1700	7	1.3%	0	0	0	0	0	0	0	1700	0	0
	Não perigoso / inerte	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Perigoso	1700	6.5	-	0	0	0	0	0	0	0	1700	0	0
Total (kg)		132687	510	100.0%	114015	16122	0	0	0	0	850	1700	0	0
Área de demolição(m2)				260	Taxa de reutilização						★	★	★	
Massa de RCD por área de demolição (kg/m2)				241										

Figura 5 – Síntese dos resultados da APD

Com base nos dados finais sobre os RCD recuperados e os materiais/elementos reutilizados foram estimados os impactes económicos e ambientais utilizando uma ferramenta desenvolvida para o efeito no âmbito do projeto «Edifícios Circulares», financiado pelos *EEA Grants*. Para o efeito, foram consideradas duas situações: i) uma em que não houve reutilização; e ii) outra em que houve reutilização de recursos. Tendo em conta que as opções da ferramenta utilizada apenas abrangem um conjunto restrito de elementos construtivos, não foram pesquisados os impactos da totalidade dos materiais/elementos removidos durante a desconstrução. Decidiu-se, por isso, estimar a diferença entre os impactos dos materiais reutilizados e os impactos se esses materiais fossem reciclados (Quadro 1).

Quadro 1 – Impactos determinados

Elemento de construção	Impactos ambientais (kg CO_2 eq)		Impactos económicos (€)	
	Reutilização	Reciclagem	Reutilização	Reciclagem
Vigas teto (madeira)	-92,707	-58,621	-236916	897
Telha portuguesa	-67,299	-83,538	-33246	5867
Porta aço-carbono	-146,780	-222,073	-201836	13037
TOTAL	-306,786	-364,233	-471998	19800

Como se observa no Quadro 1, em termos de impactos ambientais a opção reciclagem é, aparentemente, na totalidade melhor por conduzir a uma maior redução de emissões de CO_2. Já numa perspetiva de impactos económicos são francamente mais positivos no caso da reutilização. Nesta

apreciação não se apresentam ganhos ou perdas em percentagem devido às limitações e aos pressupostos associados ao cálculo efetuado. Neste exercício de avaliação de impactos podem apresentar-se as condicionantes associadas: (i) a reutilização só ocorrer parcialmente no local; (ii) os impactos de todos os materiais/elementos não serem avaliados; (iii) nem todos os recursos serem analisados numa perspetiva de análise do ciclo de vida; (iv) a base de dados da ferramenta utilizada ser limitada, pelo que os resultados não podem ser avaliados como valores absolutos; e (v) o caso de estudo não ser um edifício típico.

Além disso, parte-se do pressuposto de que os impactos ambientais da reutilização correspondem a emissões de produção evitadas relativamente à utilização de um produto novo e que, no caso da reciclagem, as emissões são determinadas com base na diferença entre os impactos relativos à produção de matérias-primas primárias em relação à produção com materiais reciclados.

5 CONCLUSÕES

Como referido, o objetivo geral das auditorias de pré-demolição é a promoção da eficiência de recursos o qual abrange objetivos mais específicos como os que se listam a seguir: i) minimização da contaminação dos diferentes materiais e consequente redução de impactos no ambiente e na saúde pública; ii) melhoria das condições de segurança dos trabalhadores; iii) indicação dos destinos aconselháveis para os materiais, com base em requisitos técnicos e legais; iv) disponibilização a todas as partes interessadas de informação sobre identificação, quantificação e localização dos resíduos perigosos, dos materiais e elementos reutilizáveis e dos resíduos recicláveis; v) promoção da desconstrução, com a separação e recolha na fonte dos materiais para melhorar a logística e o processamento de RCD; vi) aumento da qualidade dos RCD produzidos; vii) melhor comparabilidade entre os fluxos previstos e os fluxos reais de materiais, elementos e RCD.

Na sequência da elaboração do Guia Português para Auditorias de Pré-Demolição, foi realizada uma APD ao projeto do Cais Coberto da Malveira que envolveu o estudo documental complementado por visitas e reuniões no local para efetuar o inventário, acompanhar a remoção dos elementos com amianto na sua constituição e discutir as estratégias de recuperação dos materiais, dos elementos construtivos e dos RCD.

Foram estabelecidos novos destinos para os materiais inventariados e estimados os benefícios ambientais e económicos com base na reutilização *versus* reciclagem. Apesar da abordagem utilizada apresentar diversas limitações, verificaram-se benefícios económicos apreciáveis com a reutilização e uma reduzida diminuição dos impactos ambientais, em termos de emissões de CO_2. No que respeita à presença de materiais perigosos, não se registaram melhorias porque o dono de obra já tinha feito um levantamento dos produtos considerados perigosos, nomeadamente daqueles que continham amianto, a remover antes de ser efetuado o inventário.

AGRADECIMENTO

Os parceiros do Projeto CLOSER agradecem à Infraestruturas de Portugal toda a colaboração prestada no âmbito do Caso de Estudo do Cais Coberto da Malveira.

REFERÊNCIAS

APA (2020). Guia de Classificação de Resíduos. https://apambiente.pt/sites/default/files/2021-06/Guia%20de%20Classifica%C3%A7%C3%A3o_vers%C3%A3o%202.0_20200107.pdf

Comissão Europeia (2014) Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Oportunidades de Eficiência de Recursos no Setor da Construção, COM(2014) 445 final.

Comissão Europeia (2015) Fechar o ciclo - Plano de Ação da UE para a Economia Circular. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, COM(2015) 614 final.

Comissão Europeia (2016). Protocolo de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição da UE.

Comissão Europeia (2018). Orientações para auditorias aos resíduos antes de obras de demolição e renovação de edifícios.

Comissão Europeia (2020) Um novo Plano de Ação para a Economia Circular. Para uma Europa mais limpa e competitiva. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. COM(2020) 98 final.

Decreto-Lei 102-D/2020, 2020de 10 de dezembro. Diário da República n.º 239/2020, 1.ºo Suplemento, Série I, de 2020-12-10.

Decreto-Lei n.º 24/2024, de 26 de março. Diário da República n.º 61/2024, Série I, de 2024-03-26.

Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março, e posteriores alterações. Diário da República n.º 51/2008, Série I, de 2008-03-12.

Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho. Diário da República n.º 116/2011, Série I, de 2011-06-17.

Dodd, N., Donatello, S., Cordella, M. (2020). Level(s) indicator 2.1: Bill of quantities, materials and lifespans 1–34.

International Living Future Institute (2020). The "Red List" of Building Materials. https://living-future.org/declare/declare-about/red-list/

Martins, I.; Rezvani, S.; Silva, M.J.; Salvado, A. F. (2022) – Auditorias de Pré-Demolição: Enquadramento concetual. Relatório 321/2022, 133 pag., novembro 2022.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens Ill, W.W. (1972). The Limits of Growth: Report for the Club of Rome´s Project on the predicament of mankind, Universe Books, New York.

Migliore, M., Talamo, C., Paganin, G. (2020). Level(s) indicator 2.2: Construction and Demolition waste and materials. Springer Tracts Civ. Eng. 45–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30318-1_2.

Olubukola O.T., Rodgers, G., Waschl, B., Salter, J., Ashraf, M. (2022). Harmonising life cycle sustainability thinking in material substitution for buildings. Resources, Conservation and Recycling, Volume 185.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

OTIMIZAÇÃO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAULIM E BIOCHAR DA CASCA DE ARROZ ATRAVÉS DE METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Sabrina Luana Dias Pereira[a]; Edna Possan[b]; Alex Neves Junior[c]

[a](Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Avenida Tarquínio Joslin dos Santos, 1000, 3522-9695, Foz do Iguaçu, Brasil), sld.pereira.2022@aluno.unila.edu.br

[b](Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Avenida Tarquínio Joslin dos Santos, 1000, 3522-9695, Foz do Iguaçu, Brasil), edna.possan@unila.edu.br

[c](Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Avenido Fernando Corrêa da Costa 2367, 3615-8000, Cuiabá, Brasil), alex.junior@ufmt.br

RESUMO

O geopolímero vem ganhando espaço nos últimos anos, com a capacidade de substituir o cimento Portland. Apesar das vantagens ambientais ele enfrenta desafios de expansão do uso, devido principalmente à falta de normalização. Vários estudos apresentaram a técnica de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para definição dos traços de geopolímero. O objetivo desse estudo é entender a correlação dos parâmetros de dosagem de geopolímeros, usando a técnica de MSR, a fim de se obter uma superfície de resposta que possa maximizar a resistência mecânica à compressão. Os geopolímeros foram produzidos utilizando metacaulim, silicato de sódio alcalino, solução de hidróxido de sódio a 10 Mol e biocarvão da casca de arroz pirolisado a 400° C por 15 minutos. Os materiais foram especificados conforme as caracteristicas físicas e químicas. Os resultados mostraram que o aumento do teor de metacaulim na mistura promove maiores resultados de resistência à compressão. A incorporação de biocarvão proporcionou uma diminuição da resistência à compressão média em relação às pastas sem biocarvão. Os maiores valores de resistência à compressão de geopolímeros com biocarvão foram produzidas com teores de 2,5 e 5%, alcançando entre 14 e 17 MPa. O uso ainda pode ser vantajoso em certas situações.

Palavras-chave: Geopolímero, Biocarvão, Metodologia de Superfície de Resposta, Resistência à Compressão.

1 INTRODUÇÃO

No setor de construção civil, o cimento Portland é o material mais fabricado e utilizado. Suas matérias primas e o método de fabricação são altamente emissivos em termos de dióxido de carbono (CO_2), o principal gás do efeito estufa. Devido ao impacto negativo gerado pela produção do cimento Portland e a fim de contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS), como o combate às mudanças climáticas (ODS 13), novas pesquisas têm tido como foco, a redução e a substituição parcial ou total deste material por outras soluções de menor impacto ambiental.

Um material capaz de substituir o cimento Portland e que vem ganhando espaço nos últimos anos, é o geopolímero. Geopolímeros são materiais sintetizados a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (Davidovits, 1981), endurecem e alcançam altas resistências rapidamente (Davidovits, 2013). Possuem propriedades de alto desempenho (Davidovits, 1991; Rangan, 2014) e vida útil superior ao do cimento convencional (Torgal & Jalali, 2009). A química desses materiais é de baixa pegada de carbono (Pradhan et al., 2022), estimasse que o custo ambiental do cimento Portland equipará a competitividade ecológica com os geopolímeros (Torgal & Jalali, 2009).

Devido à ausência de uma metodologia de mistura para a fabricação de geopolímeros, estudos têm adotado a técnica de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) como um caminho para definição dos traços. A MSR é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas na modelagem e análise de problemas (Montgomery, 2013; Zahid & Shafiq, 2020), com o objetivo de otimizar ou atingir uma resposta de interesse que pode ser influenciada por diversas variáveis através de planejamentos fatoriais (Barros Neto et al., 2001). Há pesquisas utilizando a abordagem de MSR para geopolímeros na confecção de produtos à base de metacaulim e sintetizado com sílica ativa (Santana et al., 2020); cinzas volantes (Shi et al., 2022; Zahid et al., 2018; Zahid & Shafiq, 2020); casca de arroz (Buyondo et al., 2020); metacaulim e sal de lítio (Li et al., 2021); metacaulim e cinzas volantes (Ma et al., 2023); rejeitos de mineração (Demir & Derun, 2019); escória granulada de alto forno (Ellis et al., 2016) etc.

O crescimento do agronegócio é devido principalmente o aumento anual de produção de alimento, e com isso é proporcional a geração de agro-resíduos. Muitos desses resíduos são ricos em sílica, base mineral do geopolímero. O uso de agro-resíduos permitiria a reutilização do material que seria descartado e cuja decomposição aeróbica geraria impactos ambientais como o gás metano e ainda, representando uma rota de valorização que reduziria a necessidade de cimento, diminuindo a emissão carbono associado aos processos de produção (Athira et al., 2021) e contribuindo com uma nova destinação deste material em um contexto de circularidade.

O biocarvão, produto obtido através de pirólise, um processo de baixo impacto, devido apenas a emissões resultantes do pré-aquecimento dos reatores por combustíveis fósseis e com isso, emissões de metano (EBC, 2022), é capaz da conversão termoquímica de biomassas originárias principalmente de agro resíduos tem sido estudado para a substituição parcial de precursores regulares, tais como, bagaço de cana com pozolana (Dzoujo et al., 2022), casca de arroz com cinzas volantes (Doctolero et al., 2020), palha de trigo e miscanto com metacaulim (Farges et al., 2018), casca de coco com metaculim (Khamlue et al., 2019) ou substituição total, gerando um produto álcali ativado, como a fabricação de tijolos de lodo de estação de tratamento de efluentes de fábrica de celulose e papel (Devi & Saroha, 2016).

Visando ampliar o entendimento acerca do uso do biocarvão em matrizes geopoliméricas e entender a influência dele combinada com precursores consagrados como o metacaulim e ativados por soluções alcalinas, o objetivo desse estudo é entender a correlação dos parâmetros de dosagem de

geopolímeros, usando a técnica de MSR, a fim de se obter uma superfície de resposta que possa maximizar a resistência mecânica à compressão, para futuras aplicações em materiais de construção.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

O geopolímero foi sintetizado com metacaulim como material precursor à base de sílica e alumina, disponibilizado pela Metacaulim do Brasil, silicato de sódio alcalino fabricado pela Quimisul SC Brasil Ltda e hidróxido de sódio em micropérolas, marca Nox, PA ACS com 98% de pureza. O biocarvão foi proveniente da pirólise da casca de arroz a temperatura de 400° C por 15 minutos e disponibilizado pela empresa SP – Pesquisa e Tecnologia.

Os materiais foram especificados conforme as características físicas e químicas. Os valores de massa específica foram obtidos a partir de ensaios de picnometria a gás, empregando nitrogênio ultrapuro, utilizando um picnômetro da marca Anton Paar, modelo Ultrapyc 5000. O metacaulim apresentou massa específica de 2,8332 g/cm³ e o biocarvão, 1,9540 g/cm³. O fabricante forneceu dados de atividade pozolânica Chapelle do metacaulim, 880 mg $Ca(OH)_2$/g (Metacaulim do Brasil, 2016).

A distribuição granulométrica dos materiais foi determinada utilizando um granulômetro marca CILAS, modelo 1190 através de difração de raios laser. A Figura 1 apresenta a granulometria do metacaulim com 10% dos sólidos menores que 1,20 µm; 50% menores que 19,85 µm e 90% menores que 60,15 µm e o diâmetro médio das partículas em torno de 25,75 µm. O biocarvão possui 10% dos sólidos menores que 1,47 µm; 50% menores que 14,58 µm e 90% menores que 61,86 µm e o diâmetro médio das partículas em torno de 23,97 µm.

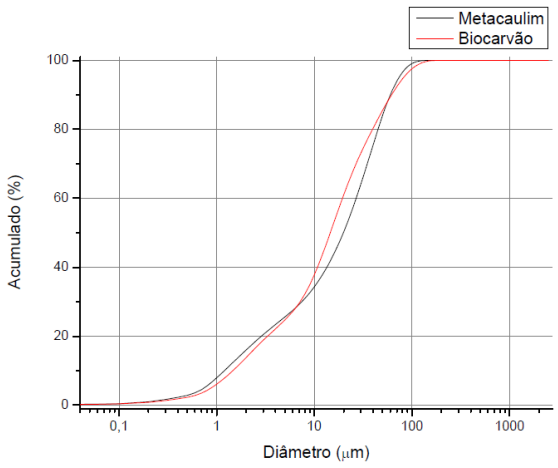


Figura 1 - Distribuição granulométrica do metacaulim e do biocarvão.

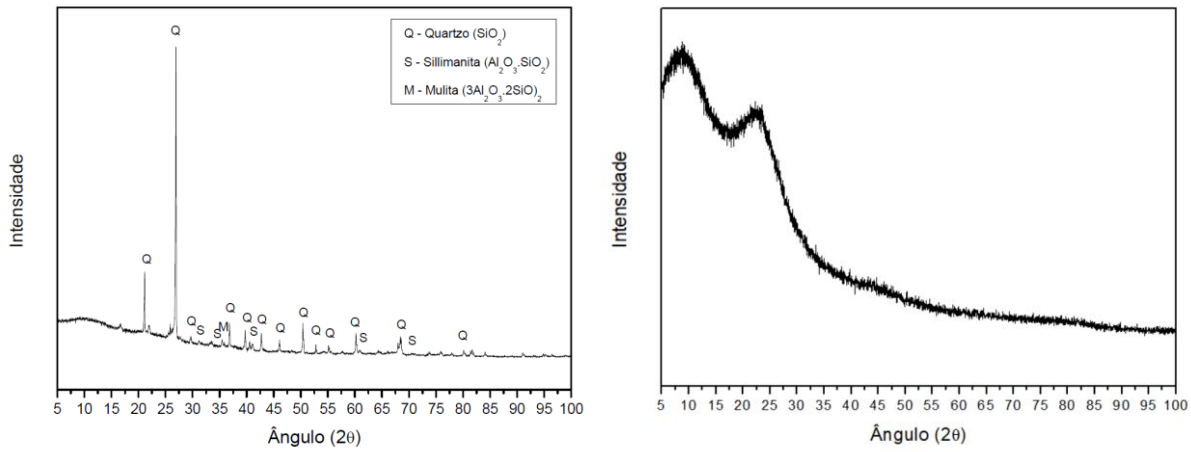
A composição química foi determinada a partir da espectroscopia de eflorescência de raio-X (FRX), utilizando um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger. O Quadro 1 apresenta a predominância de sílica (SiO_2) em ambos os materiais, o metacaulim com 61,38% e o biocarvão com 39,31%. O metacaulim também é constituído por um grande percentual de alumina (Al_2O_3), com 28,46%. Os teores de óxidos da solução de silicato de sódio alcalino e da solução de hidróxido de sódio a 10 Mol também estão presentes no Quadro 1.

Os minerais constituintes do metacaulim e do biocarvão foram determinados a partir da difração de raios-X (DRX) com um difratômetro multipropósito EMPYREAN da marca PANalytical. A Figura 2a

apresenta as fases cristalinas do metacaulim, principalmente quartzo, sillimanita e mulita na sua composição, enquanto que o biocarvão é inteiramente amorfo, sem a presença de fases cristalinas, conforme a Figura 2b.

Quadro 1 - Teor de óxidos dos materiais em pó (FRX) e das soluções de silicato de sódio e hidróxido de sódio a 10 Mol.

Teor de Óxidos (%)	Metacaulim	Biocarvão	Hidróxido de Sódio (10 Mol)	Silicato de Sódio
SiO_2	61,38	39,31	-	32,25
Al_2O_3	28,46	0,15	-	
CaO	2,84	0,30	-	
Fe_2O_3	2,00	0,30	-	
TiO_2	1,67	< LQ	-	
K_2O	0,49	0,73	-	
MgO	0,47	0,15	-	
P_2O_5	0,11	0,17	-	
Na_2O	-	-	62,00	15,00
H_2O	-	-	38,00	52,75
LOI	1,57	58,23	-	-



(a) (b)

Figura 2 - Difração de Raios-X do metacaulim e do biocarvão.

2.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)

O uso de projeto de experimentos pode tornar o processo de fabricação de produtos mais fácil e com melhor desempenho e confiabilidade, e ainda, gerar um menor custo de produção e em menor tempo (Montgomery, 2013). Uma subcategoria são os experimentos de mistura, onde dois ou mais ingredientes são misturados juntos em proporções variadas para formar um produto final com o objetivo de verificar as características do produto obtido e avaliar se a qualidade varia de uma mistura para outra (Cornell, 2011). A metodologia de superfície de resposta, ou MSR, é uma técnica favorável para modelar problemas com várias variáveis, como os componentes do experimento de mistura, e a necessidade de análise através de métodos estatísticos, com o fim de otimizar uma resposta (Montgomery, 2013).

Utilizando o software Design-Expert, versão 11, um programa experimental foi projetado após experimentos de triagem. O intervalo de variabilidade adotado para cada componente da mistura das pastas de geopolímero sem biocarvão, foi de 52 a 58%, 26 a 35% e 13 a 16%, e para as pastas de geopolímero com biocarvão, 48 a 59%, 25 a 35% e 14 a 17% respectivamente para os teores de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio, os teores de biocarvão variaram entre 2 e 8%.

Após a inserção dos valores máximos e mínimos de cada componente e da variável resposta, o software promoveu a aleatoriedade dos dados e forneceu uma quantidade de traços distintos, suficientes para desenvolver uma MSR com o modelo polinomial pré-definido como quadrático, adotado inicialmente pois o polinômio usualmente esperado é de ordem inferior a região de variáveis (Montgomery, 2013), ou seja, com três variáveis, o modelo de melhor ajuste esperado é de segundo grau.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \qquad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1, a resposta prevista (resistência à compressão) é representada por "y". β_0, β_i, β_{ii} e β_{ij}são os coeficientes, a constante, o coeficiente linear, o coeficiente quadrático e o coeficiente de interação, respectivamente. Alem disso, X_i e X_j são as variáveis independentes.

A MSR busca encontrar a melhor aproximação para a relação funcional entre Y e o conjunto de variáveis cujos polinômios aproximados são obtidos a partir do método dos mínimos quadrados (Montgomery, 2013). Foram realizadas 16 misturas distintas para geopolímeros com e sem biocarvão. Os valores dos componentes dos traços do geopolímero sem biocarvão são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Percentuais dos traços dos geopolímeros com e sem biocarvão.

Geopolímero sem biocarvão				Geopolímero com biocarvão				
Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)	Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)	BIO (%)
A1	54,69	29,93	15,38	A2	49,66	32,00	14,83	3,51
B1	52,00	35,00	13,00	B2	48,63	33,00	14,00	4,37
C1	53,68	31,75	14,57	C2	47,00	34,70	14,00	4,30
D1	55,37	26,63	18,00	D2	51,89	30,09	15,00	3,02

Geopolímero sem biocarvão				Geopolímero com biocarvão				
Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)	Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)	BIO (%)
E1	52,55	34,00	13,45	E2	52,62	28,38	16,00	2,00
F1	52,00	30,00	18,00	F2	51,47	32,00	14,53	2,00
G1	56,00	26,00	18,00	G2	52,53	29,27	15,21	3,00
H1	52,37	32,15	15,48	H2	48,67	33,50	15,80	2,03
I1	55,38	31,62	13,00	I2	49,94	28,12	17,00	4,94
J1	53,71	30,29	16,00	J2	47,78	34,00	14,72	3,50
K1	53,58	33,42	13,00	K2	50,73	29,00	15,42	4,85
L1	55,18	29,82	15,00	L2	49,07	34,20	14,00	2,73
M1	53,95	29,05	18,00	M2	48,00	28,46	16,15	7,39
N1	56,27	29,88	13,85	N2	47,59	33,41	14,00	5,00
O1	56,12	27,76	16,12	O2	47,00	30,29	14,71	8,00
P1	55,83	27,17	17,00	P2	49,11	31,71	14,00	5,18

2.3 MÉTODOS

A solução de hidróxido de sódio a 10 Mol foi produzida 24 horas do preparo das misturas. Após, essa solução foi misturada com silicato de sódio alcalino na quantidade especificada para cada traço com o auxílio de um misturador magnético, na escala do próprio equipamento entre 2,5 a 3, marca Lucadema, modelo Luca e em seguida misturado com o metacaulim, homogeneizado por 1 minuto e misturado por 5 minutos com um misturador mecânico marca Fisatom, modelo 713D. Para os traços com biocarvão, o metacaulim foi homogeneizado com o biocarvão por 1 minuto antes de adicionar a solução ativadora.

A mistura foi disposta em moldes cúbicos de 50 mm, fabricado em material à base de silicone, e este em uma forma de madeira para contenção e regularização das faces. Foram cobertos com plástico filme PVC, armazenados em laboratório à temperatura ambiente de 25° C por 48 horas até a desforma, posteriormente foram envolvidos em plástico PVC e armazenados a mesma temperatura até os 28 dias, para ensaio de resistência à compressão simples. O ensaio de resistência à compressão simples foi promovido pelo Laboratório de Tecnologia de Concreto da ITAIPU Binacional utilizando uma prensa marca Wolpert, com capacidade de 20.000 kgf e com velocidade de 1000 N/s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

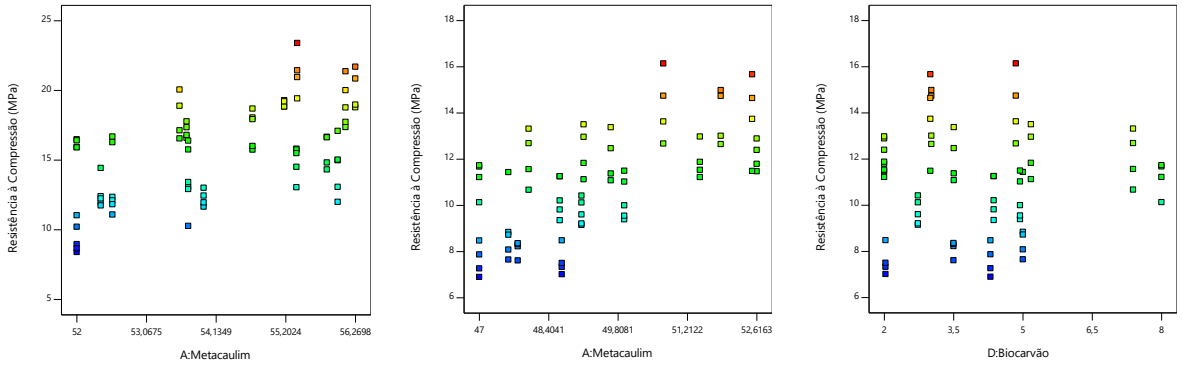
Os resultados de resistência dos corpos de prova de ambas as análises de geopolímero, com e sem biocarvão estão apresentados no Quadro 3. A resistência à compressão das pastas de geopolímero sem biocarvão variou na média entre 9,45 e 21,30 MPa, com desvio padrão entre 0,24 e 2,43 MPa. A resistência à compressão das pastas de geopolímero com biocarvão variou na média entre 7,58 e 14,29 MPa, com desvio padrão entre 0,35 e 1,78 MPa.

Quadro 3 - Resistência à compressão simples das pastas de geopolímero com e sem biocarvão.

Materiais				Resistência à Compressão Média	Materiais					Resistência à Compressão Média
Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)		Traço	MK (%)	SS (%)	HS (%)	BIO (%)	
A1	54,69	29,93	15,38	17,28	A2	49,66	32,00	14,83	3,51	12,07
B1	52,00	35,00	13,00	16,18	B2	48,63	33,00	14,00	4,37	10,38
C1	53,68	31,75	14,57	17,13	C2	47,00	34,70	14,00	4,30	07,63
D1	55,37	26,63	18,00	14,92	D2	51,89	30,09	15,00	3,02	13,84
E1	52,55	34,00	13,45	13,38	E2	52,62	28,38	16,00	2,00	12,14
F1	52,00	30,00	18,00	09,45	F2	51,47	32,00	14,53	2,00	11,90
G1	56,00	26,00	18,00	14,43	G2	52,53	29,27	15,21	3,00	13,88
H1	52,37	32,15	15,48	12,55	H2	48,67	33,50	15,80	2,03	07,58
I1	55,38	31,62	13,00	21,30	I2	49,94	28,12	17,00	4,94	10,29
J1	53,71	30,29	16,00	13,63	J2	47,78	34,00	14,72	3,50	08,13
K1	53,58	33,42	13,00	18,15	K2	50,73	29,00	15,42	4,85	14,29
L1	55,18	29,82	15,00	19,04	L2	49,07	34,20	14,00	2,73	09,70
M1	53,95	29,05	18,00	12,26	M2	48,00	28,46	16,15	7,39	12,06
N1	56,27	29,88	13,85	20,07	N2	47,59	33,41	14,00	5,00	08,95
O1	56,12	27,76	16,12	19,05	O2	47,00	30,29	14,71	8,00	11,19
P1	55,83	27,17	17,00	15,61	P2	49,11	31,71	14,00	5,18	12,35

Considerando as correlações entre os componentes da mistura de geopolímero sem biocarvão e a resistência à compressão, o metacaulim, Figura *3*a, atingiu uma correlação de 0,577, sendo que na confecção de geopolímeros à base de metacaulim e ativado com hidróxido de sódio e silicato de sódio, quanto menor a relação sólidos/líquidos, maior a resistência à compressão (Pangdaeng et al., 2018).

Conforme o aumento do teor de metacaulim na mistura, maior o resultado da resistência, porém o valor intermediário de correlação do metacaulim com a resistência à compressão foi devido ao pequeno intervalo que foi ensaiado e a dispersão dos resultados. O silicato de sódio, não apresentou nenhuma correlação, com o valor de 0,032, porém uma faixa intermediária entre 26 e 31% de silicato de sódio na mistura promoveu melhores resultados de resistência. O hidróxido de sódio, alcançou o valor de -0,511 e conforme o mesmo comportamento do metacaulim, os dados apontaram que menores teores de hidróxido de sódio na mistura promove resultados elevados de resistência à compressão.



(a) (b) (c)

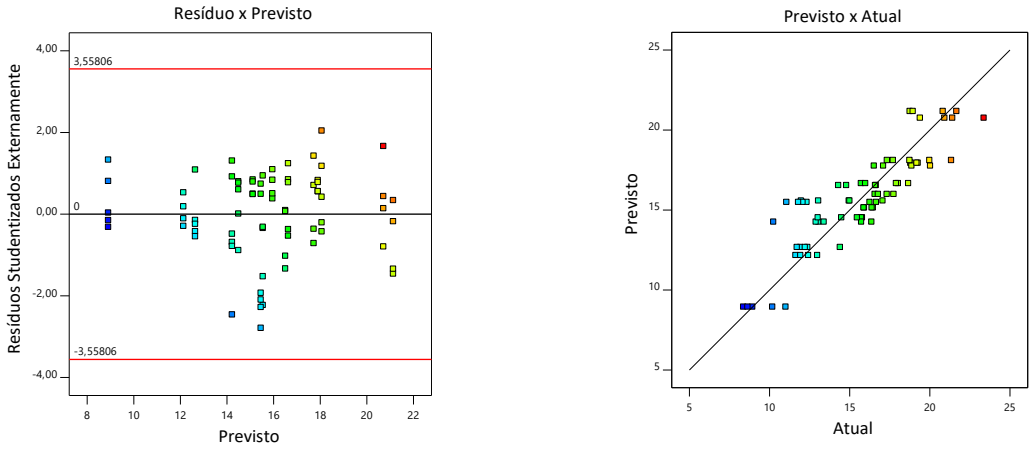
Figura 3 - Correlações entre os componentes da mistura e a resistência à compressão.

Considerando as correlações entre os componentes da mistura de geopolímero sem biocarvão e a resistência à compressão, o metacaulim, Figura *3*b atingiu uma correlação de 0,647. Conforme o aumento do teor de metacaulim na mistura, maior o resultado de resistência. O silicato de sódio apresentou correlação de -0,665 com uma faixa de alta resistência entre 29 e 30% de teor na mistura. O hidróxido de sódio e o biocarvão, Figura *3*c, apresentou correlações baixas, de 0,197 e 0,063, respectivamente, indicando que o incremento de biocarvão não teve influência na resistência à compressão, porém, os teores entre 2,5 e 5% alcançou os maiores resultados.

3.1 ANÁLISE DO GRUPO 1 – GEOPOLÍMERO SEM BIOCARVÃO

Na análise do modelo de geopolímero sem biocarvão, ajustado ao modelo linear, alcançou o valor de R^2 foi de 0,7622, R^2 ajustado de 0,7555 e R^2 previsto de 0,7420, com diferença de R^2_a e R^2_p de 0,0135. A estatística apresentou precisão adequada de 36,2091, com estimativa de desvio padrão associado ao experimento de 1,68 e coeficiente de variação de 10,71%. Na análise de ANOVA, o valor de F do modelo foi de 113,80 com o p-valor inferior a 0,0001 e todos os termos lineares do modelo, A, B e C se mostraram significativos, com p-valor também inferior a 0,0001, implicando que o modelo é significativo.

O gráfico de resíduos, conforme Figura 4a, apresentou dados homescedásticos com dispersão aleatória em torno do zero e variância constante. O gráfico de resíduos e a ordem de execução demonstrou a independência entre os dados com dispersão aleatória. O gráfico de probablidade normal, apresentou dados bem ajustados à reta e dispersão mínima, os resíduos studentizados estavam entre $-3 < x < 3$ e dentro do intervalo de probabilidade de 99%, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal. O gráfico de valores de resposta previstos e reais, apresentado na Figura 4b apresenta os dados bem distribuídos sobre a reta, com a ausência de valores muito dispersos indicando a capacidade do modelo em prever os dados, confirmado com altos valores de R^2 e R^2_a.



(a) (b)

Figura 4 - Gráfico de resíduos e valores previstos do geopolímero sem biocarvão.

A superfície de resposta alcançada é apresentada na Figura 5, ela descreve uma superfície plana e inclinada. As áreas em azul representam baixos valores de resistência, sendo crescente até a região em vermelho, evidenciando que altos teores de metacaulim associado a baixos teores de hidróxido de sódio favorecem resultados superiores de resistência à compressão. O formato da superfície e das curvas de níveis podem ser descritos a partir de uma equação, no formato linear apresentada na Equação 2, tal que a resistencia à compressão y é uma combinação linear dos componentes da mistura, metacaulim (A), silicato de sódio (B) e hidróxido de sódio (C), de modo que a soma dos mesmos precisa ser igual a 100.

$$y = 1{,}109 * A - 0{,}550 * B - 1{,}791 * C \qquad \text{Equação 2}$$

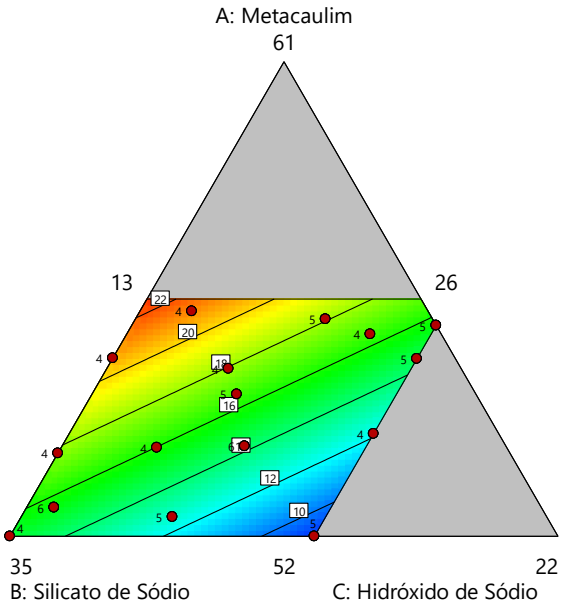
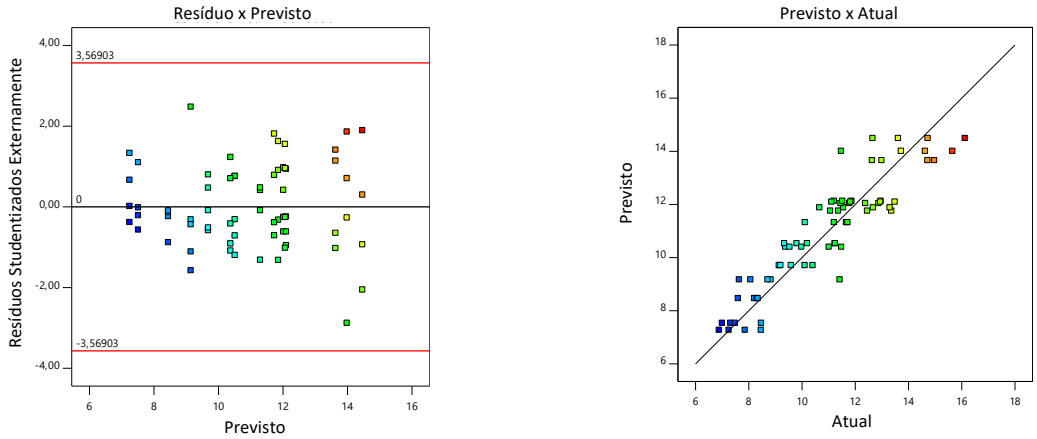


Figura 5 - Superfície de resposta do geopolímero sem biocarvão.

3.2 ANÁLISE DO GRUPO 2 – GEOPOLÍMERO COM BIOCARVÃO

Na análise do modelo de geopolímero com biocarvão, ajustado ao modelo quadrático, obteve o valor de R^2 foi de 0,8331, R^2 ajustado de 0,8072 e R^2 previsto de 0,7727, com diferença de R^2_a e R^2_p de 0,0345. A estatística apresentou precisão adequada de 18,7990, com estimativa de desvio padrão associado ao experimento de 1,00 e coeficiente de variação de 9,14%. Na análise de ANOVA, o valor de F do modelo foi de 32,17 com o p-valor inferior de 0,0001 e os termos lineares do modelo, B, C e D os temos quadráticos, AC, AD, BC, CD se mostraram significativos, com p-valor inferior a 0,05, implicando que o modelo é significativo. Pontos por falta de ajuste foram não significativos, ou seja, não há necessidade de incremento de pontos no modelo para melhorar os resultados.

Como relatado na análise de geoplímero sem biocarvão, para o geopolímero com biocarvão o gráfico de resíduos, Figura 6a apresenta dados com dispersão aleatória, homocedasticidade e variância constante. O gráfico de resíduos e a ordem de execução, identifica a independência entre os dados. O gráfico de probabilidade normal, apresenta dados com resíduos seguindo uma distribuição normal. O gráfico de valores de resposta previstos e reais, Figura 6b apresenta os dados bem distribuídos sobre a reta, confirmado com altos valores de R^2 e R^2_a.



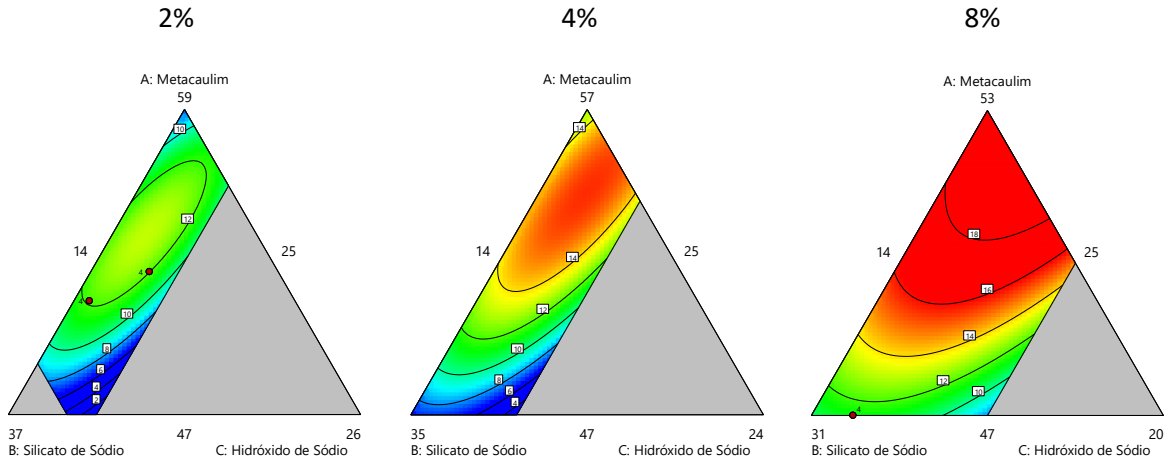
(a) (b)

Figura 6 - Gráfico de resíduos e valores previstos.

A superfície de resposta alcançada é apresentada na Figura 7, ela descreve uma superfície em curva em todos os teores presentes de biocarvão. As áreas em azul representam baixos valores de resistência, sendo crescente até a região em vermelho. O formato da superfície e das curvas de níveis em formato de parábola podem ser descrito a partir de uma equação quadrática apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, tal que a resistencia à compressão y é uma combinação dos componentes da mistura, metacaulim (A), silicato de sódio (B), hidróxido de sódio (C) e biocarvão (D), de modo que a soma dos mesmos precisa ser igual a 100.

A partir dos diferentes teores de biocarvão, zonas de altas resistências à compressão são visualizadas. Isso se deve conforme o aumento de metacaulim e diminuição do silicato de sódio na mistura.

$$y = -5{,}99 * A - 5{,}17 * B - 66{,}91 * C - 6{,}66 * D + 0{,}16 * AB + 1{,}07 * AC + 0{,}18 * AD + 0{,}77 * BC - 0{,}01 * BD + 0{,}89 * CD \quad \text{Equação 3}$$



(a) (c) (g)

Figura 7 - Superfície de resposta do geopolímero com biocarvão.

4 CONCLUSÕES

A pesquisa mostrou que é possível a produção de pastas geopoliméricas a partir de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio com a incorporação de biocarvão da casca de arroz. Neste estudo, os intervalos de dosagens de geopolímeros com e sem biocarvão foram determinadas através da realização e análise dos experimentos por meio de metodologia de superfície de resposta.

Nas pastas sem biocarvão, o metacaulim e o hidróxido de sódio apresentaram correlações mais significativas que o silicato de sódio, onde, maiores quantidades de metacaulim e menores quantidades de hidróxido de sódio corresponderam à valores de resistências maiores. Nas pastas com biocarvão, o metacaulim e o silicato de sódio apresentaram correlações mais significativas que o hidróxido de sódio e o biocarvão, de modo que maiores quantidades de metacaulim e menores quantidades de silicato de sódio correspondem a valores de resistências maiores.

Através da correlação entre biocarvão e resistência à compressão, a incorporação de biocarvão proporcionou uma diminuição da resistência à compressão média em relação às pastas de geopolímero sem biocarvão. Os maiores valores de resistência à compressão de geopolímeros com biocarvão foram produzidas com teores de 2,5 e 5%, alcançando entre 14 e 17 MPa. Apesar de que a resistência das pastas de geopolímero com biocarvão ter sido inferior às pastas sem biocarvão e a classe de resistência dos cimentos Portlands previsto na NBR 16697 (ABNT, 2018) recomendar o mínimo de 25 MPa, o uso das pastas de geopolímero com biocarvão ainda pode ser vantajoso para determinadas aplicações.

REFERÊNCIAS

ABNT. (2018). *NBR 16697 Cimento Portland-Requisitos*. www.abnt.org.br

Athira, V. S., Charitha, V., Athira, G., & Bahurudeen, A. (2021). Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 286). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125429

Barros Neto, B. de., Scarminio, I. Spacino., & Bruns, R. Edward. (2001). *Como fazer experimentos pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Editora da Unicamp.

Buyondo, K. A., Olupot, P. W., Kirabira, J. B., & Yusuf, A. A. (2020). Optimization of production parameters for rice husk ash-based geopolymer cement using response surface methodology. *Case Studies in Constrution Materials*, *13*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00461

Cornell, J. A. (2011). *A Primer on Experiments with Mixtures*. WILEY.

Davidovits, J. (1981). Geopolymer cements to minimize carbon-dioxide greenhouse-warming. *Ceramic Transactions*, *37*, 165–182.

Davidovits, J. (1991). Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, *37*, 1633–1656.

Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement. *Geopolymer Science and Technics*, 11. www.geopolymer.org

Demir, F., & Derun, M. (2019). Modelling and optimization of gold mine tailings based geopolymer by using response surface method and its application in Pb 2þ removal. *Journal of Cleaner Production*, *237*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117766

Devi, P., & Saroha, A. K. (2016). Risk assessment and technical feasibility of usage of paper mill sludge biochar-based exhausted adsorbent for geopolymeric brick formation. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(21), 21641–21651. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7343-4

Doctolero, J. Z. S., Beltran, A. B., Uba, M. O., Tigue, A. A. S., & Promentilla, M. A. B. (2020). Self-healing biogeopolymers using biochar-immobilized spores of pure-and co-cultures of bacteria. *Minerals*, *10*(12), 1–17. https://doi.org/10.3390/min10121114

Dzoujo, H. T., Shikuku, V. O., Tome, S., Akiri, S., Kengne, N. M., Abdpour, S., Janiak, C., Etoh, M. A., & Dina, D. (2022). Synthesis of pozzolan and sugarcane bagasse derived geopolymer-biochar composites for methylene blue sequestration from aqueous medium. *Journal of Environmental Management*, *318*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115533

EBC. (2022). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. In *European Biochar Certificate* (Vol. 10).

Ellis, K., Silvestrini, R., Varela, B., Alharbi, N., & Hailstone, R. (2016). Modeling setting time and compressive strength in sodium carbonate activated blast furnace slag mortars using statistical mixture design. *Cement and Concrete Composites*, *74*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.008

Farges, R., Gharzouni, A., Ravier, B., Jeulin, P., & Rossignol, S. (2018). Insulating foams and dense geopolymers from biochar by-products. *Journal of Ceramic Science and Technology*, *9*(2), 193–200. https://doi.org/10.4416/JCST2017-00098

Khamlue, P., Lertcumfu, N., Jaita, P., Manotham, S., Tunkasiri, T., Malasri, P., & Rujijanagul, G. (2019). The effects of Biochar additive on the properties of Geopolymer materials. *Key Engineering Materials*, *798 KEM*, 273–278. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.798.273

Li, M., Liu, H., Duan, P., Ruan, S., Zhang, Z., & Ge, W. (2021). The effects of lithium slag on microstructure and mechanical performance of metakaolin-based geopolymers designed by response surface method (RSM). *Construction and Building Materials*, *299*, 123950. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123950

Ma, Z., Dan, H., Tan, J., Li, M., & Li, S. (2023). Optimization Design of MK-GGBS Based Geopolymer Repairing Mortar Based on Response Surface Methodology. *Materials*, *16*(5). https://doi.org/10.3390/ma16051889

Metacaulim do Brasil. (2016). *Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos*. www.metacaulim.com.br

Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). WILEY.

Pangdaeng, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2018). Effect of sodium hydroxide concentration and sodium silicate to sodium hidroxide ratio on properties of calcined kaolin-white portland cement geopolymer. *International Journal of Geomate*, *14*(46), 121–128. https://doi.org/10.21660/2018.46

Pradhan, P., Dwibedy, S., Pradhan, M., Panda, S., & Panigrahi, S. K. (2022). Durability characteristics of geopolymer concrete - Progress and perspectives. *Journal of Building Engineering*, *59*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105100

Rangan, V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*, 41–59.

Santana, H. A., Andrade Neto, J. S., Amorim Júnior, N. S., Ribeiro, D. V., Cilla, M. S., & Dias, C. M. R. (2020). Self-compacting geopolymer mixture: Dosing based on statistical mixture design and simultaneous optimization. *Construction and Building Materials*, *249*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118677

Shi, X., Zhang, C., Wang, X., Zhang, T., & Wang, Q. (2022). Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash-GGBS based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, *315*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125644

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2009, November). Ligantes Geopoliméricos: Uma alternativa ao cimento Portland? *Ingenium*, 66–68.

Zahid, M., & Shafiq, N. (2020). Effects of sand/fly ash and the water/solid ratio on the mechanical properties of engineered geopolymer composite and mix design optimization. *Minerals*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/min10040333

Zahid, M., Shafiq, N., Hasnain Isa, M., & Gil, L. (2018). Statistical modeling and mix design optimization of fly ash based engineered geopolymer composite using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, *194*, 483–498. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.158

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DE MISTURAS BINÁRIAS DE CINZAS DE FUNDO DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E CINZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE

Yoleimy Avila Pereira [a]; Jorge de Brito [a]; Rui Vasco Silva [a]

[a] Civil Engineering Research & Innovation for Sustainability (CERIS), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal), e-mails: yoleimy.pereira@tecnico.ulisboa.pt; jb@civil.ist.utl.pt; rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A crescente produção de resíduos sólidos urbanos, ligada ao aumento populacional, destaca a necessidade de soluções sustentáveis para a gestão desses resíduos. Este estudo explorou a viabilidade técnica de materiais activados alcalinamente, incorporando cinzas de fundo provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos. Estas cinzas apresentam desafios como a presença de alumínio metálico, que gera hidrogénio e causa expansão, e um baixo teor de fases de aluminossilicatos amorfos. Para superar estas limitações, foram produzidas misturas com diferentes proporções de cinzas volantes e de cinzas de fundo (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), utilizando dois métodos de formulação do activador alcalino. Implementou-se um pré-tratamento das cinzas de fundo com hidróxido de sódio, seguido da produção e caracterização das argamassas. No estado fresco, foram examinados o espalhamento e a densidade. No estado endurecido, foram avaliadas a resistência à compressão e à flexão, o módulo de elasticidade em diversas idades de cura, entre outras propriedades. Os resultados mostraram a eficácia do pré-tratamento na estabilização dimensional das misturas. Embora as cinzas de fundo tivessem menor reactividade, provetes com proporção 50/50 de cinzas de fundo/cinzas volantes exibiram resistência à compressão de 25,2 MPa em 28 dias, superando o valor de 5,7 MPa das argamassas com apenas cinzas de fundo.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; materiais activados alcalinamente; cinzas de fundo de resíduos sólidos urbanos.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Drabold (2009), materiais amorfos são aqueles que apresentam uma distribuição atómica ou molecular desordenada, sem qualquer padrão repetitivo, ao contrário dos materiais cristalinos. Esta característica nos sólidos faz com que se desenvolvam propriedades únicas, possibilitando o seu potencial uso em diversos campos. No contexto específico dos materiais de construção, o cimento baseia-se num sólido polimorfo que gera emissões de dióxido de carbono significativas durante a sua fabricação - o clínquer (Ludwig and Zhang, 2015) (Gobbo et al., 2004). Diversos estudos e investigações recentes têm sido direccionados à minimização dessas emissões, seja optimizando o processo produtivo ou explorando materiais alternativos com as mesmas ou melhores propriedades mecânicas e de durabilidade para o produto final. As investigações orientadas para substituir uma parte do cimento geralmente focam-se no uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), que consistem em materiais com elevada presença de fases amorfas, sendo estes os componentes de maior reactividade. De acordo com Snellings et al. (2023), materiais que contêm grandes quantidades dessas fases, principalmente aluminossilicatos, são considerados candidatos ideais para MCS emergentes e futuros.

Esta organização dos átomos ou moléculas no material é o que torna, por exemplo, a pozolana natural altamente reactiva. Devido à sua elevada amorfia, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos hidratados com propriedades hidráulicas (Shi, 2001). Quando se considera o substituto total do cimento, destaca-se a activação alcalina, um tipo de reacção química que utiliza um precursor com alto teor de aluminossilicatos amorfos e uma solução básica. Sob condições específicas de tempo de cura e temperatura, este processo produz materiais activados alcalinamente (MAA), um produto que envolve aluminossilicatos hidratados (N-A-S-H ou C-A-S-H), com propriedades semelhantes ou até melhores do que aqueles feitos com cimento Portland convencional (Walkley et al., 2016) (Kravchenko et al., 2024).

Os precursores usados nos MAA são geralmente resíduos ou subprodutos de cadeias produtivas que contêm fases amorfas disponíveis para a activação. Entre esses resíduos, destaca-se o uso de escória de alto-forno e cinzas volantes de classe F (CV), os quais possuem uma elevada quantidade de fases amorfas (Chen et al., 2024). Além desses, há outros precursores como as cinzas provenientes do fundo de incineradoras de resíduos urbanos (CFRSU), cuja estrutura amorfa pode variar dependendo da eficiência da queima do lixo. Um relatório do Banco Mundial projecta uma produção anual de 3,40 mil milhões de toneladas de resíduos sólidos municipais até 2050, destacando a necessidade de encontrar soluções para esse problema que cresce com o crescimento da população (Lu et al., 2024).

Chen et al. (2024) indicam que há informação limitada sobre as fases amorfas presentes nas CFRSU. No entanto, sugerem que o vidro é uma importante fonte da fase amorfa nesse precursor, embora a composição química da fase amorfa não seja necessariamente a mesma do vidro. O seu estudo também indica que conhecer essa composição poderia ser útil para desenvolver um modelo termodinâmico que permita prever os produtos de reacção do MAA feitos com as CFRSU.

Um estudo prévio sobre o uso das CFRSU proveniente da central termoeléctrica Valorsul em Sines, Portugal, como precursor de MAA, revelou a baixa eficácia deste resíduo, possivelmente devido a uma queima ineficiente no processo de combustão. Como resultado, a disponibilidade das fases amorfas e, consequentemente, a sua reactividade, não apresentaram resultados óptimos no desempenho mecânico. Carvalho et al. (2021), ao utilizar este material, obtiveram um valor aproximado de 6 MPa aos 28 dias, utilizando como activador alcalino uma solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio.

Outro desafio presente nas CFRSU é a presença de alumínio metálico, que reage com o activador alcalino (NaOH) para formar hidrogénio (Kurda et al., 2020). Durante o processo de endurecimento

dos elementos (i.e., argamassas e/ou betões), a libertação do hidrogénio gera uma alta porosidade, piorando o desempenho, indicando a necessidade de um pré-tratamento das CFRSU a fim de minimizar ou eliminar completamente o efeito do hidrogénio gasoso sobre os materiais produzidos. Deste modo, para melhorar as propriedades mecânicas dos MAA à base de CFRSU, a presente investigação foi conduzida, focando-se na variação das proporções nas misturas de precursores binários (CFRSU + CV), com o objectivo de identificar a mistura binária óptima CFRSU/CV com a maior quantidade de CFRSU pré-tratadas, que permita alcançar desempenhos mecânicos e de durabilidade adequados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A recolha das CFRSU foi feita na instalação da Valorsul relativamente aos resíduos gerados em Janeiro de 2019. O material foi homogeneizado por uma mistura repetida. Uma amostra representativa foi levada para o laboratório do Instituto Superior Técnico em *big bags*. As CV convencionais foram fornecidas pela EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. no Centro de Produção de Sines, não necessitando de nenhuma preparação adicional.

A preparação das CFRSU para moagem envolveu várias etapas. Inicialmente, o material foi seco a 105 °C até atingir massa constante. Posteriormente, foi realizada uma limpeza manual para remover partículas plásticas, de madeira ou metálicas. Uma amostra de 20 kg deste material foi moída na máquina de Los Angeles por 30 minutos. As partículas maiores do que 4 mm do material resultante deste processo foram trituradas num moinho cilíndrico. Finalmente, a CFRSU resultante dos dois processos anteriores foi moída num moinho de bolas com uma carga abrasiva de 56 kg de bolas de aço de diferentes diâmetros, resultando num produto pulverulento com tamanho médio de partícula semelhante ao do cimento. Na Figura 1, observa-se as diferentes etapas da moagem das CFRSU.

Figura 1 - CFRSU em diferentes etapas de moagem: (a) CFRSU antes de entrar na máquina de Los Angeles; (b) CFRSU após a máquina de Los Angeles; (c) CFRSU após a máquina de moinho de bolas

A composição química e as fases cristalinas das CFRSU e CV foram determinadas por fluorescência de raios X (FRX) e difracção de raios X (DRX), respectivamente. O potencial de hidrogénio (pH) foi testado para ambos os materiais, conforme a norma ASTM D4972 (International, 2019). O teor de alumínio no CFRSU foi quantificado através da captura de hidrogénio gerado pela reacção com NaOH. Finalmente, a densidade dos agregados foi determinada como 2620 kg/m³ para areia fina 0/1 e 2610 kg/m³ para areia grossa 0/4. A absorção de água da areia fina 0/1 e da areia grossa 0/4 foi de 0,2% e 03% respectivamente.

O espalhamento das argamassas no estado fresco foi avaliada de acordo com a EN 1015-3 (1998) e a sua densidade foi medida conforme a norma EN 1015-6 (1999). As resistências à compressão e à flexão das argamassas foram avaliadas de acordo com a norma EN 1015-11(2020). O módulo de elasticidade dinâmico foi medido consoante a norma EN 14146 (2004). Estas propriedades foram avaliadas a 7, 28, 91 e 182 dias. Finalmente, a profundidade de carbonatação foi avaliada de acordo com a EN 13295 (2005).

2.1 OPTIMIZAÇÃO DO ACTIVADOR ALCALINO

A presente investigação considerou a proporção em massa dos precursores CV/CFRSU nas seguintes combinações: 75% CFRSU-25% CV, 50% CFRSU-50% CV, 25% CFRSU-75% CV, 100% CFRSU-0% CV e 0% CFRSU-100% CV. Os rácios para a preparação do activador alcalino (mistura do hidróxido de sódio NaOH, silicato de sódio - Na_2SiO_3, e água) Na_2O/ligante e SiO_2/Na_2O foram determinadas com base num critério de proporcionalidade, utilizando os valores óptimos previamente identificados para materiais activados alcalinamente com CV e CFRSU como precursor únicos na primeira fase: para a mistura 0.0 CF (0% CFRSU - 100% CV), os rácios Na_2O/ligante e SiO_2/Na_2O foram de 15% e 1 (15/1), respectivamente e para a mistura 1.0 CF (100% CFRSU - 0% CV), os valores foram de 8% e 0 (8/0). Com base nessas proporções, foram estabelecidos os seguintes rácios óptimos do activador alcalino (OAA) para as misturas:

- ✓ 0,25 CF (25% CFRSU - 75% CV): 13,25/0,75
- ✓ 0,5 CF (50% CFRSU - 50% CV): 11,5/0,5
- ✓ 0,75 CF (75% CFRSU - 25% CV): 9,75/0,25

Foram também preparadas misturas com proporções equivalentes utilizando um teor constante de activador alcalino (CAA), com um rácio médio de 11,5/0,5. O desempenho óptimo foi avaliado com o OAA, visando maximizar a eficiência do material resultante, independentemente das variações dos precursores. No entanto, a comparabilidade directa dos resultados foi limitada devido às modificações nas proporções dos precursores, embora se antecipasse uma melhoria teórica no desempenho ao incrementar a proporção de CV.

A etapa de pré-tratamento nas argamassas activadas alcalinamente com CFRSU como precursor, consistiu num tempo de contacto mais longo com a solução alcalina para permitir que os iões de hidróxido (OH^-) reagissem com o alumínio metálico presente neste precursor, resultando na libertação de gás hidrogénio durante o estado fresco da mistura. O processo incluiu a preparação da solução alcalina com NaOH dissolvido em água, adição à CFRSU pré-pesada, mistura com metade do plastificante por 10 minutos. Depois, a mistura ficou coberta com filme plástico e ficou a repousar durante 24 horas. Após este período, foi feita uma compensação de perda de peso com água.

2.2 QUANTIDADES DOS CONSTITUINTES

A razão volumétrica ligante / agregado (VL/VA) foi fixada em 0,33 e a razão volumétrica água / aglomerante (VAg/VL) foi definida como 0,4. A quantidade total de água nesta razão incluía a água proveniente da solução de silicato de sódio e da água adicionada. Foram utilizados dois tipos de areia siliciosa como agregado: areia grossa 0/4 e areia fina 0/1. Como superplastificante, utilizou-se o SikaPlast-717, à base de naftaleno para uso comercial, composto por uma combinação de dispersantes orgânicos sintéticos à base de água. O rácio em massa de superplastificante / ligante foi considerado como 1%. De acordo com a pesquisa de Casanova et al. (2021), que avaliou a inluência da implementação de um cura térmica a temperaturas de 70 °C e 90 °C para a ativação alcalina do CFRSU, verificou-se que a temperatura de 90 °C proporcionou um melhor desempenho mecânico inicial nas argamassas, para além de um crescimento contínuo das resistências até aos 91 dias. Portanto, no presente estudo, decidiu-se adotar uma temperatura intermediária de 80 °C, mantendo-se um tempo de cura constante de 24 horas. Esta escolha pretende avaliar um ponto meio otimizado entre os benefícios observados nas diferentes temperaturas previamente estudadas. As quantidades totais necessárias para esta campanha experimental foram: 29,6 kg de CFRSU, 28,3 kg de CV, 49,8 kg de arena fina, 115,55 kg de areia grossa, 3,3 kg de hidróxido de sódio, 26,9 kg de silicato de sódio y 1,15 kg de superplastificante (SP).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados e a discussão dos ensaios realizados aos ligantes, às misturas em estado fresco e às argamassas em estado endurecido. Os testes forneceram dados importantes sobre o desempenho e a qualidade dos MAA.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES LIGANTES

A Tabela 2 apresenta a composição química das CFRSU e das CV usadas no estudo. A soma dos óxidos $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ é de 88,7% para CV e 64,3% para CFRSU. Segundo a norma ASTM C618-05 (2015), as CV são classificadas como tipo F, e as CFRSU como cinzas volantes tipo C, No caso do MIBA, a ASTM classifica o resíduo como cinza volante tipo C, pois a soma dos óxidos ultrapassa 50%, de acordo com a literatura, 66% dos MIBA cumprem este limite (Lynn et al., 2017).

Tabela 2 - Composição química das matérias-primas, CV e CFRSU (% em massa)

Precursores	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SiO_2	SO_3	Cl-
CV (%)	25,5	2,3	6,9	2,7	1,83	1,29	56	0,8	0
CFRSU (%)	8,82	18	6,68	1,6	4	6,53	49	1,4	0

A Figura 2 apresenta os resultados da difracção de raios X (DRX) das amostras de CFRSU e CV utilizadas no presente estudo. As fases cristalinas observadas nas CFRSU são quartzo (SiO_2), calcita ($CaCO_3$), magnetita ($Fe^{2+}Fe^{3+}2O_4$), faialite ($(Fe^{2+})_2SiO_4$), magnesite ($MgCO_3$), microclina ($KAlSi_3O_8$), fosfato de magnésio ($Mg_3(PO_4)_2$), fosfato de sódio e ferro e anidrita ($CaSO_4$), consistentes com outros estudos(Wei et al., 2014) (Bayuseno and Schmahl, 2010). Nas CV, foram identificadas quartzo (SiO_2), cal (CaO), maghemite ($Fe^{3+}2O_3$) e mulite, corroborando com a caracterização mineralógica reportada por outros autores (Cho et al., 2017) (Rashad and Zeedan, 2011).

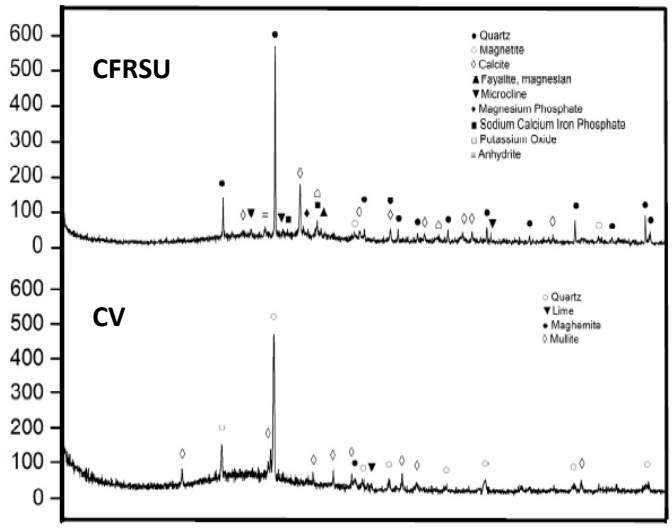


Figura 2 - Difracção de raios X (DRX) das amostras de CFRSU e CV

O teste de potencial de hidrogénio foi realizado utilizando um medidor de pH digital da HACH. O procedimento para a determinação do pH baseou-se na norma ASTM D4972 (2019). As CFRSU e as CV apresentaram valores de 9,50 e 10,70, respectivamente, o que indica a natureza alcalina de ambos os precursores. Valores elevados de pH são fundamentais no processo de activação alcalina.

A quantificação do hidrogénio libertado pela reacção química do alumínio metálico presente nas CFRSU foi calculada com base nas quantidades estequiométricas. A partir desses cálculos, determinou-

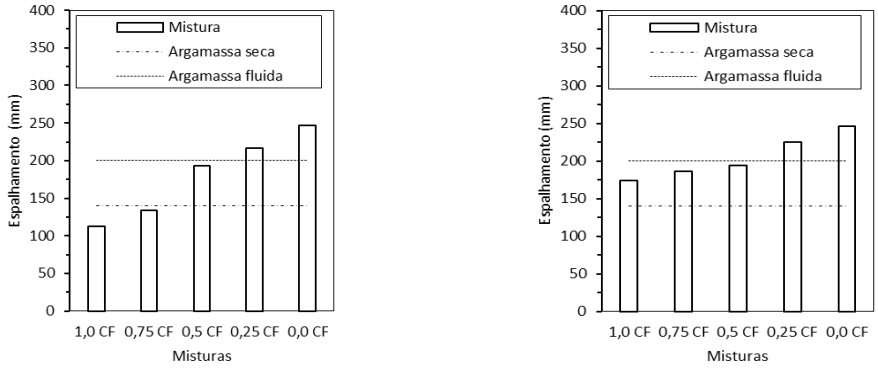
se que são produzidos 0,11 g de H_2 por cada grama de alumínio consumido. (Equação 1A).

$$2Al^0 + 2NaOH + 6H_2O \rightarrow 2NaAl(OH)_4 + 3\,H_2\uparrow \qquad \text{Eq. 1A}$$

A seguir, realizou-se um teste com 10 g de CFRSU e 800 ml de uma solução de NaOH 2,5 M para quantificar o volume de hidrogénio produzido. O volume deslocado pelo hidrogénio resultou numa média de 63,33 ml com desvio padrão de 1,15 ml. Utilizando a densidade do hidrogénio a 43 °C e 1 atm de pressão (0,0766 kg/m³), calculou-se a quantidade de hidrogénio presente em 63,33 ml, resultando em 4,85 mg de H_2. Com base nestes dados, determinou-se a quantidade de alumínio metálico necessário para produzir 4,85 mg de hidrogénio, resultando em 0,04365 g de Al. Em resumo, os cálculos indicam que 10 gramas de CFRSU contêm aproximadamente 43,65 mg de alumínio metálico. Este alumínio, quando está em contacto com uma solução de NaOH em excesso, é capaz de produzir cerca de 6,3 litros de H_2 por quilograma de CFRSU.

3.2 PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO

A fluidez das misturas foi avaliada com base na consistência através do ensaio da mesa de fluidez descrito na norma EN 1015-3 (1998). Os valores de fluidez determinados para as misturas no estado fresco com OAA e CAA são apresentados na Figura 3a e Figura 3b, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos, foi encontrada um aumento de 54% nos valores de fluidez para a mistura 1,0 CF com CAA quando comparada com a mesma mistura com OAA. Da mesma forma, para a mistura 0,75 CF, foi observado um aumento de 39%, enquanto para a mistura 0,25 CF esse aumento foi de 4%. A concepção com CAA propiciou que todas as misturas estivessem num estado plástico e fluido, ao contrário do que foi obtido com OAA. É evidente em ambas as figuras que o factor com maior influência na fluidez é o teor de CV. À medida que este teor aumentou, a fluidez da mistura também aumentou.



(a) (b)

Figura 3 - Valores de fluidez de: (a) misturas com OAA e (b) misturas com CAA

Os resultados apresentados neste estudo estão de acordo com outros autores. Entre eles, Das et al. (2020) determinaram o espalhamento de misturas de betão activado alcalinamente usando CV tipo F como precursor, incorporando baixas quantidades de cal e sílica como substituição das cinzas volantes, e tendo como activadores alcalinos NaOH e Na_2SiO_3. O estudo citado mostrou uma diminuição no espalhamento quando a proporção de substituição das CV aumentou (cerca de 60 mm para 5% de substituição de cinzas volantes e 15 mm para 10% de substituição). Outros autores, como Kuri et al. (2021), concluíram que, ao aumentar a quantidade de ferro níquel de magnésio juntamente com a diminuição da quantidade de CV tipo F em pastas activadas alcalinamente, a fluidez diminuiu. De facto, o elevada espalhamento conferido pelas CV pode ser atribuída à morfologia esférica das suas partículas, que actua na redução da viscosidade do material fresco através da diminuição do atrito entre partículas (Provis et al., 2010).

A Figura 4a e a Figura 4b mostram a densidade no estado fresco e no estado endurecido a 28 dias das misturas feitas OAA e CAA, respectivamente. Para as misturas com OAA (Figura 5a), a densidade no estado fresco apresentou valores entre 1,90 e 2,27 g/cm^3, com um valor médio de 2,09 g/cm^3. Por sua vez, para as misturas com activador alcalino constante (Figura 5b), a densidade das argamassas no estado fresco aumentou à medida que o teor de CFRSU diminuiu, comportamento semelhante ao apresentado no estado endurecido.

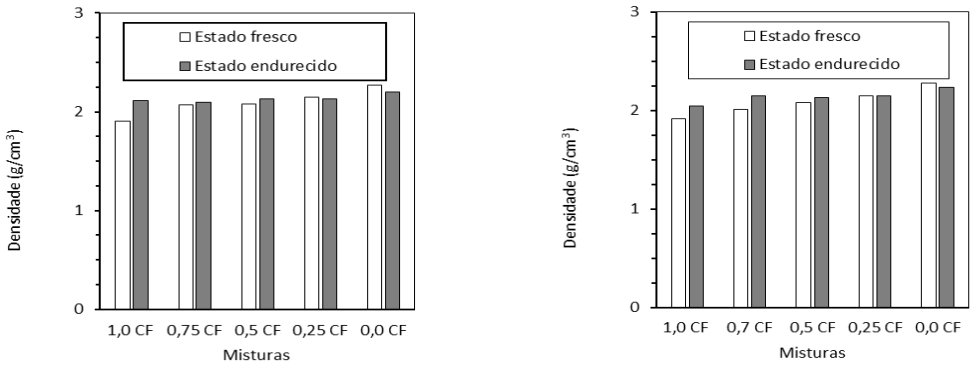


Figura 4 - Densidades no estado fresco e endurecido de: (a) misturas com OAA e (b) misturas com CAA

As misturas com teores mais elevados de CV, ao apresentarem maiores densidades no estado endurecido, provavelmente também terão melhores propriedades mecânicas, por serem mais compactas. Por outro lado, as misturas com teores mais elevados de CFRSU tendem a apresentar densidades mais baixas, o que pode ser atribuído ao alumínio residual que, ao entrar em contacto com Na_2SiO_3, liberta gás H_2, levando à formação de bolhas na argamassa (Eliche-Quesada et al., 2020).

3.3 PROPRIEDADES EM ESTADO ENDURECIDO

A Figura 5 apresenta os resultados da resistência à compressão a 7, 28, 91 e 182 dias para as formulações OAA e CAA. A maior resistência à compressão a 28 dias foi alcançada pela mistura com 100% de CV: 61 MPa e 38,63 MPa para OAA e CAA, respectivamente, enquanto os valores mínimos foram observados na mistura com 100% de CFRSU: 5,36 MPa e 5,72 MPa para OAA e CAA, respectivamente. As misturas com 50/50 de CFRSU/CV apresentaram valores de resistência à compressão a 28 dias e 182 dias de 19,8 MPa e 25,2 MPa, respectivamente. Houve um aumento marginal na resistência para as misturas OAA contendo 25% de CV em comparação com aquelas sem (cerca de 100% de aumento após 28 dias).

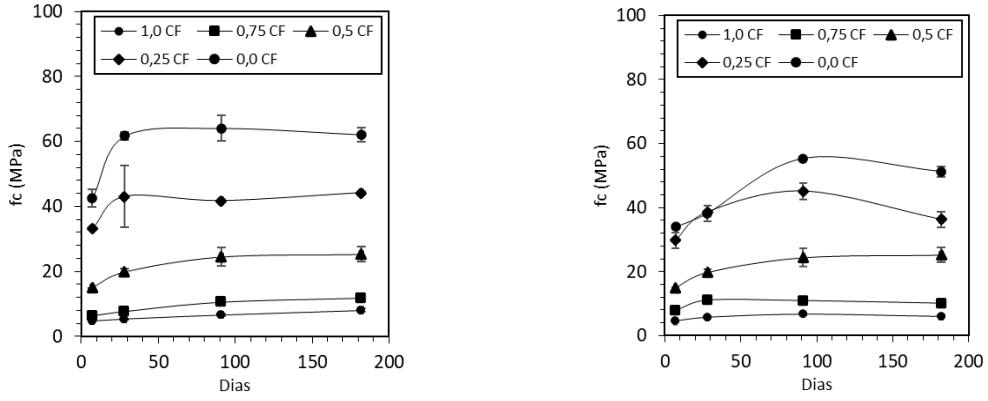


Figura 5 - Resistência à compressão de: (a) argamassas OAA e (b) argamassas CAA

Para períodos de cura mais prolongados, a tendência de maior e menor resistência à compressão em relação ao teor de CV foi mantida, indicando um desenvolvimento da resistência com o aumento deste precursor, isto sugere que as propriedades de durabilidade do material melhoram significativamente com um maior teor de CV, enquanto o uso de CFRSU reduz significativamente a resistência e, consequentemente, a durabilidade A interacção dos produtos de reacção no processo de activação das CV tipo F, caracterizada por alto teor de Al e Si amorfo e baixo teor de Ca, é discutida como um gel alcalinamente activado monolítico, cuja compreensão completa ainda não foi alcançada (Provis and Van Deventer, 2013). Por outro lado, as CFRSU, similarmente a um precursor com alto teor de Ca, geram predominantemente o gel C-A-S-H, cuja estrutura está intimamente ligada ao tipo de activador utilizado. A formação do gel em misturas combinadas de CV e precursores similares à CFRSU depende dos mecanismos de reacção, os quais serão explorados em estudos futuros.

A resistência à compressão também foi avaliada em argamassas carbonatadas preparadas com CAA. Após uma cura selada de 28 dias, os provetes prismáticos foram submetidos à carbonatação numa câmara com 5% de CO_2 por 7, 14 e 28 dias, com a resistência à compressão medida 35, 49 e 77 dias após a produção. A Figura 6 revela que a resistência à compressão das argamassas carbonatadas foi significativamente superior à das não carbonatadas. Por exemplo, após 28 dias de carbonatação, a mistura 1,0 CF alcançou uma resistência à compressão de 19,12 MPa, representando um aumento de aproximadamente 240% em relação ao valor máximo observado para a mistura não carbonatada (8.08 MPa). Similarmente, a mistura 0,5 CF mostrou um aumento de cerca de 40% após 28 dias de carbonatação em comparação com a mistura não carbonatada. Além disso, a mistura 0,0 CF registou um aumento de 30% na resistência à compressão após o mesmo período de carbonatação.

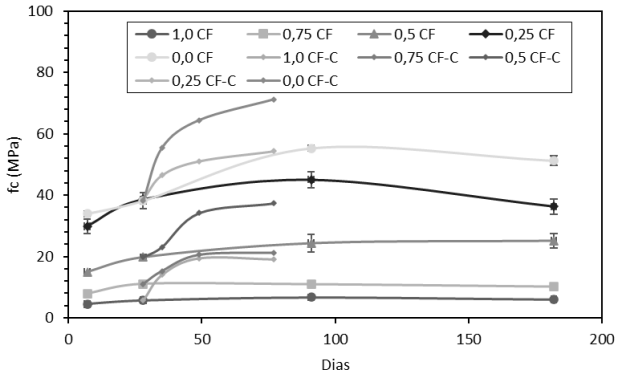


Figura 6 - Variação nos valores de resistência à compressão entre argamassas não carbonatadas e carbonatadas com design CAA

Os resultados indicam que o aumento relativo mais significativo na resistência à compressão devido à carbonatação ocorre em misturas com maiores proporções de CFRSU, um precursor com teor relativamente elevado de cálcio. Esse comportamento está associado à formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) nos poros capilares da matriz de MAA, promovendo a sua densificação, coesão e, consequentemente, resistência (Casanova et al., 2021). Em misturas com 100% de CV, classificadas como tipo F, a formação de $CaCO_3$ ocorre de maneira limitada devido à menor presença de fases contendo Ca. No entanto, observou-se um aumento notável na resistência, sugerindo a existência de outro mecanismo de acréscimo, possivelmente relacionado à carbonatação de iões Na^+, formando carbonatos de sódio, além de uma maior polimerização dos géis de sílica provenientes das fases N-A-S-H.

A Figura 7 mostra os resultados da resistência à flexão a 7, 28, 91 e 182 dias para as misturas feitas com OAA e CAA. Como verificado na resistência à compressão, as máximas resistências à flexão foram obtidas para a mistura com 100% CV e os valores mínimos para a mistura com 100% de CFRSU, uma

tendência que se mantém para tempos de cura mais longos. Ao misturar os dois materiais para obter um MAA, a estrutura das CV pode funcionar como uma rede que prende partículas de CFRSU com baixa reactividade. Isso significa que as CFRSU não deterioram completamente a resistência à flexão do novo material, mas a reduzem proporcionalmente ao rácio de incorporação.

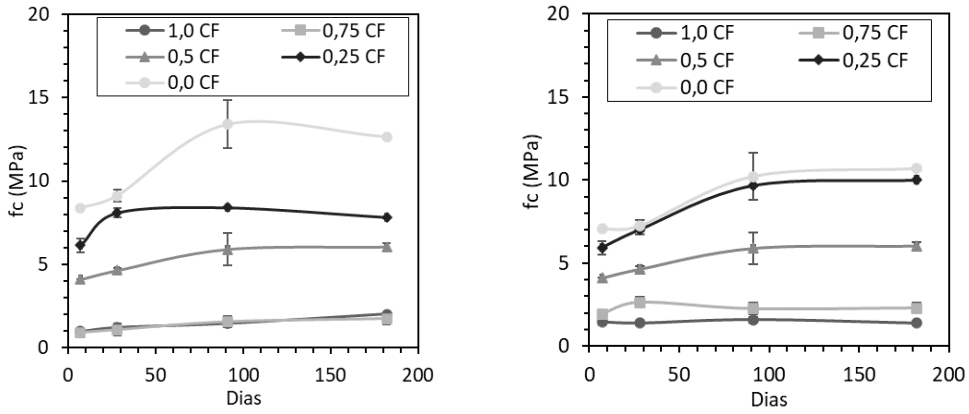


Figura 7 - Resistência à flexão de: (a) argamassas OAA e (b) argamassas CAA

Na Figura 8, observa-se os resultados do módulo de elasticidade dinâmico a 7, 28, 91 e 182 dias para as argamassas feitas com OAA e CAA. O máximo módulo de elasticidade dinâmico obtido para cada design de activador alcalino aos 28 dias corresponde à mistura com 100% de CV: 28,1 GPa e 24,9 GPa para OAA e CAA, respectivamente. Os valores mínimos correspondem à mistura com 75% de CFRSU (ou seja, 4,96 GPa) para OAA e 100% de CFRSU (ou seja, 4,44 GPa) para CAA. Para tempos de cura mais longos, a tendência mantém-se em relação às misturas com o módulo dinâmico de elasticidade mais alto e mais baixo.

O módulo dinâmico de elasticidade apresentou valores mais altos com OAA quando o teor de CV era superior a 50%, mas se a substituição fosse inferior a este valor, os resultados eram melhores com CAA. Para ambos os grupos, o módulo dinâmico de elasticidade aumentou com o aumento do teor de CV na mistura, especialmente ao passar de 25% para 50% de CV (cerca de 62% de aumento).

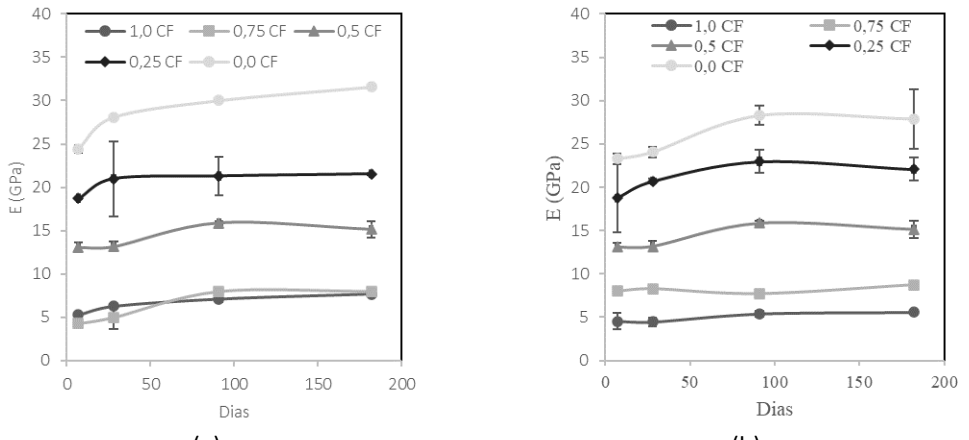


Figura 8 - Módulo dinâmico de elasticidade (a) argamassas OAA e (b) argamassas CAA

4 CONCLUSÕES

A caracterização química e mineralógica das CFRSU infere um potencial de activação, embora o elevado teor de alumínio metálico seja problemático em materiais activados alcalinamente devido à formação de hidrogénio. O pré-tratamento mostrou-se eficaz na redução da quantidade de alumínio puro disponível para reagir, permitindo assim a produção de argamassas com estabilidade dimensional adequada. Além disso, as CV melhoraram a trabalhabilidade das misturas no estado fresco, independentemente da formulação do activador, sendo que as misturas com a formulação CAA apresentaram maior fluidez devido ao menor teor de silicato de sódio.

Por outro lado, as misturas com CFRSU resultaram num material menos denso, com maior porosidade e menor resistência mecânica, especialmente em teores iguais ou superiores a 75%. No entanto, misturas com até 50% de CFRSU não apresentaram uma deterioração excessiva nas propriedades mecânicas e durabilidade. De resto, a carbonatação melhorou substancialmente as propriedades mecânicas dos MAA, especialmente naquelas com maior teor de CFRSU, devido ao seu alto teor de cálcio. Finalmente, os resultados também permitiram inferir que, com maior teor de CV, a durabilidade também melhore, permitindo que misturas com até 50% de CFRSU apresentem resultados aceitáveis nas propriedades analisadas. Uma combinação adequada de CFRSU e CV poderia resultar em materiais de construção com um bom desempenho mecânico e de durabilidade.

REFERÊNCIAS

ASTM-C618-22 (2022), Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, PA, USA.

Barati, K., Shen, X. (2016). Operational level emissions modelling of on-road construction equipment through field data analysis. Automation in Construction, 72(3):338-346. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.010

EN 1015-11 (1999), Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 14146 (2004), Natural stone test methods. Determination of the dynamic elastic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). Brussels, Belgium.

Bayuseno, A. P., Schmahl, W. W. (2010). Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash. *Waste Management,* 30**,** 1509-1520.

Benitez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J.E., Huerta-Guevara, O.F., García-León, A.M., Rueda-Avellaneda, J.F. (2021) Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context. Journal of the Air & Waste Management Association, 71(11):1415-1427. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040

Carvalho, R., Silva, R., de Brito, J., Pereira, M. (2021). Alkali activation of bottom ash from municipal solid waste incineration: Optimization of NaOH-and Na 2SiO3-based activators. *Journal of cleaner production,* 291**,** 125930.

Casanova, S., Silva, R. V., de Brito, J., Pereira, M. F. C. (2021). Mortars with alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash and fine recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production,* 289**,** 125707.

Chen, B., Perumal, P., Aghabeyk, F., Adediran, A., Illikainen, M., Ye, G. (2024). Advances in using municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as precursor for alkali-activation materials: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling,* 204**,** 107516.

Cho, Y. K., Yoo, S. W., Jung, S. H., Lee, K. M. Kwon, S. J. (2017). Effect of Na_2O content, SiO_2/Na_2O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer. *Construction and Building Materials,* 145**,** 253-260.

Das, S. K., Mustakim, S. M., Adesina, A., Mishra, J., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., Kaze, C. R. (2020). Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash. *Journal of Building Engineering,* 32**,** 101780.

Drabold, D. (2009). Topics in the theory of amorphous materials. *The European Physical Journal B,* 68**,** 1-21.

Eliche-Quesada, D., Ruiz-Molina, S., Pérez-Villarejo, L., Castro, E., Sánchez-Soto, P. J. (2020). Dust filter of secondary aluminium industry as raw material of geopolymer foams. *Journal of Building Engineering***,** 101656.

EN 1015-6 (1998), European Standard, Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

Gobbo, L., Sant'Agostino, L. L., Garcez, L. (2004). C3A polymorphs related to industrial clinker alkalies content. *Cement and Concrete Research,* 34**,** 657-664.

ASTM D4972-19 (2019), Standard test methods for pH of soils. West Conshohocken, PA.

Kravchenko, E., Lazorenko, G., Jiang, X., Leng, Z. (2024). Alkali-activated materials made of construction demolition waste as precursors: A review. *Sustainable Materials and Technologies***,** e00829.

Kurda, R., Silva, R. V., de Brito, J. (2020). Incorporation of alkali-activated municipal solid waste incinerator bottom ash in mortar and concrete: A critical review. *Materials,* 13**,** 3428.

Kuri, J. C., Khan, M. N. N., Sarker, P. K. (2021). Fresh and hardened properties of geopolymer binder using ground high magnesium ferronickel slag with fly ash. *Construction and Building Materials,* 272**,** 121877.

LNEC- E391 (1993), Concrete: Determination of carbonation resistance, (in Portuguese), National Laboratory in Civil Engineering (LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil) Lisbon, Portugal.

Lu, J., Yang, X., Lai, Y., Wan, X., Gao, J., Wang, Y., Tan, L., Deng, F. (2024). Utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) in concrete as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials,* 414**,** 134918.

Ludwig, H.-M., Zhang, W. (2015). Research review of cement clinker chemistry. *Cement and Concrete Research,* 78**,** 24-37.

Lynn, C. J., Dhir, R. K., Ghataora, G. S. (2017). Municipal incinerated bottom ash use as a cement component in concrete. *Magazine of Concrete Research,* 69**,** 512-525.

Provis, J. L., Duxson, P., Van Deventer, J. S. (2010). The role of particle technology in developing sustainable construction materials. *Advanced Powder Technology,* 21**,** 2-7.

Provis, J. L., Van Deventer, J. S. (2013). *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*, Springer Science & Business Media.

Rashad, A. M., Zeedan, S. R. (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construction and Building Materials,* 25**,** 3098-3107.

Shi, C. (2001). An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans. *Canadian Journal of Civil Engineering,* 28**,** 778-786.

Silva, A., Dias, J.L., Gaspar, P.L., de Brito, J. (2013a). Statistical models applied to service life prediction of rendered façades. Automation in Construction, 30:151–160. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.028

Silva, A., Gaspar, P.L., de Brito, J. (2013b). Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding directly adhered to the substrate. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2):227–235. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000588

Silva, A., Neves, R., de Brito, J. (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 50:73–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001

Snellings, R., Suraneni, P., Skibsted, J. (2023). Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research,* 171**,** 107199.

UNE 1015-3 (1998), Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). AENOR Madrid;.

Walkley, B., San Nicolas, R., Sani, M.-A., Rees, G. J., Hanna, J. V., Van Deventer, J. S., Provis, J. L. (2016). Phase evolution of C-(N)-ASH/NASH gel blends investigated via alkali-activation of synthetic calcium aluminosilicate precursors. *Cement and Concrete Research,* 89**,** 120-135.

Wei, Y., Saffarzadeh, A., Shimaoka, T., Zhao, C., Peng, X., Gao, J. (2014). Geoenvironmental weathering/deterioration of landfilled MSWI-BA glass. *Journal of Hazardous Materials,* 278**,** 610-619.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DAS COMPRAS PÚBLICAS ECOLÓGICAS APLICÁVEIS À CONSTRUÇÃO EM PORTUGAL

Yanh Ribeiro[a]; Jorge Teixeira[a]; Joaquim Moreira[a]; Hipólito Sousa[b]

[a] ICS / CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, yribeiro@fe.up.pt; jalt@fe.up.pt; jjm@fe.up.pt

[b] CONSTRUCT-GEQUALTEC - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Ed. G, 4200-465 Porto, Portugal, hipolito@fe.up.pt

RESUMO

A recente definição, em legislação nacional (Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023, de 25 de outubro), dos critérios subjacentes às Compras Públicas Ecológicas avança a Estratégia Nacional para as Compras Públicas Ecológicas 2030 (ECO360) em direção ao aumento da sustentabilidade da Administração Pública através da aquisição de produtos, serviços e obras com menor impacte ambiental.

No entanto, existe ainda um longo caminho a percorrer com vista à adoção massificada das Compras Pública Ecológica (CPE) em Portugal, nomeadamente na área da construção. Apesar dos esforços a nível europeu na criação de guias de aplicação e das metas ambiciosas da ECO360 onde até 2025, 50% das entidades da Administração Pública e do setor empresarial do Estado devem adotar critérios ambientais, a correta aplicação desta nova regulamentação carece ainda de uma maior discussão e análises de seus reais reflexos no setor.

O objetivo deste trabalho é caracterizar a adequação dos critérios ecológicos da Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023 ao setor da construção, através de uma análise sistemática. Esta análise visa evidenciar a natureza dos critérios, os momentos de aplicabilidade, os intervenientes e a clareza das definições, permitindo identificar oportunidades para uma melhor operacionalização das CPE.

Como resultados, identificaram-se a aplicabilidade e adequabilidade dos diferentes tipos de critérios ecológicos, assim como os impactes das escolhas dos intervenientes nas etapas relacionadas com a contratação de obras públicas.

Desta forma, espera-se facilitar a implementação generalizada das CPE para empreitadas, conduzindo ao aumento da sustentabilidade das obras da Administração Pública.

Palavras-chave: Construção, Sustentabilidade, Contratação Pública Ecológica, Critérios ecológicos.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As entidades públicas destacam-se entre os grandes consumidores a nível europeu, empregando, todos os anos, o equivalente a 19% do Produto Interno Bruto da União Europeia na compra de bens e serviços (Resolução da Assembleia da República n.º 152/2016, 2016), desde compras de equipamento de escritório até aos contratos das grandes empreitadas de infraestruturas. Com este poder de compra e consequente impacto, o setor público é capaz de moldar tendências de produção e consumo de determinados setores da economia, a assim incentivar os mercados a seguir por uma direção mais alinhada com as intenções governamentais (Orfanidou et al., 2023).

Sob essa perspetiva, surgiram, ao longo dos anos, iniciativas com o intuito de impulsionar a contratação pública numa direção "mais ecológica" (Commission of the european communities, 2008). O *Green Public Procurement* é uma das iniciativas vigentes neste contexto.

Entende-se por *Green Public Procurement* (GPP) ou Compras Públicas Ecológicas (CPE) as aquisições de bens e serviços associados a especificações e requisitos técnicos ambientais. O objetivo das CPE é a promoção da eficiência na utilização de recursos e a minimização de impactes ambientais, estimulando a oferta no mercado de bens e serviços, bem como a realização de projetos de execução de obras públicas com um impacte ambiental reduzido em todo o seu ciclo de vida (Resolução da Assembleia da República n.º 152/2016, 2016).

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 13/2023 – Estratégia Nacional para as Compras Públicas Ecológicas – ECO360 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 13/2023, 2023) é a legislação que estabelece a estratégia de compras públicas ecológicas em Portugal. Nela destacam-se pontos como a importância da definição de critérios essenciais e complementares, a necessidade de disseminação de conhecimento e resultados, e a definição de metas e compromissos para a implementação das CPE, com marcos em 2025 e 2030, rumo à adoção obrigatória e generalizada pela Administração Pública de muitos dos critérios.

Na sequência da ECO360, foi publicada em outubro de 2023 a Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023 (Presidência do Conselho de Ministros 2023b) que, sumariamente, estabelece os critérios ecológicos aplicáveis aos contratos públicos. Nesta resolução definem-se os requisitos obrigatórios, voluntários, recomendáveis e eventuais para a aquisição de bens e serviços nos setores prioritários. A construção civil enquadra-se nesses setores, tendo os contratos de empreitadas de obras públicas uma secção própria, que será o alvo da análise deste artigo.

1.2 JUSTIFICATIVA

As compras públicas ecológicas têm sido incentivadas por governos nas últimas décadas com o objetivo de garantir que regulamentações e orientações em termos ambientais sejam tidas em conta no momento do concurso e contratação de serviços públicos (Montalbán-Domingo et al., 2023).

Orfanidou et al. (2023) indicam que, embora à primeira vista as compras ecológicas não sejam economicamente viáveis, ao considerar-se apenas a aquisição do produto ou serviço, uma segunda leitura considerando os custos totais indiretos, ou seja, uma avaliação baseada no custo do ciclo de vida, revela que estas acabam por ser uma escolha mais económica. Este resultado sugere que a avaliação baseada apenas no preço de compra não reflete completamente os custos do ciclo de vida do produto. Esse resultado corrobora o estudo de 2008 intitulado "Collection of Statistical Information

on Green Public Procurement in the EU", que indica que geralmente as CPE não aumentam os custos, podendo inclusive a ajudar a reduzir os custos globais (Porro, 2023).

Além disso, há o estímulo à concorrência e aos avanços tecnológicos, benefícios adicionais difíceis de quantificar, podendo ser considerados como fatores de melhoria das práticas de contratação, com impactos positivos óbvios para a sociedade em geral (Orfanidou et al., 2023). Uma utilização mais sustentável dos recursos naturais e das matérias-primas beneficiaria o ambiente, bem como a economia em geral, criando oportunidades para as economias "verdes" emergentes.

Apesar dos benefícios, existem claros desafios para a plena aplicação das CPE. Os principais obstáculos podem ser classificados em três categorias: Barreiras Económicas, Políticas e Cognitivas (Porro 2023). A barreira económica resulta da perceção de custo mais elevado dos produtos ecológicos. Esta barreira tende a ser ultrapassada, quer através dos próprios resultados dos contratos realizados, quer através de formações para as equipas responsáveis pelos concursos relacionado ao custo do ciclo de vida. A barreira política está relacionada a falta de apoio e de cooperação entre autoridades. Para isso, a cooperação e o intercâmbio coordenado entre os intervenientes devem ser estimulados, já que as questões enfrentadas tendem a ser comuns todos. Por fim, a barreira cognitiva inclui a falta de ferramentas operacionais e/ou informação e a falta de formação.

Os critérios ambientais vêm para auxiliar a superar a principalmente a barreira cognitiva, fornecendo informações objetivas sobre como cumprir os requisitos ambientais necessários. Estes critérios podem ser incluídos no processo de contratação como critérios de seleção, de adjudicação e/ou especificações técnicas e cláusulas de execução do contrato (European Commission, 2016). Os critérios de seleção estabelecem disposições de inclusão e exclusão justificadas, geralmente, para filtrar os participantes no concurso. Os critérios de adjudicação reúnem os critérios que serão considerados na escolha da melhor proposta, e as especificações técnicas e cláusulas de execução do contrato definem os requisitos estabelecidos pelo adquirente para aceitar o produto ou serviço (Montalbán-Domingo et al., 2019).

A análise detalhada de concursos públicos de empreitadas, entretanto, revela inconsistências no uso dos critérios de CPE. A nível internacional, por exemplo, Montalbán-Domingo et al. (2023) examinaram documentos de um total de 343 concursos de 11 diferentes países que já adotam as compras ecológicas. O estudo mostrou que, apesar de 90% dos concursos assinalados como CPE já incluírem critérios ambientais, em 34% foram considerados como critérios de seleção e apenas 21% como critérios de adjudicação.

O cenário nacional é semelhante ao internacional: Jacques De Sousa, Poças Martins, e Sanhudo (2024) analisaram 298 contratos públicos de construção assinalados como CPE onde aproximadamente 51% dos projetos adotou apenas o critério de preço como critério de adjudicação. O critério de avaliação multifatorial foi utilizado em 31% dos contratos, e mesmo nestes nem sempre é clara a forma de avaliação dos critérios ambientais, estando subentendidos na avaliação da qualidade.

Portanto, sendo o principal objetivo da Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023 estabelecer os critérios ecológicos aplicáveis aos contratos públicos, esta deve ser analisada a fim de verificar a adequação aos problemas apresentados.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar a adequação dos critérios ecológicos descritos na Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023 ao setor da Construção através de uma análise sistemática. Para tal, esses critérios ecológicos foram analisados de forma a evidenciar a sua natureza

(obrigatório, recomendável, eventual, etc.), momentos de aplicabilidade, intervenientes (ex. Dono de Obra, Projetistas, Empreiteiros), e clareza da definição.

Combinada com uma revisão bibliográfica, esta análise permite identificar oportunidades para uma melhor operacionalização das CPE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPRAS PÚBLICAS ECOLÓGICAS E LEGISLAÇÃO NACIONAL

Sustentabilidade é um conceito bastante abrangente, incluindo dimensões que vão além do ambiental, como a sustentabilidade social e económica, que são essenciais para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável (Comissão Europeia & Direção-Geral do Mercado Interno, 2021). A Estratégia Nacional de Compras Públicas Ecológicas 2030 (ECO360) apresenta o compromisso do Estado com a sustentabilidade ambiental, através da transformação das práticas de compras do setor público, a partir da promoção da aquisição de produtos e serviços que tenham menor impacto ambiental e que atendam a critérios de sustentabilidade (Resolução do Conselho de Ministros n.º 13/2023, 2023).

Um dos pontos-chave da ECO360 é a necessidade de estabelecer mecanismos legais específicos para garantir a eficácia da estratégia. Isso reflete a importância de uma abordagem regulatória para incentivar e exigir práticas sustentáveis nas compras públicas. A ECO360 enfatiza a importância de priorizar produtos com materiais de base biológica e selos ecológicos certificados, não só para reduzir o impacto ambiental das compras governamentais, mas também para estimular a oferta de produtos ecológicos no mercado, promovendo a inovação e o desenvolvimento sustentável.

A capacitação e profissionalização dos compradores públicos são também destacadas na ECO360, através da disseminação de conhecimentos e melhores práticas enquadradas na formação sobre sustentabilidade. A monitorização e avaliação do impacto da estratégia estão previstos na ECO360, permitindo que o governo faça ajustes conforme necessário, e demonstrando um compromisso com a transparência, destacando a importância do papel do portal Base na coleta e disseminação de informações sobre CPE.

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023, de 19 de outubro, estabelece critérios ecológicos para a celebração de contratos por parte das entidades da administração direta e indireta do Estado em Portugal. Os critérios obrigatórios são definidos como aqueles que as entidades estão compelidas a considerar, exceto quando há uma restrição significativa da concorrência. Os critérios recomendáveis podem ser dispensados apenas em casos especialmente fundamentados. Os critérios voluntários e eventuais são de utilização opcional (Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023, 2023).

2.2 CONTRATAÇÃO PÚBLICA ECOLÓGICA NA CONSTRUÇÃO

O n.º 16 da parte B do Anexo da Resolução do Conselho de Ministros n.º 132/2023 delineia critérios específicos a serem aplicados em empreitadas de obras públicas, com vista a minimizar o impacto ambiental e promover a eficiência energética.

Quanto aos critérios de qualificação e de adjudicação, é recomendado que os candidatos demonstrem possuir certificação ambiental, tais como a ISO 14001 e/ou EMAS (Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria), para atividades relacionadas com o objeto do contrato, para sua qualificação e, é

recomendável adotar um critério de adjudicação multifatorial, visando avaliar diversos aspetos da proposta além do preço.

Como fatores e subfatores do critério de adjudicação, são introduzidos critérios para a utilização de materiais neutros em carbono, materiais reutilizados ou reciclados, e sistemas de base natural, como "green roofs" ou "living roof", com diferentes níveis de obrigatoriedade ou recomendação.

Por fim, são apresentados os aspetos da Execução do Contrato e Especificações Técnicas. As especificações gerais abordam questões como autossuficiência energética, gestão eficiente dos recursos hídricos, utilização de materiais de construção com baixo impacto ambiental, medidas de economia circular e eficiência energética dos edifícios.

2.3 PROCEDIMENTOS DE CONTRATAÇÃO PÚBLICA

2.3.1 Cadernos de Encargos

O caderno de encargos é a peça do procedimento que contém as cláusulas a incluir no contrato a celebrar (Decreto-Lei n.º 18/2008, 2008). Essas cláusulas referem-se aos aspetos de execução do contrato submetidos à concorrência – aqueles que são objeto de avaliação de acordo com o critério de adjudicação – e aos aspetos da execução do contrato não submetidos à concorrência – os demais, que, sendo apreciados, não são objeto de avaliação e classificação. As cláusulas podem fixar parâmetros referentes a quaisquer aspetos da execução do contrato, tais como o preço a pagar ou a receber pela entidade adjudicante, a sua revisão, o prazo de execução das prestações objeto do contrato ou as suas características técnicas ou funcionais, bem como às condições da modificação do contrato.

No procedimento de formação de contratos de empreitada de obras públicas, o caderno de encargos deve incluir um projeto de execução, cujo conteúdo obrigatório é fixado pela Portaria n.º 255/2023 (Portaria n.º 255/2023, 2023). A mesma portaria define três cadernos de encargos distintos, cujo enquadramento nos procedimentos de contratação pública está ilustrado na Figura 1:

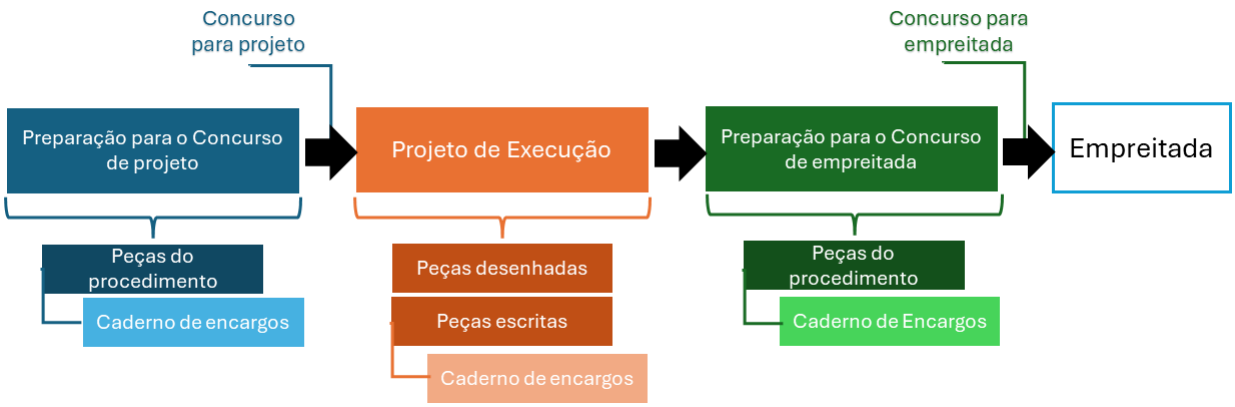


Figura 1 – Diferentes cadernos de encargos na contratação de empreitadas de obras públicas

- **Caderno de encargos do procedimento de contratação do projeto:** documento da responsabilidade do dono da obra, que contém as cláusulas do contrato a celebrar, para instruir o procedimento de contratação do projeto de empreitada de obra pública a realizar.
- **Caderno de encargos do projeto de execução:** documento a elaborar e da responsabilidade do(s) autor(es) de projeto que inclui as condições técnicas gerais e especiais da empreitada a realizar.

- **Caderno de encargos do procedimento de contratação de empreitada:** documento a elaborar e de responsabilidade do dono da obra, que contém as cláusulas do contrato a celebrar, para instruir o procedimento de contratação de empreitada de obra pública a realizar.

2.3.2 Critérios de Adjudicação

Os critérios de adjudicação orientam a seleção do concorrente mais adequado para a execução do contrato. A adjudicação pode ser feita através de dois métodos: multifator, que considera diversos aspetos da execução do contrato, e monofator, considerando apenas o preço (Decreto-Lei n.º 18/2008, 2008).

No método multifator, é necessário um modelo de avaliação das propostas que considere fatores como qualidade, organização e sustentabilidade. Os subfatores são elementos específicos que complementam os fatores principais no processo de avaliação das propostas.

O cálculo dos custos do ciclo de vida também pode ser considerado no modelo de avaliação das propostas, abrangendo diferentes custos associados ao objeto do contrato ao longo da sua vida útil, inclusive os custos relacionados com externalidades ambientais, como emissões de gases com efeito de estufa. A metodologia para o cálculo dos custos do ciclo de vida deve ser claramente definida no caderno de encargos ou no programa do procedimento.

2.3.3 Especificações Técnicas

Entende-se por "Especificação técnica" no contexto de contratos de obras públicas um conjunto abrangente de prescrições técnicas que definem as características dos materiais ou produtos que correspondam à utilização destinada. Estas características abrangem, por exemplo, regras de conceção, dimensões, cálculo de custos, avaliações de conformidade, desempenho, segurança, e níveis de desempenho ambiental. Essas especificações podem abranger não apenas as características físicas, mas também o processo ou método específico de produção ou execução relacionado.

As especificações técnicas devem ser elaboradas considerando as regras técnicas nacionais vinculativas, desde que sejam compatíveis com o direito da União Europeia. Existem três modalidades principais para a formulação destas especificações: a) em termos de desempenho ou requisitos funcionais, que podem abranger critérios ambientais; b) por referência a normas e homologações técnicas europeias, internacionais ou nacionais; c) baseadas no desempenho ou requisitos funcionais a que se refere em a), com referência às especificações técnicas mencionadas em b) como meio de presunção de conformidade com os critérios estabelecidos.

3 METODOLOGIA

Este estudo fundamenta uma análise crítica dos critérios ecológicos tendo em conta a natureza dos mesmos, os intervenientes, e a aplicabilidade aos dois momentos da contratação, para identificar omissões, inconsistências face ao enquadramento legislativo da contratação pública, e potenciais dificuldades de implementação no contexto das práticas correntes do setor da construção em Portugal.

Através da revisão bibliográfica foi identificada a legislação relevante em termos da estratégia para aplicação das CPE em Portugal e, especificamente, quais os critérios ecológicos previstos aplicáveis à construção.

Em seguida, esses critérios foram analisados à luz da legislação de contratação pública em Portugal, que privilegia a tipologia design-bid-build, em que existem duas contratações: para elaboração do projeto e para a execução da empreitada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS

Para organizar a análise, o processo de contratação de um projeto de construção de uma obra pública foi dividido em três etapas: a contratação da entidade responsável pela elaboração do projeto de execução, a elaboração do próprio projeto de execução, e a contratação da empreitada.

Cada uma destas etapas deve resultar em especificações e critérios correspondentes no seu respetivo Caderno de Encargos, doravante designados como CE1 para o concurso de projeto, CE2 para o caderno de encargos do projeto e CE3 para o concurso de empreitada.

Os resultados da análise da aplicabilidade e adequabilidade dos diferentes tipos de critérios apresentam-se no Quadro 1 para os critérios de qualificação, no Quadro 2 para os critérios de adjudicação, e no Quadro 3 para os fatores/subfactores dos critérios de adjudicação. Cada quadro é seguido da respetiva discussão, e os aspetos da execução do contrato e das especificações técnicas são discutidos no final.

Quadro 1 – Critérios de qualificação

Tipo	Natureza	CE1	CE2	CE3
O candidato deve demonstrar possuir certificação ISO 14001 e/ou EMAS (certificação ambiental) para atividade relacionada com o objeto do contrato a celebrar, ou equivalente.	Recomendável	○[(A)]	-	●
[(A)] As certificações para o projeto de execução deveriam ser mais relacionadas a acreditações de profissionais em certificações ambientais (ex.: BREEAM, LEED, WELL, etc.).				

As empresas de construção, dada a natureza da atividade que exercem, têm nas certificações ambientais como a ISO 14001, EMAS e outras, um comprovativo de que os seus processos são devidamente alinhados com as normas em questão.

No contexto da contratação do projeto de execução, o critério de qualificação mais apropriado deveria ser a acreditação desses profissionais, evidenciando a sua competência na elaboração de projetos sustentáveis, por exemplo, através de certificações ambientais específicas para projetos de construção, como BREEAM, LEED ou WELL. Contudo, a relevância e mesmo a necessidade destas certificações deve ser revista para diferentes obras públicas, conforme o tipo de intervenção, tipo de empreendimento, e dimensão/complexidade.

Quadro 2 – Critérios de adjudicação

Tipo	Natureza	CE1	CE2	CE3
Multifator	Recomendável[(B)]	●	-	●
[(B)] O critério multifator deveria ser Obrigatório.				

A classificação do critério de adjudicação multifator como "Recomendável" levanta questões sobre a sua aplicação prática. A entidade apenas fica dispensada de utilizar um critério Recomendável em

casos especialmente fundamentados, contudo, as justificações válidas para essa dispensa não estão claramente definidas, o que pode abrir espaço para a não aplicação do critério multifator e assim adotar o critério monofator (preço), descaracterizando a compra pública ecológica.

Quadro 3 – Fatores/subfatores do critério de adjudicação

Tipo	Natureza	CE1	CE2	CE3
Atribuição de uma percentagem de ponderação ao fator utilização de betão neutro em carbono.	Eventual	o[(C)]	o[(D)]	●
Atribuição de uma percentagem mínima de ponderação ao fator utilização de aço neutro em carbono.	Eventual	o[(C)]	o[(D)]	●
Atribuição de uma percentagem mínima de ponderação ao fator utilização de materiais reutilizado ou reciclados.	Obrigatório	o[(C)]	o[(D)]	●
Atribuição de uma percentagem mínima de ponderação ao fator utilização de sistemas de base natural, como os «green roofs» ou «living roof»	Eventual	o[(C)]	●[(E)]	-[(F)]
[(C)] Não é prático diferenciar concorrentes à elaboração do projeto pela eventual especificação ou não de um material ou sistema.				
[(D)] A especificação de materiais "ambientais" no projeto de execução implica uma limitação da diferenciação dos empreiteiros na fase de contratação de empreitada.				
[(E)] As especificações desses sistemas devem estar devidamente apresentadas no caderno de encargos do projeto de execução.				
[(F)] Os empreiteiros não podem modificar um sistema especificado pelo projetista.				

Os fatores e subfatores do critério de adjudicação não esclarecem de forma objetiva como devem ser avaliados e classificados para diferentes propostas, nem como diferenciar as propostas entre si.

No que diz respeito aos critérios de material no concurso de projeto de execução, é difícil determinar qual deveria ser a diferenciação esperada entre as propostas dos projetistas. A especificação do uso de materiais como betão neutro em carbono, aço neutro em carbono ou materiais reciclados pode ser feita por todos os projetos concorrentes, limitando assim a competitividade.

No concurso de empreitada, esses critérios de material podem eventualmente gerar diferenciação, mas isso exigiria que o caderno de encargos do projeto não especificasse esses materiais, ou especificasse apenas parcialmente, o que é contraditório ao propósito do projeto que deve especificar sem omissões nem ambiguidades todas as características, incluindo as ambientais, da obra. Por outro lado, remete para o empreiteiro a escolha da utilização de materiais "ambientais", o que pode ir contra algumas especificações do projeto, resultando na diluição das responsabilidades.

Quanto aos sistemas, a limitação no concurso de projeto permanece, ou seja, todos os concorrentes podem atender a este requisito, não havendo diferenciação. Em relação à empreitada, ao contrário da especificação de materiais, um empreiteiro não pode propor uma alteração ao projeto para adicionar ou criar uma área de cobertura "green roof" ou "living roof" num projeto já especificado, tornando este critério inaplicável como um critério de adjudicação para diferenciar propostas nesta fase.

Por último, em relação aos aspetos da execução do contrato e das especificações técnicas, sejam eles obrigatórios, recomendáveis ou eventuais, estes parecem adequados para serem incluídos nos concursos de projeto de execução (CE1). No entanto, durante a fase de projeto, estes aspetos devem

ser considerados e transformados em soluções que cumpram os requisitos, devidamente especificados no caderno de encargos do projeto (CE2), para que, posteriormente, possam ser incluídos no caderno de encargos do concurso de empreitada (CE3), já como resultado da solução adotada no projeto.

4.2 Reflexos nos principais Intervenientes e Fases do Processo de contratação

Considerando novamente as três etapas da análise anterior, os critérios são introduzidos no processo ainda na fase preliminar ou na fase de preparação para o concurso do projeto, e os reflexos desses critérios serão observados tanto no concurso de projeto quanto no projeto de execução e no concurso de empreitada.

Ao Dono de Obra, cabe a definição desses critérios e os demais trâmites comuns aos concursos, devendo apenas incluir uma forma de monitorar o cumprimento dos critérios ecológicos estabelecidos.

Para a equipa de projeto, a adesão aos critérios definidos pelo Dono de Obra é crucial para alcançar as metas ecológicas. Seja nos critérios de adjudicação ou nas especificações técnicas, o cumprimento dos requisitos impostos ao projeto deve estar alinhado com o estabelecido no concurso de projeto e, principalmente, deve ser refletido adequadamente no projeto de execução, que será determinante para o concurso de empreitada.

Para o empreiteiro, o critério de qualificação é um fator importante, exigindo que os empreiteiros interessados em concorrer a obras públicas obtenham certificações ambientais. Em relação aos critérios de adjudicação, existe uma zona cinzenta onde ainda não está claro quais os graus de liberdade dos empreiteiros em relação às escolhas de materiais ou sistemas especificados no projeto de execução. Quanto aos aspetos da execução do contrato e às especificações técnicas, deve-se simplesmente cumprir o que está especificado no projeto.

Em resumo, ilustra-se na Figura 2 que o que é definido pelo Dono de Obra nas fases preliminares tem impacto nas duas fases de concurso subsequentes: de projeto e de empreitada. Contudo, o concurso de empreitada recebe ainda mais informações relacionadas aos critérios ecológicos resultantes do projeto de execução.

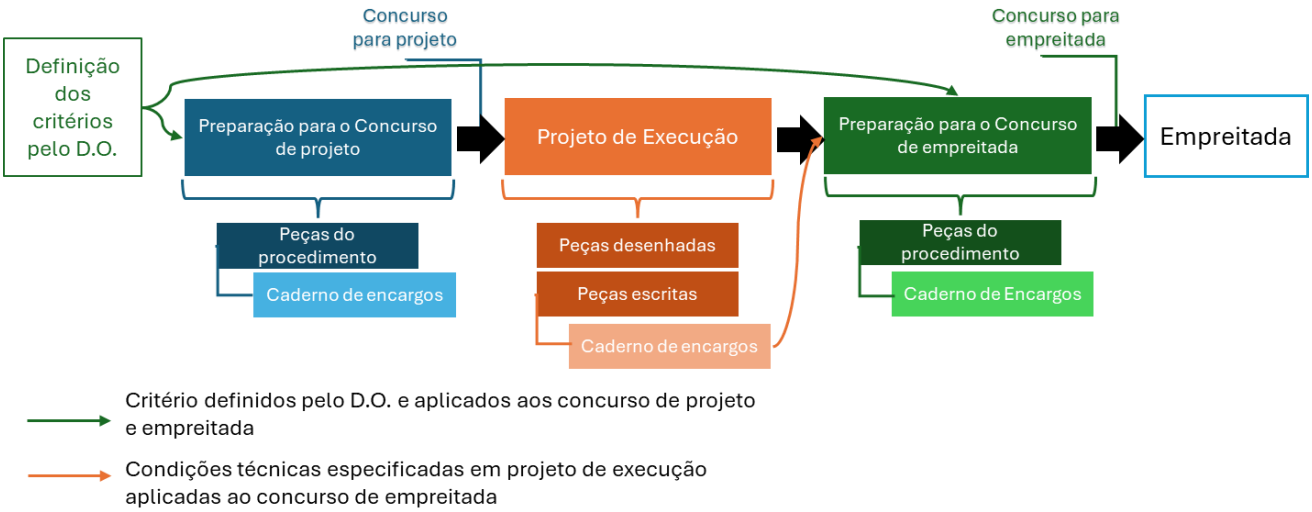


Figura 2 – Impactos dos critérios ambientais nas etapas de contração de obras públicas

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

A falta de conhecimento sobre a aplicação de critérios ambientais nos concursos públicos para projeto e construção ainda persiste (Montalbán-Domingo et al. 2023). Entretanto, a legislação recentemente em vigor avança a promoção das práticas sustentáveis nas compras públicas, ao definir critérios específicos para setores chaves como os concursos de empreitadas.

A análise realizada neste trabalho permitiu identificar oportunidades de melhoria a nível da definição objetiva dos critérios ecológicos, em virtude do faseamento típico das obras públicas em Portugal que determina uma separação entre a contratação da equipa de projeto e a contratação do empreiteiro.

Constatou-se que, para a o concurso usual de empreitadas, na fase de concurso de empreitada, os critérios ambientais tendem a estar apenas no critério de qualificação ou incluídos nas especificações técnicas e nas cláusulas de execução do contrato. Para os critérios de adjudicação ainda é necessária uma maior pormenorização sobre seu uso. A adoção dos critérios ambientais como critérios de adjudicação possibilitam que a entidade responsável leve em consideração os objetivos da política ambiental em suas atividades de contratação, enquanto as empresas de construção podem propor melhorias alinhadas com seus recursos, estratégias de gestão e consciência ambiental. Este cenário oferece às empresas uma transição de uma abordagem passiva, na qual as condições ambientais são ditadas pela entidade contratante, para uma abordagem proativa, onde a estratégia ambiental pode ser vista como uma oportunidade para garantir contratos, alcançar metas comerciais e aprimorar a imagem corporativa (Montalbán-Domingo et al., 2023). Portanto, um esforço em direção a maior disseminação do uso destes critérios deve ser prioridade das compras públicas ecológicas.

O documento “Critérios de contratação pública ecológica, no âmbito da ENCPE 2020, para Conceção, construção e gestão de edifícios de escritórios” adota um maior nível de detalhe (associado a um âmbito mais restrito) indica um possível modelo de guiões complementares à legislação.

Constatou-se que, para a forma de contratação usual de uma empreitada pública, o concurso de empreitada deverá ter em conta critérios oriundos das etapas anteriores do processo de contratação, mas que não são necessariamente critérios que possam servir para distinguir o mérito das propostas a concurso.

Assim, como o objetivo é garantir que a obra em si é mais sustentável, os critérios devem ser melhor caracterizados para que eles possam ser considerados ainda na fase preliminar (pré-projeto) pelo Dono de Obra, e posteriormente densificados pela equipa de projeto. Quanto à intervenção do empreiteiro, ela está naturalmente limitada pelas especificações do projeto, mas poderia ser potenciada se os preços que apresenta na proposta fossem calculados com base no custo ao longo do ciclo de vida, e incluíssem aí critérios ambientais.

Como trabalho futuro, sugere-se o estudo de processos de verificação e validação (compliance checking) da utilização dos critérios ao longo do processo, a consideração da tipologia de conceção-construção (que a legislação em vigor ainda trata como excecional) e a análise de outros produtos e serviços que podem constituir partes de empreitadas de obras públicas (ex: aquisição de madeira e cortiça, mobiliário, equipamento informático, etc.).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020) da Unidade de

Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS

Comissão Europeia, & Direção-Geral do Mercado Interno, da I., do Empreendedorismo e das PME. (2021). Princípios da UE para a sustentabilidade das matérias-primas. Serviço das Publicações da União Europeia. https://doi.org/10.2873/467896

Commission of the european communities. (2008, julho 16). Public procurement for a better environment. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0400

Decreto-Lei n.o 18/2008, 18/2008 (2008). https://files.diariodarepublica.pt/1s/2008/01/02000/0075300852.pdf

European Commission. (2016). Buying green!: A handbook on green public procurement: 3rd edition. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2779/837689

Jacques De Sousa, L., Poças Martins, J., & Sanhudo, L. (2024). The State of the Sustainability Factor for Construction Procurement: The Case of Portugal. Em J. C. G. Lanzinha & E. L. Qualharini (Eds.), Proceedings of CIRMARE 2023 (Vol. 444, pp. 576–586). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48461-2_49

Montalbán-Domingo, L., García-Segura, T., Amalia Sanz, M., & Pellicer, E. (2019). Social Sustainability in Delivery and Procurement of Public Construction Contracts. Journal of Management in Engineering, 35(2), 04018065. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000674

Montalbán-Domingo, L., Torres-Machi, C., Sanz-Benlloch, A., Pellicer, E., & Molenaar, K. R. (2023). Green Public Procurement in Civil Infrastructure Construction: Current Performance and Main Project Characteristics. Journal of Construction Engineering and Management, 149(9), 04023089. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-13502

Orfanidou, V. S., Rachaniotis, N. P., Tsoulfas, G. T., & Chondrokoukis, G. P. (2023). Life Cycle Costing Implementation in Green Public Procurement: A Case Study from the Greek Public Sector. Sustainability, 15(3), 2817. https://doi.org/10.3390/su15032817

Porro, M. V. (2023). The organizational impacts of green public procurement—Evidence from a large European University [UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA]. https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/50664

Portaria n.o 255/2023 (2023). https://files.diariodarepublica.pt/1s/2023/08/15200/0001800108.pdf

Resolução da Assembleia da República n.o 152/2016, 152/2016 (2016). https://files.diariodarepublica.pt/1s/2016/07/14500/0248402491.pdf

Resolução do Conselho de Ministros n.o 13/2023, 13/2023 (2023). https://files.diariodarepublica.pt/1s/2023/02/03000/0019300224.pdf

Resolução do Conselho de Ministros n.o 132/2023, 132/2023 (2023). https://files.diariodarepublica.pt/1s/2023/10/20700/0002600041.pdf

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MICROESTRUTURA DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM BIOCHAR

*Gisleiva C. S. Ferreira[a]; Flávia F. Vieira[b]; Camila R. Moura[c], Daniel A. O. Massola[d]; Ivair J. Sbroio[e]

[a*]FT- UNICAMP-Universidade Esatdual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, Brasil, e-mail: gisleiva@unicamp.br

[b]FT- UNICAMP-Universidade Esatdual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, Brasil, e-mail: flafreitasvieira@gmail.com

[c]FT- UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, Brasil, e-mail: c244728@dac.unicamp.br

[d]FT- UNICAMP-Universidade Esatdual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, Brasil, e-mail: d272383@dac.unicamp.br

[e]FT-UNICAMP-Universidade Esatdual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, Brasil, e-mail: i152043@dac.unicamp.br

RESUMO

O processamento e uso de biomassa para produção de energia, utilizando a pirólise, vem ganhando espaço nos setores produtivos agroindustriais devido a eficiência e menor impacto ambiental deste processo. Entretanto, ainda há a geração de um resíduo sólido, identificado como biochar (bio-carvão), que precisa ter uma destinação com conceitos de economia circular. Considerando os resultados positivos acerca das cinzas obtidas por processos de calcinação de resíduos agroindustriais, aplicadas em matrizes cimentícias, identificou-se uma oportunidade de aplicação do biochar como adição mineral. Portanto, o objetivo deste trabalho foi determinar o potencial de uma amostra de biochar, como pozolana em matrizes cimentícias. Para isso, realizou-se o pré-processamento (moagem) e caracterização físico-química de uma amostra de biochar obrtida da pirólise do bagaço de cana de açúcar, além das propriedades químicas e microestruturais de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento Portland (CP) por biochar. As análises experimentais envolveram ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e imagens com microscópio eletrônico de varredura (MEV+EDS). As análises dos resultados indicaram que a densificação da microestrutura das pastas com biochar (observada nas imagens de MEV), é resultado das reações pozolânicas proporcionadas pela presença do biochar (confirmadas pela redução da presença de hidróxido de cálcio, conforme análises de DRX) e efeito filer.

Palavras-chave: Aglomerante secundário, Atividade pozolânica, Efeito filer, Biomassa.

1 INTRODUÇÃO

Uma das técnicas de processamento da biomassa para produção de energia é a pirólise. Este processo consiste em reações de oxidação-redução, ou seja, uma parte da biomassa é reduzida a carbono e a outra parte é oxidada e hidrolisada. No processo de pirólise, aplicando-se temperaturas entre 400 e 450 °C, é possível obter cerca de 30% de bio-óleo, 35% de carvão (biochar) e 35% de gás (ROCHA et al., 2004). Entretanto, a qualidade do biochar é altamente dependente das condições de produção, como faixa de temperatura de pirólise, pressão, taxa de aquecimento e tempo de queima, influenciando suas propriedades físico-químicas e microestruturais (Zaid et al., 2024; Javed et al., 2022; Maljaee et al., 2021; Zahed et al., 2021).

Portanto, o carvão (biochar), material fino e poroso que apresenta potencial para ser utilizado em outros setores produtivos como na construção civil, precisa ser melhor estudado. Os estudos sobre o biochar como adição mineral em matrizes cimentícias apresentam resultados promissores (Zhu et al., 2023; Javed et al., 2022). Os autores justificam esse comportamento principalmente pelo processo de queima ocorrer com baixo teor de oxigênio, o que preserva componentes amorfos da celulose, por exemplo, a sílica (Ahmad et al., 2014; Shaaban et al., 2014; Suman & Gautam, 2018). Portanto, o biochar pode apresentar propriedades químicas (pozolânicas) e/ou físicas (efeito filer).

Mas a porosidade das partículas de biochar, que resulta em elevada superfície específica, devido à liberação de voláteis e matéria orgânica durante o processo de pirólise, são características que devem ser avaliadas antes de definir o tipo de material que o biochar será incorporado (Shaaban et al., 2014). Neste sentido, Rodier et al. (2019) estudaram o efeito do biochar, proveniente da pirólise lenta do bagaço de cana-de-açúcar, nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de CP. Os autores concluíram que a adição de 4% (em massa) de biochar reduziu em 25% a condutividade térmica em relação a material referência. Além disso, manteve-se as propriedades mecânicas (resistência à flexão) e reduziu a absorção de água devido o efeito filer. Com esse estudo pode-se afirmar que o efeito filer teve maior efeito na matriz cimentícia do que a porosidade das partículas.

Com estas informações coletadas na literatura, verifica-se que o biochar apresenta potencial para aplicações em matrizes cimentícias, melhorando o desempenho destes materiais tanto no âmbito técnico como ambiental. Isso porque atende às necessidades dos setores produtivos, quanto a destinação dos resíduos de forma sustentável, reduzindo os impactos e passivos ambientais. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a microestrutura de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento Portland por biochar, oriundo da pirólise do bagaço de cana de açúcar.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

A amostra de biochar foi obtida a partir do processo de pirólise do bagaço da cana-de-açúcar em temperatura de 480 ºC. Para viabilizar a adição desta amostra nas pastas cimentícias foi necessário realizar o pré-processamento, ou seja, a moagem da amostra (B0), utilizando um moinho de bolas e 2 tempos (1 hora - B1 e 24 horas - B24). Esses tempos foram definidos para se obter uma reta de tendência da eficiência da moagem em função do tempo. Para efeito de comparação, também se utilizou a cinza de casca de arroz (CCA), comercializada como pozolana para materiais cimentícios. Para a caracterização físico-química dos materiais utilizou-se das análises de granulometria a laser (Figura 1 e tabela 1).

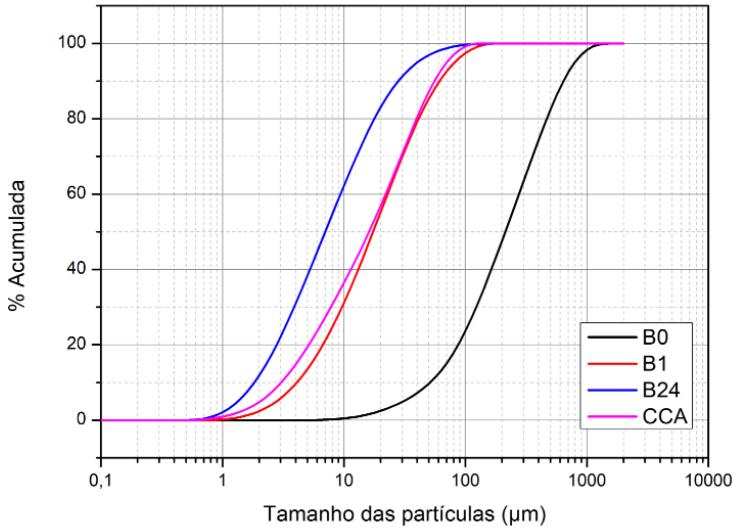


Figura 1 – Curva granulométrica da amostra de biochar antes (B0) e depois do pré-processamento (B1 e B24) e da amostra de CCA.

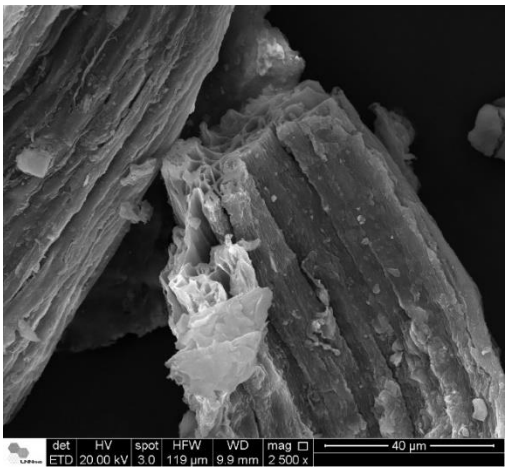
Tabela 1 – Valores de diâmetros máximos correspondentes a 10%, 50% e 90% do material que passa (D10, D50 e D90), além da massa específica e área superficial específica.

Amostra	Massa específica (g/cm^3)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Área sup. esp. (m^2/g)
B0	--	51,43	213,30	640,29	0,06
B1	1,73	4,10	17,34	61,23	0,63
B24	1,75	1,83	7,00	27,96	1,39
CP V - ARI	3,12	2,22	14,06	36,54	0,91
CCA	2,12	3,05	16,07	55,60	0,80

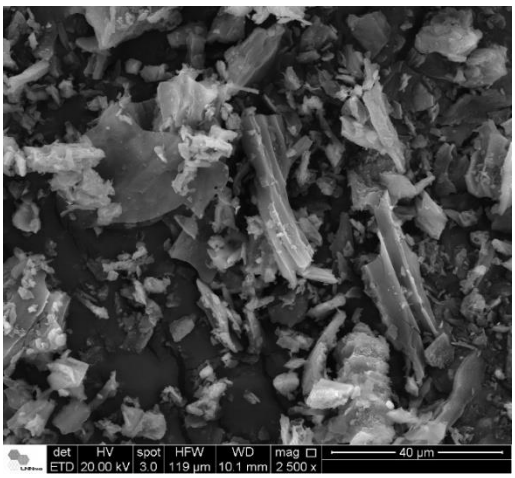
D10: 10% do material analisado encontra-se com diâmetro abaixo desse valor encontrado;
D50: 50% do material analisado encontra-se com diâmetro abaixo deste valor encontrado ou diâmetro médio (D.M.);
D90: 90% do material analisado encontra-se com diâmetro abaixo desse valor encontrado

Os dados obtidos indicam que o processo de moagem de 1 h (B1), foi o suficiente para igualar a granulometria do biochar à amostra de CCA (comercializada como pozolana e também obtida de biomassa). Já a amostra que passou pelo processo de moagem de 24 h (B24) proporcionou uma finura ao biochar maior do que a do CP V-ARI, se considerarmos os valores de D_{90} da tabela 1 (27,96 e 36,54 µm). Ao relacionar a finura necessária aos materiais pozolânicos, conforme NBR 5752 (ABNT, 2014), que estabelece que para materiais pozolânicos beneficiados "*a amostra deve ser moída até que o resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm seja inferior a 20 %",* verifica-se que B1 e CCA apresentam valores próximos a 17% de resíduo nesta peneira. Já a amostra B24 apresentou apenas 2% de resíduo na mesma faixa granulométrica, portanto, as amostras B1 e B24 podem ser classificadas como pozolanas.

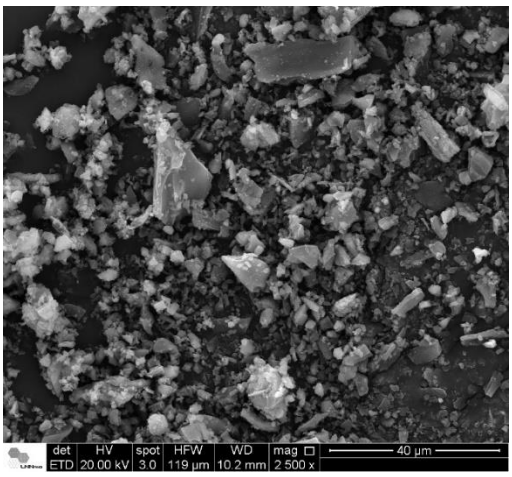
O conjunto de imagens mostrados na figura 2, obtidas com MEV, apresentam a morfologia das partículas de biochar antes (B0) (figura 2a) e depois do pré-processamento (B1 e B24), respectivamente (figuras 2b e 2c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2- Morfologia das Partículas de Biochar obtidas com imagens de MEV (ampliação de 20.000 vezes): antes do processo de moagem (a); depois do processo de moagem de 1 h (b) e 24 h (c).

A tabela 2 e figura 3 apresentam a composição química e compostos químicos do biochar, CCA e cimento Portland (CP V-ARI), utilizados neste trabalho, a partir das análises de FRX e DRX, respectivamente. Deve-se ressaltar que o tipo de CP (V-ARI) foi definido a sua composição química com maior teor de clínquer em relação aos outros tipos produzidos pelas indústrias brasileiras, além de não contem adições minerais, que poderiam influenciar nas reações químicas do biochar.

Tabela 2 – Composição química das amostras de biochar, CCA e CP V-ARI, a partir do FRX.

Amostras	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	SO_3	PF
				(%)				
Biochar	25,40	4,78	3,13	0,81	0,63	0,05	0,56	60,80
CCA	88,90	1,30	--	1,70	1,20	--	--	5,00
CP V-ARI	17,30	4,04	2,47	61,90	2,97	0,33	2,97	5,70

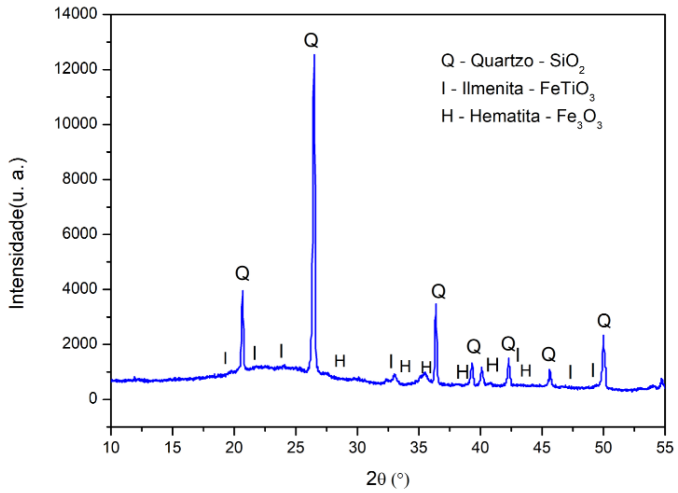


Figura 3 – Resultado da análise de DRX da amostra de biochar.

Ao considerar os teores descritos na NBR 12653 (ABNT, 2014), verifica-se que a amostra de biochar utilizada nesta pesquisa não atende ao teor mínimo de 50% da classe E (resíduo mineral), pois apresenta apenas 33,31% dos óxidos de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. O mesmo ocorreu para a perda ao fogo (60,8%), valor acima do limite descrito pela mesma norma (<6%). Apesar de não atender tais especificações, realizou-se os ensaios das pastas e respectivas análises, considerando que as cinzas oriundas de biomassa podem apresentar outras características que também resultam em propriedades pozolânicas.

As figuras 4 e 5 apresentam valores de DTA e DTG do biochar, após a moagem de 1 h (B1) e 24 h (B24), respectivamente.

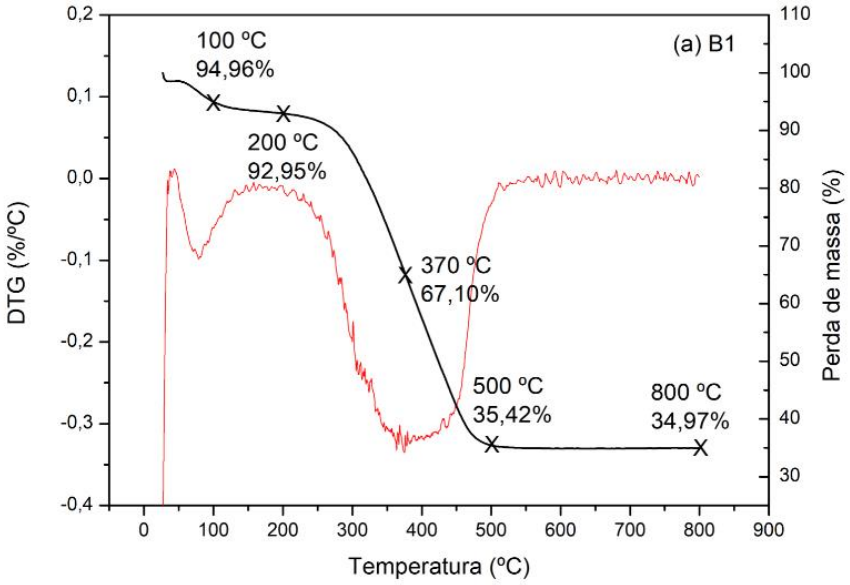


Figura 4 – Curvas de Termogravimetria (TG) e derivada TG (DTG) da amostra de biochar B1.

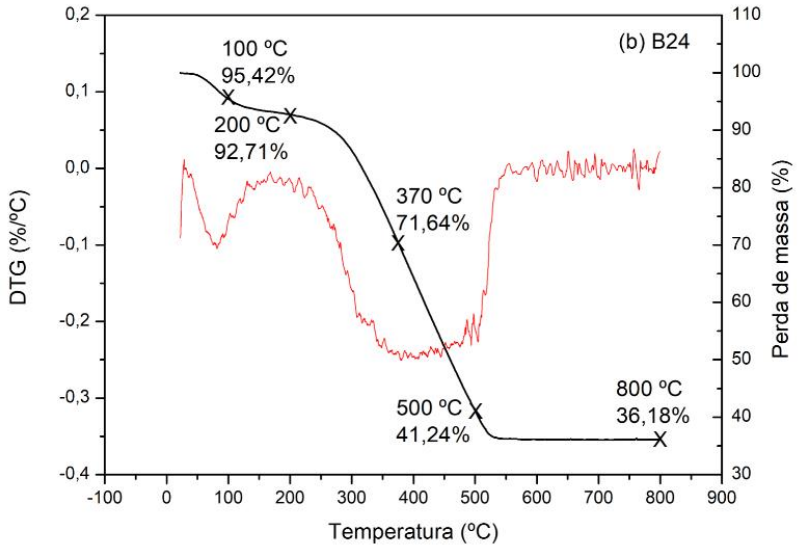


Figura 5 – Curvas de Termogravimetria (TG) e derivada TG (DTG) da amostra de biochar B24.

A Tabela 3 lista as perdas de massa, obtidas durante a termogravimetria (figuras 4 e 5) para as amostras B1 e B24, respectivamente.

Tabela 3 - Perdas de massa obtidas no ensaio de TG das amostras B1 e B24

Temperatura inicial (ºC)	Temperatura final (ºC)	Perda de massa B1 (%)	Perda de massa B24 (%)
30	200	7,05	7,29
200	500	57,53	51,46
500	800	0,46	5,06
Perda Total		65,03	63,82
Resíduo de cinza		34,97	36,19

Entre 30 ºC e 200 ºC~, a perda de massa está associada a evaporação de água das amostras, o que corresponde a 7,04 % e 7,29 % para as amostras B1 e B24, respectivamente. Em seguida, temos a perda de massa entre 200 ºC e 370 ºC de 25,85 % para o B1 e 21,06 % para o B24. Nesta temperatura, isso ocorre devido a decomposição dos compostos orgânicos presentes no biochar de bagaço de cana-de-açúcar (lignina, hemicelulose e celulose), conforme descrições de outros autores (Aboyade et al., 2011; Daniela Andresa Mortari et al., 2012; Kumar et al., 2008; Rodier et al., 2019). Na faixa de 400 ºC a 800 ºC, há a perda de massa de 0,46 % para o B1 e 5,06 % para o B24, o que pode ser justificado pela decomposição dos materiais orgânicos e substâncias voláteis ainda presentes na amostra (Rodier et al., 2019). Ao final, têm-se 35% da B1 e 36% da B2, considerando a massa inicial destas amostras, o que pode ser considerado como material inorgânico na forma de carvão.

2.2 METODOLOGIA

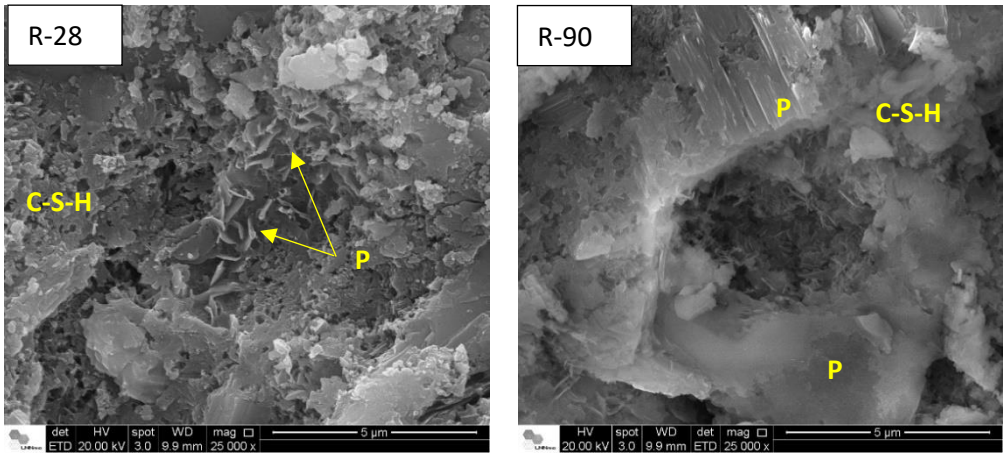
Para este estudo foram confeccionados 4 traços de pastas (tabela 4), considerando o traço referência (R), e os demais com 20% de substituição do CP por biochar (B1 e B24) e por cinza de casca de arroz (CCA). Para se obter a relação água/aglomerante realizou-se o ensaio de consistência normal.

Tabela 4 – Traços das pastas de cimento utilizadas no estudo.

Traço	Cimento (%)	Biochar (%)	CCA	Relação Água/aglomerantes
R	100	0	0	0,31
B1	80	20	0	0,38
B24	80	20	0	0,38
CCA	80	0	20	0,37

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 6, têm-se as imagens representativas da microestrutura das pastas aos 28 e 90 dias de idade de cura, com ampliação de 25.000 vezes e escala de 5 µm. A partir das imagens é possível observar a formação de produtos de hidratação, como o C-S-H e placas de hidróxido de cálcio hidratado (portlandita - P), presentes em todas as amostras estudadas. Nas amostras que contém substituição do cimento por 20 % de CCA e biochar (B1 e B24), observa-se a formação de etringita nos poros, o que demonstra um refinamento nos poros, obtendo-se uma matriz mais densa do que a da pasta referência. Zeidabadi et al. (2018) aplicaram MEV para análise de amostras de concreto com adição de bagaço de cana-de-açúcar e observaram que na presença de água, a sílica amorfa do biochar reage quimicamente com a portlandita (CH), para formar mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que melhora a resistência mecânica da matriz. Além disso, os poros do biochar absorvem e retêm umidade, o que fornece um ambiente propício para o crescimento de produtos de hidratação (Gupta & Kua, 2018).



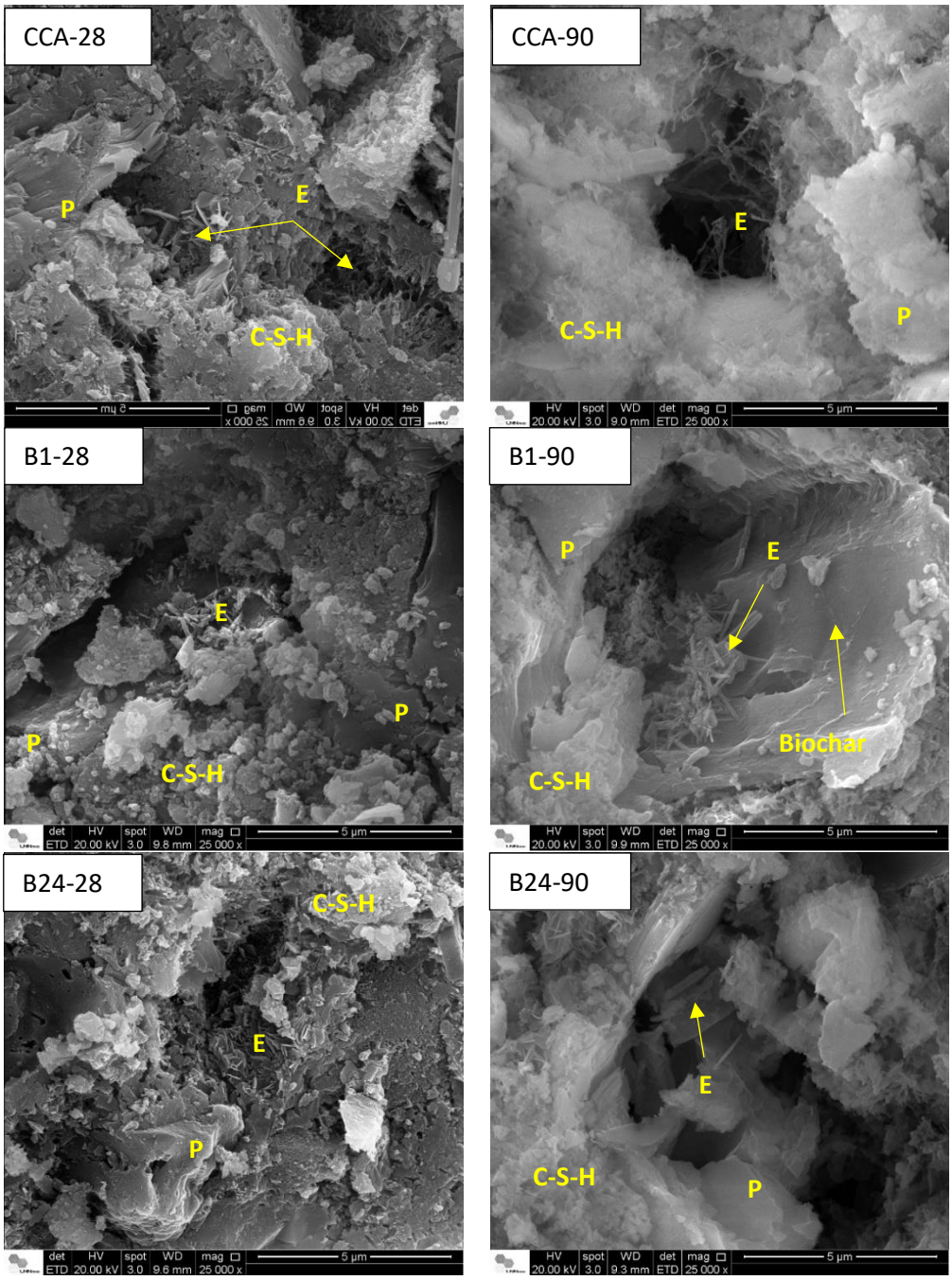


Figura 6 – Imagens obtidas em Microscópio eletrônico de Varredura (MEV) e ampliação de 20.000x, nas amostras de pastas: referência após 28 dias de cura (R-28) e 90 dias de cura (R-90); 20%CCA+80%CP após 28 dias de cura (CCA-28) e 90 dias de cura (CCA-90); 20%B1+80%CP após 28 dias de cura (B1-28) e 90 dias de cura (B1-90); 20%B24+80%CP após 28 dias de cura (B24-28) e 90 dias de cura (B24-90).

As Figuras 7 e 8 mostram o EDS realizado nas amostras B1-28 e B24-28, utilizando imagens obtidas com MEV e ampliação de 10.000 vezes onde identificou-se partículas de biochar envoltas por C-S-H.. As imagens foram realizadas com ampliação de 10.000 vezes e escala de 10 µm. A partir das imagens é possível observar a diferença granulométrica das partículas de biochar moído por 1 h (maiores do

que 10 µm) e 24 h (menores do que 10 µm). além disso, identificou-se partículas de biochar envoltas por C-S-H.

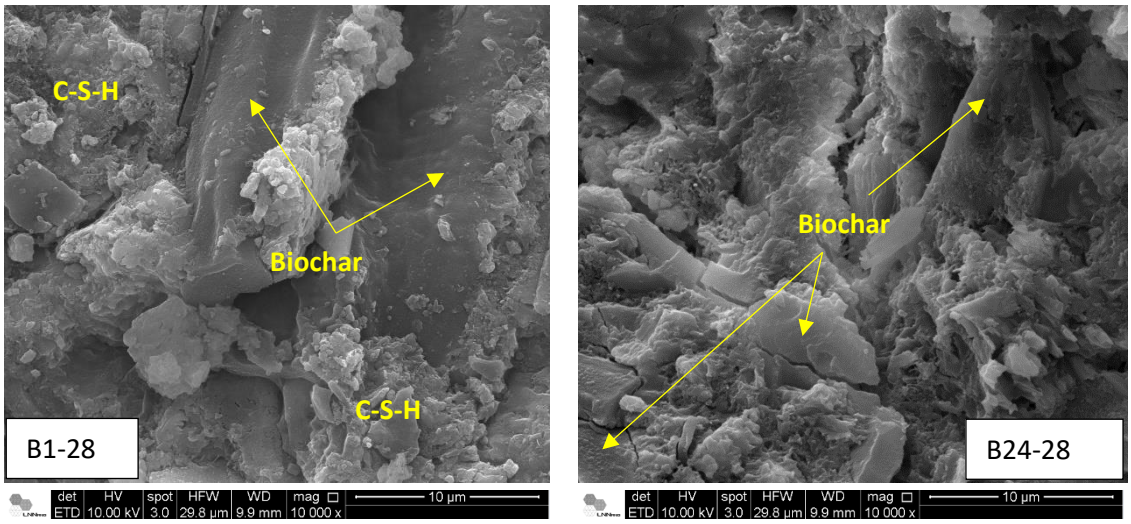
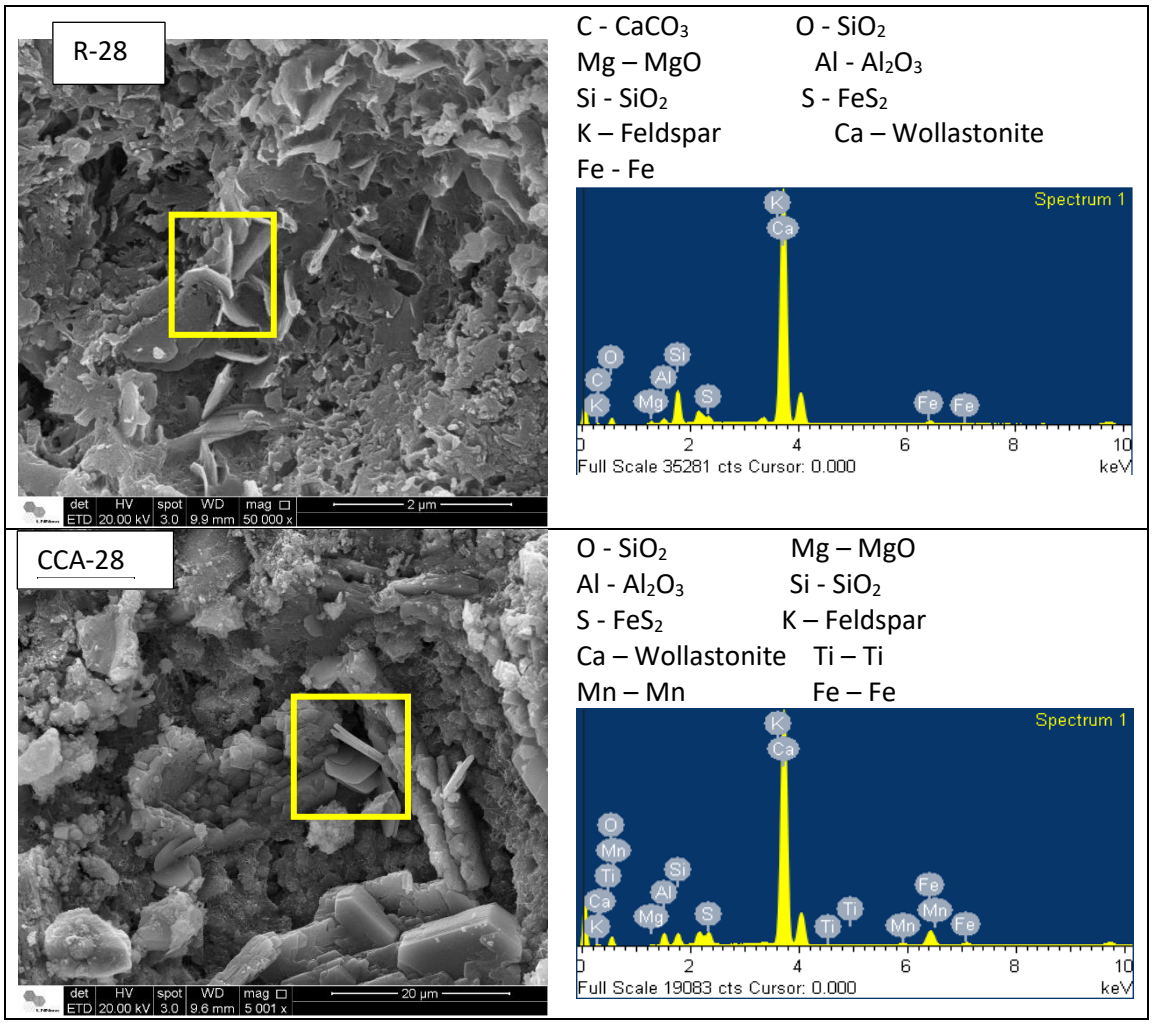


Figura 7 – MEV-EDS das amostras B1 e B24 aos 28 dias de idade com identificação dos compostos químicos.



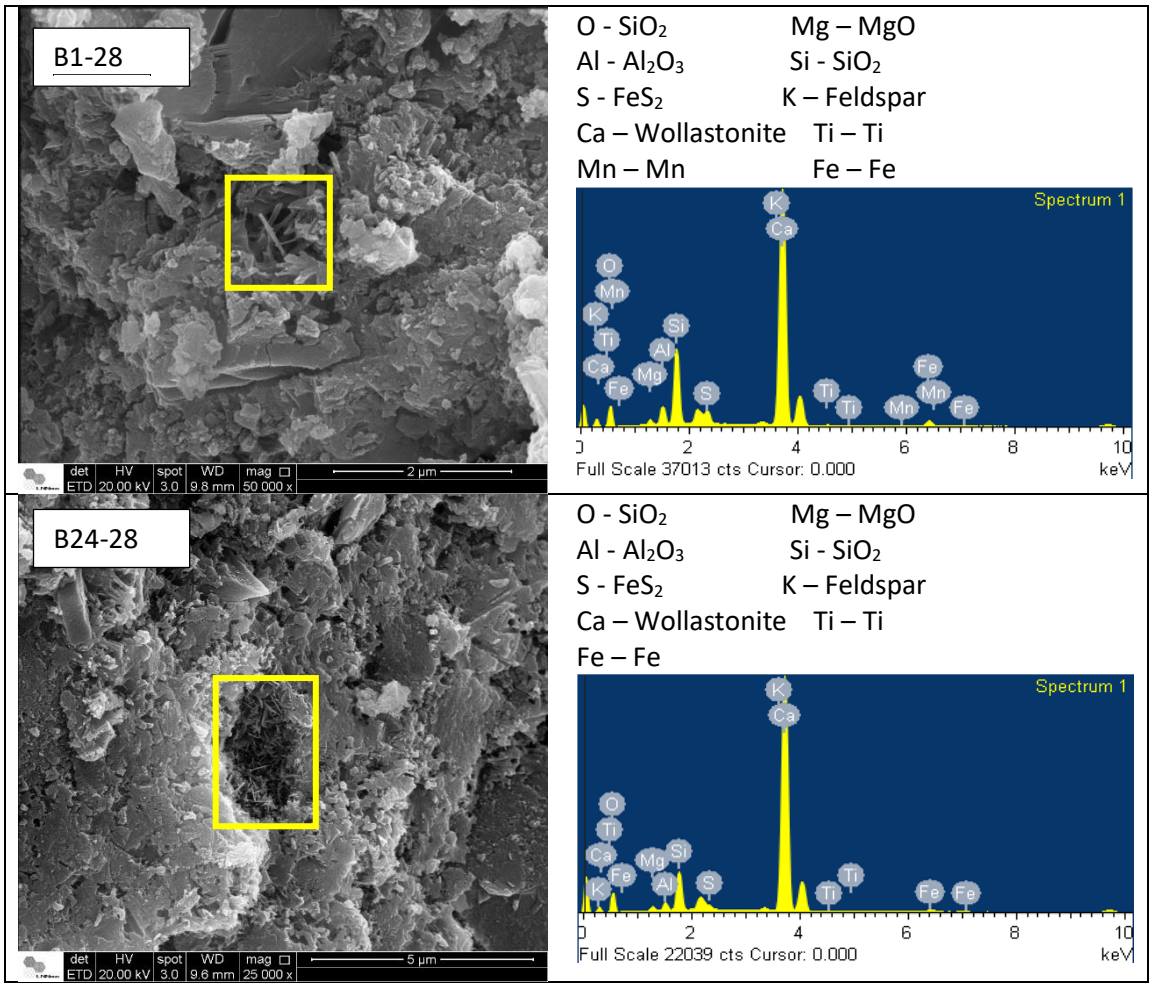


Figura 8- MEV-EDS das amostras R, CCA, B1 e B24 aos 28 dias de idade com identificação dos compostos quimicos encontrados

A Tabela 5 mostra os percentuais encontrados para cada composto formado nas diferentes amostras.

Tabela 5 - Identificação dos compostos químicos encontrados nas imagens realizadas com MEV/EDS

Elemento	C K	O K	Mg K	Al K	Si K	S K	K K	Ca K	Ti K	Mn K	Fe K
	Peso (%)										
R-28	3,69	29,21	1,01	1,30	7,36	0,69	0,89	54,30	0,00	0,00	1,54
CCA-28	0,00	35,27	0,19	3,08	2,50	1,65	0,32	49,08	0,22	0,58	7,11
B1-28	0,00	45,45	1,16	2,96	11,14	1,34	0,35	35,79	0,14	0,13	1,84
B24-28	0,00	49,62	1,29	1,57	6,50	0,08	0,39	39,57	0,12	0,00	0,86

Através dos teores dos composos químicos, identificados pelo EDS, é possível destacar que as amostras de pastas B1 e B24 apresentaram menor teor de Ca do que as pastas R e CCA. Isso indica que tal composto, resultante da hidratação do cimento Portland, teve um maior consumo na presença do biochar, portanto, comprovando que houve mais reações pozolânicas. Sendo assim, apesar da amostra de biochar utilizada neste estudo, não apresentar teores máximos dos óxidos ferro, alumínio e sílica, necessários à classificação como pozolana, foi possível comprovar que estas reações ocorreram em maior proporção nestas pastas. Vale salientar que a presença de titânio, encontrados nos difratogramas de EDS das amostras de pastas, é justificada por possíveis contaminações das amostras durante o corte e coleta dos pedaços das pastas compatíveis ao porta amostra do MEV.

4 CONCLUSÕES

A densificação da microestrutura das pastas com biochar (observada nas imagens de MEV), é resultado das reações pozolânicas proporcionadas pela presença do biochar (confirmadas pela redução da presença de hidróxido de cálcio, conforme análises de DTGA) e efeito filer. Entretanto, comparando os dados desta pesquisa com a literatura, conclui-se que o desempenho da amostra de biochar estudada pode ser melhorada com maior controle das etapas da pirólise (temperatura e tempo) e pré-processamento (moagem e peneiramento). Para estudos futuros indica-se a obtenção de amostras de biochar com faixas de temperatura do processo de pirólise superiores a 500 °C, reduzindo assim a presença de material orgânico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPEM/LNNANO pela disponibilidade de amostra de biochar e infraestrutura para realização das análises físico-químicas; Ao CNPq, à CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia PPGT-FT/UNICAMP, pelo fornecimento de recursos e infraestrutura.

REFERÊNCIAS

Aboyade, A. O., Hugo, T. J., Carrier, M., Meyer, E. L., Stahl, R., Knoetze, J. H., & Görgens, J. F. (2011). Non-isothermal kinetic analysis of the devolatilization of corn cobs and sugar cane bagasse in an inert atmosphere. *Thermochimica Acta*, *517*(1–2), 81–89. https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.01.035

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, *99*, 19–33. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

ABNT, NBR 5752. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, NBR 12653. Materiais pozolânicos - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, NBR 16606. Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.

Gupta, S., & Kua, H. W. (2018). Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*, *159*, 107–125. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095.

Javed, M. H., Sikandar, M. A., Ahmad, W.; Bashir, M. T., Alrowais, R., Wadud, M. B. (2022). Effect of various biochars on physical, mechanical and microstructural characteristics of cement pastes and mortars. Journal of Building Engineering, 57 – 104850. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104850

Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y. A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy*, *32*(5), 460–467. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004.

Maljaee, H., Madadi, R., Paiva, H., Tarelho, L., & Ferreira, V. M. (2021). Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Construction and Building Materials*, *283*, 122757. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757.

Mortari, D. A., Avila, I., Moreira Santos, A., Crnkovic, P. C. G. M. (2012). Study of thermal decomposition of ignition temperature of bagasse, coal and their blends. *Engenharia Térmica*, *9*(1–2), 81–88.

Rocha, J. D., Pérez Mesa, J. M., Cortez, L. A. B. (2004). Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa. Curso "Energia na Indústria de Açúcar e Álcool" UNIFEI, Itajubá, 12-16 julho. https://docplayer.com.br/9358172-Aspectos-teoricos-e-praticos-do-processo-de-pirolise-de-biomassa.html.

Rodier, L., Bilba, K., Onésippe, C., & Arsène, M.-A. (2019). Utilization of bio-chars from sugarcane bagasse pyrolysis in cement-based composites. *Industrial Crops and Products*, *141*, 111731. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111731

Shaaban, A., Se, S.-M., Dimin, M. F., Juoi, J. M., Mohd Husin, M. H., & Mitan, N. M. M. (2014). Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *107*, 31–39. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.01.021

Suman, S., & Gautam, S. (2018). Biochar Derived from Agricultural Waste Biomass Act as a Clean and Alternative Energy Source of Fossil Fuel Inputs. *Energy Systems and Environment*. https://doi.org/10.5772/intechopen.73833.

Zahed, M. A., Salehi, S., Madadi, R., & Hejabi, F. (2021). Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, *4*, 100055. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100055

Zaid, O.; Alsharari, F.; Ahmed M. (2024). Utlization of engineered biochar as a binder in carbon negative cement-based composites: A review. Construction and Building Materials, 417-135246. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135246

Zhu, X.; Zhang, Y.; Chen, L.; Wang, L.; Ma, B.; Li, J.; Poon, C. S.; Tsang, D. C. W. (2023). Bonding mechanisms and micro-mechanical properties of the interfacial transition zone (ITZ) between biochar and paste in carbon-sink cement-based composites. 139-105004. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105004

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DO PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

Antonio J. Diosdado[a,b]; Martín Valenzuela[a]; Guilherme Ascensão[c]; Victor M. Ferreira[c]; Manuel Caraballo[a,b]

[a]Department of Mining, Mechanic, Energetic and Construction Engineering, Higher Technical School of Engineering, University of Huelva, Huelva, Spain, mcaraballo@dimme.uhu.es; antonio.diosdado@dimme.uhu.es; martin.valenzuela@dimme.uhu.es

[b]Department of Water, Mining and Environment, Scientific and Technological Center of Huelva, University of Huelva, Huelva, Spain

[c]RISCO - Research Center for Risks and Sustainability in Construction, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, guilhermeascensao@ua.pt; victorf@ua.pt

RESUMO

Atualmente, a gestão eficiente dos recursos e a valorização dos resíduos de mineração resultantes do processamento e transformação de minério tornou-se um desafio crítico. A indústria mineira processa a nível mundial milhões de toneladas de minério, gerando anualmente uma quantidade de resíduos de mineração entre os 5 e 7 bilhões de toneladas. Estima-se que existam mais de 8 mil barragens de resíduos de mineração (mine tailings) e que anualmente sejam produzidos 10 bilhões de metros cúbicos destes resíduos de mineração. Estes resíduos devem ser armazenados, monitorizados e geridos cuidadosamente para evitar instabilidades geoquímicas e físicas nos locais de depósito que podem resultar na contaminação ambiental e/ou rutura das barragens de armazenamento.

Por outro lado, numa sociedade que ambiciona emissões de CO_2 próximas a zero, é crucial inovar e desenvolver novos materiais para o setor da construção. O cimento Portland é o ligante mais utilizado globalmente e a produção de clínquer representa cerca de 60% das emissões de CO_2 geradas na produção de cimento Portland. É, portanto, necessário reduzir o consumo global de clínquer e aumentar a utilização de ligantes alternativos.

Neste contexto, geopolímeros produzidos a partir de resíduos de mineração podem representar uma alternativa sustentável que mitigue os impactos ambientais da indústria mineira e da construção. Este trabalho pretendeu avaliar os efeitos da temperatura (23°C, 40°C e 60°C) e tempo de cura (3d, 15d, 27d), tipo de solução alcalina (NaOH e $Mg(OH)_2$) e concentração da mesma (1M, 7.5M, 15M) no desenvolvimento de resistência à compressão. Diferentes amostras de resíduos de mineração foram analisadas e selecionadas considerando a relação Si/Al e capacidade de acidificação do material. Foram produzidos 156 corpos de prova combinando as diferentes variáveis investigadas. Os resultados demostram que soluções de $Mg(OH)_2$ favorecem o desenvolvimento de maiores valores de resistência à compressão, especialmente a concertações elevadas, enquanto os efeitos da temperatura e tempo de cura foram menos pronunciados. A maioria dos corpos de prova produzidos apresentaram valores de resistência à compressão que satisfazem as normas da indústria mineira e são análogos aos das misturas cimentícias atualmente utilizadas no reenchimento de galerias subterrâneas.

Palavras-chave: Resíduos de mineração, Cimento geopolimérico, Materiais sustentáveis, Construção.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, enfrentamos o desafio societal de gerir de forma responsável e eficiente os recursos naturais para atender às crescentes necessidades da população mundial. É, por isso, essencial maximizar as taxas de valorização de resíduos resultantes de diversos processos industriais e desenvolver novos materiais de índole sustentável. O sector da construção, e a produção de cimento em particular, são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de CO_2 de origem antropogénica (Davidovits, 2020), sendo as emissões provenientes sobretudo do processo de calcinação da calcário durante a produção de clínquer. É, portanto, urgente reduzir a produção de clínquer e explorar o desenvolvimento de ligantes alternativos. Entre os ligantes alternativos com maior potencial de aplicação no sector da construção, os geopolímeros podem ser produzidos usando como precursor matérias primas secundárias, potencialmente incluindo resíduos da exploração mineira. Anualmente, são geradas quantidades significativas desses resíduos – 5 a 7 milhões de toneladas, Franks et al. (2021), com milhares de depósitos e barragens localizados em tudo o mundo. A gestão adequada desses resíduos é crucial para evitar potenciais riscos ambientais, como contaminação dos lençóis freáticos e a rutura de barragens (Gómez-Arias et al. 2021; Parbhakar et al., 2018); Franks et al., 2021).

Nesse contexto, o desenvolvimento de novos ligantes geopoliméricos à base de resíduos de mineração emerge como uma solução promissora para mitigar os riscos e impactos ambientais quer da indústria mineira, quer do sector da construção. A solução de valorização explorada neste trabalho pretende oferecer uma alternativa sustentável ao armazenamento de resíduos em barragens ou aterros, contribuindo assim para uma gestão mais responsável dos recursos naturais e, simultaneamente reduzir as emissões de CO_2 associadas à produção de materiais de construção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram selecionados seis resíduos de mineração com base na sua composição mineralógica, relação silício-alumínio e potencial de acidificação (Tabela 1):

- IPB2: Resíduo da exploração de maciços sulfúricos localizados na faixa pirítica ibérica, em Espanha.

- IPB3: Produto da exploração de stockwork rico em sulfetos na faixa pirítica ibérica, em Espanha.

- IOCG: Resíduo proveniente da exploração de depósitos do tipo IOCG (óxido de ferro, cobre e ouro), localizados no Chile.

- PALA: Resíduo proveniente da exploração de cobre em contextos geológicos dominados por carbonatos, localizados na África do Sul.

- MatPu: Mistura artificial composta por IPB2 (75%) e IOCG (25%).

- PuPa: Mistura artificial composta por IOCG (75%) e PALA (25%).

A Figura 1 ilustra o design experimental deste trabalho. Para reduzir a dimensão da campanha experimental sem comprometer a análise dos efeitos das diferentes variáveis consideradas, foi realizado um estudo quimiométrico reduzindo o número de realizações experimentais de mais de 250 para um total de 156.

Quadro 1 – Caracterização dos resíduos de mineração utilizados como percursores.

Referência	Capacidade de acidificação	Si/Al
IPB2	Alto	4.73
IPB3	Baixo	7.14
IOCG	Médio	4.27
PALA	Baixo	9.50
MatPu	Alto	4.70
PuPa	Médio	4.31

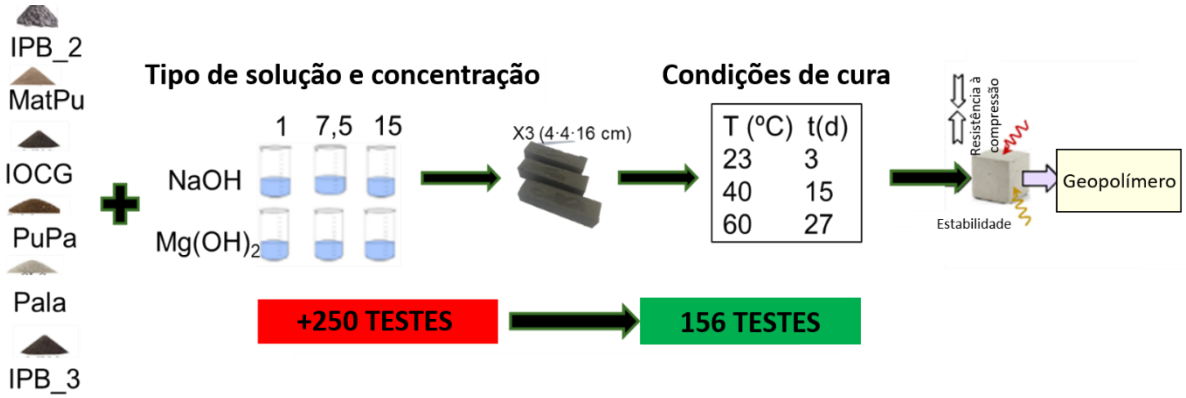


Figura 1 – Design experimental

Os diferentes resíduos foram ativados com dois soluções alcalinas distintas (NaOH e $Mg(OH)_2$) em diversas concentrações (1M, 7.5M e 15M), mantendo uma proporção de 73% de resíduo sólido, 6% de de solução alcalina e 21% de água em massa. Todas as misturas foram realizadas manualmente em recipientes plásticos inertes, durante um período de 90 segundos ao fim do qual todas as misturas adquiram uma consistência similar à de pastas de cimento Portland (Figura 2).

Figura 2 – Preparação manual da mistura IOCG + $Mg(OH)_2$, concentração 7.5 mol/L.

Após a preparação das misturas foram moldados provetes com dimensões 4x4x16 cm^3 , de acordo com a norma UNE/NP 196-1 (Figura 2a). As amostras foram deixadas dois dias nos moldes, permanecendo cobertas com um pano húmido para evitar a formação de fissuras. Após dois dias, as amostras foram desmoldadas e imersas numa solução saturada de sulfato de potássio (K_2SO_4) em recipientes plásticos inertes com vedação hermética. As amostras foram curadas nestas condições durante 3, 15 ou 27 dias a temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C. A cura das amostras a 40°C e 60°C realizou-se utilizando secadores digitais Conterm com capacidade de 80L, da marca Selecta.

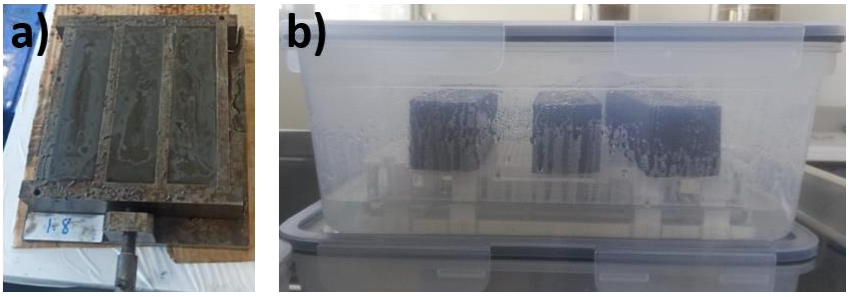


Figura 3 – Preparação e cura dos corpos de prova: a) moldagem, e b) cura de provetes em recipientes plásticos herméticos com solução saturada de K_2SO_4.

Findo o período de cura, as amostras foram ensaiadas à compressão uniaxial utilizando uma máquina universal de ensaios, modelo MUE 403 da Servosis Machine, com capacidade de carga até 1000 kN, utilizando um velocidade de deslocamento de 0.03 kN/s para garantir um tempo mínimo de ensaio de 30 segundos conforme prescrito pela norma NP 196-1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na campanha experimental realizada foram obtidos os seguintes resultados:

Das 156 formulações ensaiadas, 47 não solidificaram ao fim de dois dias de cura nos moldes, apresentando um comportamento plástico ou resistência que permitisse a realização de ensaios de compressão uniaxial.

Das 109 formulações que desenvolveram resistência, 71 ultrapassaram o valor de referência de 0.5 MPa (Tabela 1). Este valor de resistência é atualmente utilizado pela indústria mineira da faixa piritíca ibérica como critério de aceitação para materiais destinados ao preenchimento de galerias e cavidades em minas subterrâneas.

Analisando a Figura 4, é evidente que a utilização de soluções de $Mg(OH)_2$ beneficia o desenvolvimento de resistências mecânicas superiores. Do número total de formulações que ultrapassou o limite de 0.5 MPa (109), apenas 16 (23%) correspondem a geopolímeros produzidos com soluções ativadoras de NaOH, enquanto 55 formulações (77%) correspondem a geopolímeros produzidos com soluções de $Mg(OH)_2$. Além disso, os valores máximos de resistência à compressão foram registados em formulações produzidas com $Mg(OH)_2$, aproximadamente 5 MPa.

Os efeitos da concentração da solução ativadora variaram consoante a natureza da mesma. Concentrações elevadas de $Mg(OH)_2$ permitiram a obtenção de valores de resistência à compressão superiores, enquanto em geopolímeros produzidos com soluções de NaOH ocorreu o oposto. Das formulações produzidas destacam-se os resultados obtidos em amostras produzidas com o resíduo PALA, curadas a temperatura ambiente durante 15 dias (referência Pala23ºC15d), pois utilizando uma concentração baixa de NaOH (1M) atingiu valores de resistência mecânica equivalente aos alcançados

por provetes produzidos utilizando soluções de $Mg(OH)_2$ com concentração molar de 15M. Este resultado indica que a resíduos carbonatados como PALA podem ser mais propensos a processos de hidrólise alcalina e consequente geopolimerização.

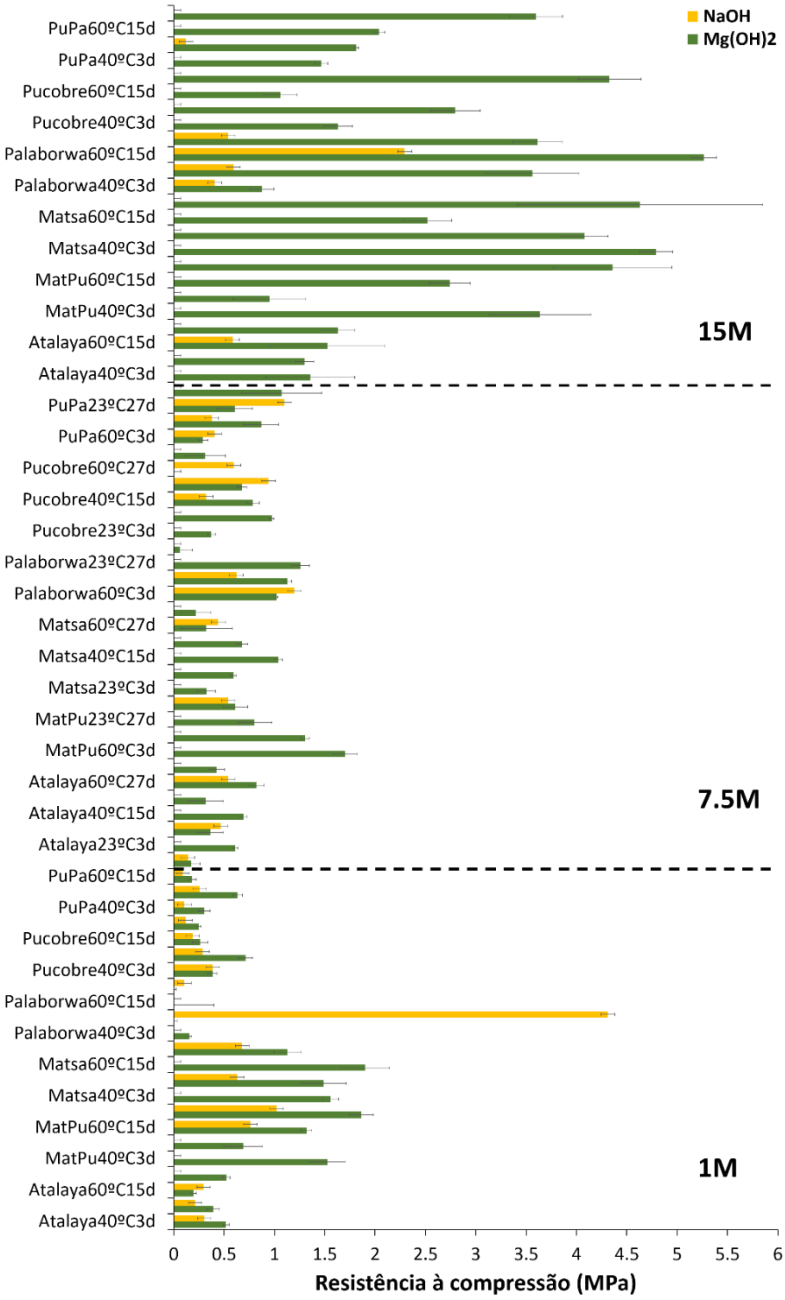


Figura 4: Efeito da tipo de solução alcalina e concentração, tempo e temperatura de cura.

A temperatura e o tempo de cura não parecem apresentar uma influência significativa nas propriedades analisadas, embora temperaturas de cura de 40°C pareçam favorecer ligeiras melhoria na resistência à compressão.

4 CONCLUSÕES

Este estudo preliminar do processo de geopolimerização de resíduos de mineração e da influência de diferentes parâmetros de síntese e cura permitiram retirar as seguintes ilações:

- A geopolimerização dos resíduos de mineração analisados e o desenvolvimento de resistência mecânica parecem ser dominados pela concentração e natureza da solução alcalina.

- Soluções de $Mg(OH)_2$ beneficiam o desempenho mecânico relativamente à utilização de soluções de NaOH de concentração equivalente.

- O período e temperatura de cura não apresentaram um influencia significativa na resistência final à compressão uniaxial.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Tailing$R^3$2Green, financiado pela União Europeia. Europeia (ERA-MIN3 No.101003575), com o apoio da FCT.

REFERÊNCIAS

Davidovits, J. (2020). Geopolymer, chemistry and applications. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France. ISBN: 9782954453118 (5th ed.).

Gómez-Arias, A., Yesares, L., Caraballo, M. A., Maleke, M., Vermeulen, D., Nieto, J. M., Heerden, E., Castillo, J. (2021). Environmental and geochemical characterization of alkaline mine wastes from Phalaborwa (Palabora) Complex, South Africa. J. of Geoch. Exploration, 224, 106757. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106757

Franks, D.M., Stringer, M., Torres-Cruz, L.A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Matthews, A., Howchin, J., Barrie, S. (2021). Tailings facility disclosures reveal stability risks. Sci. Reports, 11, 5353. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91384-z

Parbhakar-Fox, A., Glen, J., Raimondo, B. (2018). A Geometallurgical Approach to Tailings Management: An Example from the Savage River Fe-Ore Mine, Western Tasmania. Minerals, 8, 454. https://doi.org/10.3390/min8100454

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CINZAS DE BIOMASSA FLORESTAL COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

Wesley B. S. Machini [a,b]; João A. S. Almeida [a,b]; Julieta M. P. António [b,c]

[a] Universidade de Coimbra, CERIS, Coimbra, Portugal, bruno.machini@itecons.uc.pt

[b] Itecons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade, Portugal, joao.almeida@itecons.uc.pt

[c] Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, julieta@dec.uc.pt

RESUMO

O aquecimento global e a redução de recursos impelem a indústria da construção à redução de materiais energeticamente intensivos e à inclusão de resíduos nos seus produtos. A produção do cimento é uma atividade com elevadas emissões de CO_2 e grande consumidora de recursos não renováveis. A substituição parcial do cimento, por subprodutos de várias indústrias, tem sido um tópico de investigação no percurso para a sustentabilidade da construção. Neste trabalho, avalia-se o potencial de cinzas da queima de biomassa florestal (pinheiro e eucalipto) em centrais termoelétricas para substituírem parcialmente o cimento. As propriedades físicas, mineralógicas e químicas das cinzas foram caraterizadas através de ensaios laboratoriais. O efeito da substituição parcial do cimento, em percentagens de 5%, 15%, 25% e 50%, na resistência mecânica de misturas de cimento, cinza e areia, foi avaliado através de ensaios de resistência à flexão e compressão aos 28 e 90 dias de idade. Com a substituição de 25% de cimento obtiveram-se bons resultados para a resistência à compressão, com valores de 34.8 MPa e 41.3 MPa aos 28 e 90 dias de idade, respetivamente. A substituição de 50% de cimento reduz a resistência à compressão abaixo dos 10 MPa. Verifica-se que será necessário investigar outras percentagens de substituição entre os 25% e os 50% e, adicionalmente, usar outras abordagens para a ativação das propriedades ligantes das cinzas, em especial para grandes percentagens de substituição do cimento.

Palavras-chave: Cinzas de biomassa, substituto parcial do cimento, sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção é responsável pelo consumo intensivo de energia e pela libertação de gases de efeito estufa, contribuindo com pelo menos 37% das emissões de carbono relacionadas com energia (UNEP 2023). Para que se atinjam as metas de zero emissões, no setor do ambiente construído, é urgente trabalhar em modelos de descarbonização para o setor. Satisfazer as exigências de cimento e ao mesmo tempo reduzir as emissões de CO_2 é um enorme desafio que o setor enfrenta. De entre as prioridades para descarbonizar o setor do cimento, encontra-se a utilização de ligantes alternativos. Desde o final do século 20 que as cinzas volantes de carvão foram consideradas um material muito adequado para a substituição de cimento no betão, graças à sua disponibilidade e atividade pozolânica satisfatória (Hemalatha e Ramaswamy 2017). Recentemente, tem-se assistido a uma escassez das cinzas volantes, em resultado da transformação do sector energético, devido às restrições à operação de centrais eléctricas a carvão, impostas pelos requisitos da economia circular e pelo estímulo das fontes de energia verdes e renováveis (Fořt et al. 2020). Existe, assim, a necessidade de alternativas viáveis às cinzas volantes para a produção de betão (Olatoyan et al. 2023). As fontes de energia renováveis de biomassa têm potencial para ser uma fonte de energia sustentável e pode representar uma grande parte do abastecimento energético mundial até 2050 (Odzijewicz et al. 2022).

No entanto, as centrais elétricas as biomassas geram enormes quantidades de cinzas de biomassa que, quando não tratadas, podem causar sérios problemas ambientais, como poluição do solo, eutrofização da água, poluição do ar e poluição das águas subterrâneas (Xie et al. 2022). As cinzas de biomassa contêm minerais com propriedades pozolânicas, tornando-as um potencial substituto das cinzas volantes na produção de betão. A composição química e mineralógica das cinzas de biomassa é variável, dependendo da matéria-prima, do tipo de cinza e da tecnologia de combustão (Xie et al. 2022; Odzijewicz et al. 2022). Têm sido realizados vários estudos para avaliar a aplicação das cinzas de biomassa como substituto parcial do cimento que confirmam que as propriedades do material com uma composição de referência (sem cinza) podem manter-se, melhorar ou piorar, dependendo da origem e do tipo de cinza (Fořt et al. 2020; Sun et al. 2023; Olatoyan et al. 2023).

Por exemplo, as cinzas de casca de arroz melhoram as propriedades mecânicas e a durabilidade do betão, mas reduzem a trabalhabilidade devido ao elevado conteúdo de sílica e à área específica elevada (Chopra e Siddique 2015). A introdução de cinzas de madeira, até 10%, permite obter resistências à compressão aos 28 dias de idade mais elevadas que o betão de controle, mas aos 120 dias menores (Raheem e Adenuga2013). A aplicação de cinza de sabugo de milho não tratada, no betão, reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade (Abubakar et al.2016). A percentagem ótima de cinzas da combustão de resíduos da indústria de óleo de palma, na substituição de cimento, é de 10 a 20%. Esta percentagem de substituição não tem uma influência óbvia nas propriedades mecânicas, mas melhora a durabilidade (Sun et al. 2023). Quando a proporção de cinzas de biomassa excede um certo limite, a resistência à compressão do betão diminui (Olatoyan et al. 2023).

Não podem, por isso, elaborar-se considerações gerais sobre a utilização das cinzas de biomassa e, por este motivo, é importante perceber as suas características químicas e físicas e a sua influência na substituição parcial de cimento. No presente trabalho avalia-se o potencial de amostras de cinza de biomassa florestal (pinheiro e eucalipto), de centrais elétricas a biomassa, sem qualquer pré-tratamento, serem usadas como substituto parcial do cimento. Para o efeito, apresenta-se a caracterização das propriedades físicas, mineralógicas, químicas e de reatividade das cinzas de biomassa e finalmente apresentam-se as propriedades mecânicas de compósitos de cimento com a cinza de biomassa.

2 MATERIAIS E METODOLOGIAS

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os principais materiais utilizados neste trabalho são cinzas de centrais elétricas alimentadas com biomassa (BFA) de resíduos florestais (pinheiro e eucalipto) com uma massa volúmica de 2.26 g/cm^3, água e água destilada, cimento Portland CEM II/A-L 42,5 R e areia 0/4 (S0/4).

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CINZA DE BIOMASSA

A composição química da cinza de biomassa foi determinada utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) em pastilhas preparadas com a cinza, num espetrómetro sequencial de comprimento de onda dispersivo da marca Rigaku.

Para avaliar o potencial de libertação de substâncias perigosas realizaram-se ensaios de lixiviação, preparando um eluato com a cinza, de acordo com a norma EN 12457-4 (CEN 2002a), e procedendo à sua análise química, tendo em consideração parâmetros estabelecidos para os processos de admissão de resíduos em aterros originalmente definidos pela Decisão do Conselho 2003/33/EC de 19 de dezembro de 2002 (EC 2002).

Com o objetivo de perceber se a cinza possui propriedades pozolânicas, adaptou-se a metodologia da norma EN 196-5 (CEN 2011) usada para cimentos pozolânicos (teste de Frattini). Prepararam-se amostras com 20g de ligante constituídas por 80% de cimento Portland e 20% de cinza, misturadas com 100 mL de água destilada. Simultaneamente, prepararam-se duas amostras de controlo, uma contendo apenas 100% de cimento Portland (controlo negativo) e outra contendo 80% de cimento Portland e 20% de metacaulino (controlo positivo). As amostras foram condicionadas a 40 ºC durante 8 e 15 dias. Após cada período, e arrefecimento das amostras, seguiu-se um procedimento que envolve titulação química para determinar as concentrações de Ca^{2+} e OH^- dissolvidos. Os resultados apresentam-se num gráfico com o ião cálcio [Ca^{2+}], expresso como CaO, em mmol L^{-1}, no eixo *y* versus o ião [OH^-], em mmol L^{-1}, no eixo *x*. Os resultados são comparados com a curva de concentração de saturação de ião cálcio expresso como óxido de cálcio. A curva de saturação pode ser traçada a partir da equação que calcula a concentração teórica máxima de [CaO], de acordo com a EN 196-5 (CEN 2011)

$$Max\left[C_aO\right] = \frac{350}{\left[OH - 15\right]} \quad (1)$$

O material ensaiado satisfaz o teste de pozolanicidade quando o ponto que o representa fica localizado abaixo da curva.

A influência da cinza nas reações de hidratação do cimento foi avaliada através da monitorização do calor libertado durante essas reações. Utilizou-se o método descrito na norma ASTM C1702 (ASTM 2017) recorrendo a um calorímetro isotérmico, Calmetrix I-Cal Ultra, com 4 canais. Para o efeito realizaram-se pastas constituídas por cimento e cinza, com as seguintes substituições parciais de cimento em percentagem: 0%, 5%, 15%, 25% e 50%. As misturas foram efetuadas com 40 g de material em pó e 20 g de água.

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

O efeito da substituição parcial do cimento por cinza na resistência mecânica de misturas cimentícias foi analisado através dos resultados obtidos em ensaios de resistência à flexão e à compressão de misturas de cimento, cinza, areia e água (ver Quadro 1), em provetes prismáticos com dimensões de

160 mm × 40 mm × 40 mm. O provete prismático é inicialmente ensaiado à flexão e as duas partes resultantes são posteriormente ensaiadas à compressão (CEN 2019). Os ensaios foram realizados numa máquina universal da marca Instron, modelo 59R5884, com uma célula de carga de 30 kN da marca Instron, modelo 2530-444. A partir dos resultados do ensaio à compressão, calcula-se também o índice de atividade da cinza (CEN 2012).

Quadro 1 – Proporções das misturas de referência e com cinza.

Material/Amostra	CEM-II 42.5 (g)	BFA (g)	S0/4 (g)	Água (g)
0% BFA	450	-	1350	225
5% BFA	427.5	22.5	1350	225
15% BFA	382.5	67.5	1350	225
25% BFA	337.5	112.5	1350	225
50% BFA	225	225	1350	225

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 2 apresenta-se a composição química das cinzas de biomassa, do cimento Portland e da areia, determinada através da técnica de XRF. Verifica-se que na cinza de biomassa as percentagens mais elevadas, correspondem à sílica, alumina e óxido de cálcio. A sílica e a alumina têm a possibilidade de reagir com o óxido de cálcio e o hidróxido de cálcio, gerados no processo de hidratação do cimento, formando mais gel de silicato de cálcio hidratado. O total dos óxidos $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$ atinge 44.8%, sendo inferior a 70% como requisito para cinzas volantes, de acordo com a norma EN 450-1 (CEN 2012). No entanto, a norma refere que apenas as cinzas volantes obtidas da combustão de carvão pulverizado serão consideradas como satisfazendo este requisito.

De acordo com a mesma norma, o teor de sulfato (SO_3) e o teor de cloreto (Cl^-) deverão ser no máximo 3% e 0,1%, respetivamente. Comparando estes limites com os resultados obtidos para a cinza (ver Quadro 2) verifica-se que eles são ultrapassados. O teor de MgO ultrapassa ligeiramente o valor do requisito de 4%, enquanto o teor em fosfato (P_2O_5) é inferior ao limite de 5%. O requisito de perda ao fogo (LOI) da norma EN 450-1, cujo objetivo é limitar o resíduo de carbono não queimado nas cinzas volantes, também não é atingido.

Quadro 2 – Composição química (wt %) dos materiais obtida por XRF.

Parâmetro/ Material	BFA	CEM-II 42.5	S0/4
Na_2O	1.11	–	–
MgO	4.76	1.31	0.14
Al_2O_3	13.8	3.52	13.9
SiO_2	25.9	14.7	82.2
P_2O_5	2.18	0.14	–
SO_3	4.39	2.40	0.06
Cl	1.05	0.03	0.02
K_2O	9.66	0.85	2.4

Parâmetro/ Material	BFA	CEM-II 42.5	S0/4
CaO	14.5	51.5	0.74
TiO_2	0.66	0.33	–
MnO	0.91	–	–
Fe_2O_3	5.10	3.09	0.32
Outros	0.38	0.23	0.01
LOI	15.6	21.9	0.27

No **Erro! Autorreferência de marcador inválida.** apresentam-se os resultados do ensaio de lixiviação e o conteúdo total de parâmetros orgânicos para a cinza, de acordo com EN 12457-2 (CEN 2002b). Apresenta-se o limite de quantificação (LOQ) dos métodos analíticos (a menor concentração de uma substância que é possível determinar através do respetivo método analítico) e os valores máximos para aceitação de resíduos inertes em aterros. Os resultados revelam baixo teor de substâncias perigosas (metais pesados). Contudo, o teor de cloreto e sulfato pode limitar algumas aplicações.

Na Figura 1 apresenta-se o gráfico que representa a concentração de Ca^{2+}, expresso em termos de CaO, versus a concentração de OH^-. De acordo com os resultados ao fim de 8 e 15 dias, o cimento fica acima da curva de saturação e o metacaulino abaixo da mesma curva, como era expectável, representando materiais sem e com características pozolânicas, respetivamente. Relativamente à cinza, apenas após 15 dias se verifica uma moderada pozolanicidade. O Quadro 4 apresenta os resultados do teste de Frattini, de acordo com a EN 196-5 (CEN 2011), e a percentagem de CaO máximo teórico removido, para os materiais aos 8 e 15 dias. Note-se que para aqueles materiais com CaO máximo teórico calculado inferior ao CaO aferido, não foi possível calcular a redução de CaO.

Quadro 3– Resultados dos ensaios de lixiviação para a cinza de acordo com a EN 12457-2.

Parâmetro	BFA	LOQ	Máximo
pH (25 ºC)	12.1	---	---
Condutividade elétrica (25 ºC, mS/cm)	830	---	---
Cloreto (mg/kg)	5427	40	800
Fluoreto (mg/kg)	<LOQ	4	10
Sulfato (mg/kg)	14234	40	1000
Índice de fenol (mg/kg)	<LOQ	0.5	1
Sólidos dissolvidos totais – SDT (mg/kg)	47509	1000	4000
As (mg/kg)	<LOQ	0.1	0.5
Ba (mg/kg)	<LOQ	5.0	20
Cd (mg/kg)	<LOQ	0.01	0.04
Cr (mg/kg)	<LOQ	0.2	0.5
Cu (mg/kg)	<LOQ	0.4	2
Hg (mg/kg)	<LOQ	0.01	0.01
Mo (mg/kg)	0.9	0.2	0.5

Parâmetro	BFA	LOQ	Máximo
Ni (mg/kg)	<LOQ	0.1	0.4
Pb (mg/kg)	<LOQ	0.1	0.5
Sb (mg/kg)	<LOQ	0.02	0.06
Se (mg/kg)	<LOQ	0.02	0.1
Zn (mg/kg)	<LOQ	0.2	4
Carbono orgânico dissolvido – DOC (mg/kg)	<LOQ	250	500
Carbono orgânico total – TOC (mg/kg)	<LOQ	250	30000

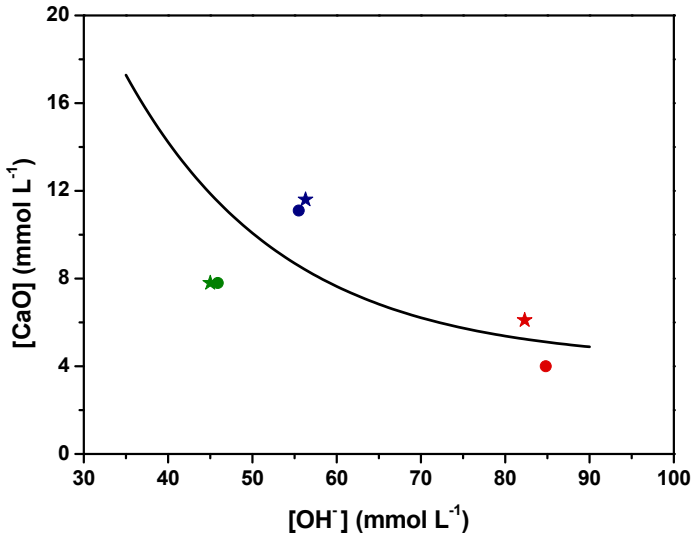


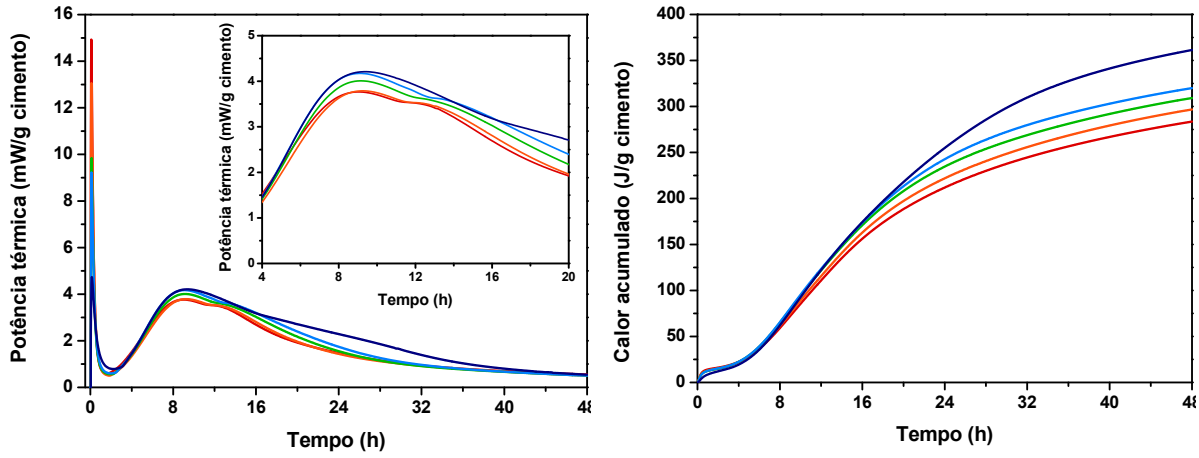
Figura 1 – Resultados do ensaio de Frattini para a cinza (vermelho), CEM-II 42.5 (azul) e MK (verde), após 8 (★) e 15 (•) dias, de acordo com a EN 196-5 (curva de saturação a preto).

Quadro 4 – Resultados do ensaio de Frattini para os materiais, aos 8 e 15 dias, de acordo com a EN 196-5.

Material	8 dias				15 dias			
	[OH^-] mmol L^{-1}	[CaO] mmol L^{-1}	[CaO] max. teór. mmol L^{-1}	[CaO]% redução	[OH^-] mmol L^{-1}	[CaO] mmol L^{-1}	[CaO] max. teór. mmol L^{-}	[CaO]% redução
BFA	82.3	6.1	5.2	–	84.8	4.0	5.0	20.0
CEM-II 42.5	56.3	11.6	8.5	–	55.5	11.1	8.6	–
MK	45.0	7.8	11.7	33.3	45.9	7.8	11.3	31.0

A Figura 2 apresenta a taxa de libertação de calor de hidratação e o calor de hidratação acumulado para as pastas cimentícias com diferentes percentagens de substituição de cimento por cinza de biomassa. Os resultados foram normalizados com base na quantidade de cimento utilizada e verifica-se uma libertação de calor superior quando temos a introdução de cinza, significando que existe uma contribuição desta para as reações de hidratação. Na Figura 2 a) observa-se um pico inicial, nos primeiros minutos de hidratação, imediatamente após o contacto das matérias-primas secas com

água. A reação exotérmica que ocorre nesta fase inicial pode ser atribuída à dissolução das fases não hidratadas de silicato e aluminato, principalmente C_3S e C_3A, presentes na composição dos precursores – cimento e cinza (Scrivener *et al.* 2015). O endurecimento das pastas pode ser observado através do período de aceleração da curva, ao final do qual é alcançado o pico principal de evolução de calor, segundo pico, o qual pode ser atribuído à formação dos principais produtos de hidratação, i.e., silicatos (C_3S, C_2S). A seguir, verifica-se um período de desaceleração da reação, evidenciado pelo terceiro pico, o qual pode ser atribuído à reação das fases de aluminato (C_3A) (Scrivener *et al.* 2015). Adicionalmente, verifica-se que nas primeiras horas a taxa de calor de hidratação é ligeiramente superior para as misturas com cinza. Ainda, importa referir que nas pastas que contêm cinza o tempo de presa é ligeiramente inferior ao da pasta que contém apenas cimento, com exceção da pasta que possui 50% de cinza. Os resultados obtidos para os diferentes percentuais de incorporação de cinza estão resumidos no Quadro 5.



a) b)

Figura 2 – Resultados de calorimetria isotérmica para a pasta de cimento de controlo (vermelho) e cimento incorporando 5% (laranja), 15% (verde), 25% (azul claro) e 50% (azul escuro): a) taxa da libertação do calor de hidratação; b) calor de hidratação acumulado.

Quadro 5 – Tempo de cura e calor de hidratação após 48 horas para pasta de cimento (controlo) e pastas de cimento contendo cinzas.

Pastas	Tempo de cura (h)	Atraso relativamente ao controlo (h)	Calor de hidratação (J/g de cimento)	Variação de calor relativamente ao controlo (%)
0% BFA	8.95	–	289.5	–
5% BFA	8.92	-0.03	294.1	1.59
15% BFA	8.79	-0.16	306.0	5.61
25% BFA	8.74	-0.21	319.4	9.77
50% BFA	9.13	+0.18	357.0	21.13

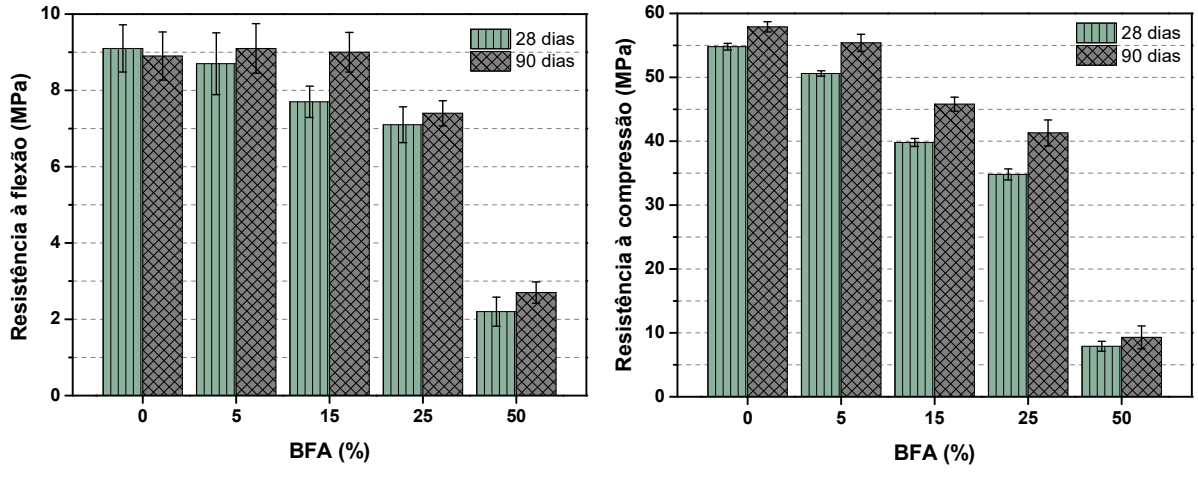
Na Figura 3 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à flexão e à compressão dos provetes das misturas de cimento, cinza e areia, obtidos aos 28 e aos 90 dias de idade. O aumento da

resistência à flexão e à compressão com o aumento da idade é mais notória nas misturas que contêm cinza. A percentagem de redução da resistência à flexão com o aumento do teor em cinza nota-se mais aos 28 do que aos 90 dias. Refira-se que aos 90 dias de idade, com percentagens de 5% e 15 % de cinza, obtém-se uma resistência à flexão superior à da mistura com 0% de cinza. Embora em vários estudos se refira a diminuição da resistência à flexão com a introdução de cinza de biomassa à base de madeira, em idades avançadas (365 dias) a resistência poderá aumentar (Garcia e Sousa-Coutinho 2013).

O aumento da resistência à compressão dos 28 dias para os 90 dias é cerca de 6% para a mistura de referência. Nas misturas com cinza, o aumento da resistência entre os 28 e os 90 dias é 9% para BFA5% e 17% para BFA50%, aumentando com o aumento da percentagem de cinza. Verifica-se o benefício de um maior período de cura para estas misturas. Nos primeiros 28 dias, a maior parte da influência da substituição do cimento pela cinza de biomassa pode ser explicada através efeito de "filler" (Gabrijel et al. 2021). Uma diminuição na resistência devido à substituição do cimento por cinza de biomassa tem sido observada noutros trabalhos e é atribuída ao menor teor em cimento ou à incorporação de carbono não queimado (Gabrijel et al. 2022). Contudo, existem algumas exceções em que se observa um aumento da resistência à compressão aos 28 dias, mas apenas em betões com uma substituição de 10% de cinzas (Rajamma et al.2009). Neste trabalho não se usou a percentagem de 10 %, pelo que não foi possível aferir se esta poderia ser a percentagem ótima a considerar. Aos 90 dias de idade verifica-se um decréscimo de resistência à compressão de 4%, 21% e 28 % para as percentagens de substituição de 5%, 15 % e 25% respetivamente.

Com a substituição de 15% e 25% de cinzas ainda se obtêm resistências à compressão razoáveis. A substituição de 50% de cinza resulta em resistências à compressão bastante baixas (uma redução de 84% aos 90 dias).

O índice de atividade pozolânico, obtido a partir da resistência à compressão, para as amostras com 25% de cinza, é de 63.5% aos 28 dias de idade e de 71.3% aos 90 dias de idade. Estes valores são inferiores aos mínimos requeridos para as cinzas volantes de acordo com a norma EN 450-1 (75% e 85%, respetivamente).



a) b)

Figura 3 – Resistência mecânicas das misturas: a) resistência à flexão; b) resistência à compressão.

4 CONCLUSÕES

Usaram-se cinzas de biomassa florestal (pinheiro e eucalipto), sem qualquer tratamento prévio (físico ou químico) para aferir a possibilidade de substituir parcialmente o cimento em misturas cimentícias. As cinzas contêm grande quantidade de sílica e alumina. Contudo, não atingem o critério da percentagem total de óxidos SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 para cinzas volantes (70%). Os testes de lixiviação revelam baixas concentrações de substâncias perigosas (metais pesados). Contudo, as percentagens de cloretos e sulfatos podem ser limitantes para algumas aplicações. O teste de Frattini revela moderada atividade pozolânica da cinza após 15 dias. A presença da cinza de biomassa florestal afeta de forma positiva o processo de hidratação das pastas contribuindo para um aumento do calor de hidratação.

Apesar do índice de atividade pozolânico, determinado a partir da resistência à compressão, não atingir os valores requeridos para um cinza volante, com a substituição de 25% de cimento obtém-se uma boa resistência à compressão, permitindo reduzir o impacto ambiental do cimento. A substituição de 50% de cimento conduziu a resistências à compressão baixas. Para percentagens elevadas de substituição do cimento poderá ser necessário explorar abordagens alternativas que ativem a reatividade da cinza.

Face aos resultados obtidos, considera-se a necessidade de realizar estudos adicionais, que complementem os efetuados, com o objetivo de explorar tratamentos que possam melhorar as propriedades da cinza como por exemplo lavagem, ativação mecânica e química e remoção de matéria orgânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Abubakar, A., Mohammed, A., Samson, D. (2016). Mechanical properties of concrete containing corn cob ash. Int. J. Sci. Res. Eng. Stud. 3:47-41.

ASTM (2017). ASTM C1702-17, Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry. ASTM International, West Conshohocken

CEN (2002a). EN 12457-2:2002, Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction). European Commitee for Standardization, Brussels

CEN (2002b). EN 12457-4, Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction). European Commitee for Standardization, Brussels

CEN (2011). EN 196-5:2011, Methods of testing cement - Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement. European Commitee for Standardization, Brussels

CEN (2012). EN 450-1:2012, Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria. European Commitee for Standardization, Brussels

CEN (2019). EN 1015-11:2019, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Commitee for Standardization, Brussels

Chopra, D., Siddique, R. (2015). Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. Biosyst. Eng. 130:72–80. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005

EC (2002). Council of the European Union, 2003/33/EC: Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC, 2002.

Fořt, J., Šál, J., Žák, J., Černý, R. (2020). Assessment of wood-based fly ash as alternative cement replacement. Sustainability, 12: 9580. https://doi.org/10.3390/su12229580

Gabrijel, I., Jelčić Rukavina, M., Štirmer, N. (2021). Influence of wood fly ash on concrete properties through filling effect mechanism. Materials 14:7164. https://doi.org/10.3390/ma14237164

Gabrijel, I., Skazlić, M., Štirmer, N. (2022). Long-term behavior of concrete containing wood biomass fly ash. Appl. Sci. 12:12859.

Garcia M.D.L., Sousa-Coutinho J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. Constr. Build. Mater. 41:897-910. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081.

Hemalatha, T., Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics -Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. J. Clean. Prod. 147, 546–559. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114

Odzijewicz, J.I., Wołejko, E., Wydro, U., Wasil, M., Jabłońska-Trypuć, A. (2022). Utilization of ashes from biomass combustion. Energies, 15: 9653. https://doi.org/10.3390/en15249653

Olatoyan, O.J., Kareem, M.A., Adebanjo, A.U., Olawale, S.O.A., Alao, K.T. (2023). Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review. Hybrid Advances, 4: 100076. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100076

Raheem, A. A., Adenuga, O. A. (2013). Wood ash from bread bakery as partial replacement for cement in concrete. Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol. 4:75–81.

Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. J. Hazard Mater. 172:1049-1060. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109

Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B. (2015). A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

Scrivener, K.L., Juilland, P., Monteiro, P.J.M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, 78, 38-56. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025

Sun, L., Yao, C., Guo, A., Yu, Z. (2023). A Review on the application of lignocellulosic biomass ash in cement-based composites. Materials, 16:5997. https://doi.org/10.3390/ma16175997

UNEP & Yale Center for Ecosystems + Architecture. (2023). Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. Nairobi: United National Environmental Programme. ISBN: 978-92-807-4064-6. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293

Xie, H.Z., Ren, C.Z., Zhao, B.F., Liu, S.X., Zhu, D., Guan, H.B., Xu, D., Wang, J.W., Yang, H.J. (2022) Characterization and use of biomass power plant ash in sulfoaluminate cementitious materials. Construction and Building Materials, 325: 126667. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126667

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PODE A CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA SER UM DESTINO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE MEMBRANAS BETUMINOSAS?

José Neves[a]; Ana Pacheco[b]; Adão Paulo[c]; Jorge Ramos[b]

[a] (CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Ambiente, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal), jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt

[b] (Imperalum, Zona Industrial do Pau Queimado, 2870-100 Montijo, Portugal), apacheco@imperalum.pt

[c] (Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal), adaopaulo1993@gmail.com

RESUMO

Durante a produção de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização são gerados resíduos devido à ocorrência de diferentes tipos de defeitos que devem ser obrigatoriamente eliminados ao longo do processo de fabrico. Não sendo possível a reincorporação em novas produções, o setor depara-se atualmente com a necessidade de encontrar soluções para a eliminação destes resíduos que sejam alternativas sustentáveis à deposição em aterro sanitário ou à incineração. O objetivo do artigo é analisar a viabilidade da construção rodoviária ser um possível destino sustentável a dar aos resíduos numa perspetiva de economia circular. O artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo experimental sobre a incorporação por via seca de resíduos de produção de membranas de impermeabilização em misturas betuminosas de pavimentação. O estudo foi realizado em laboratório numa mistura betuminosa do tipo betão betuminoso para camada de regularização – AC 20 reg 35/50 (MB) – que é utilizada correntemente em obras de beneficiação. No estudo foram utilizados vários resíduos, após trituração, para diferentes taxas de incorporação. Os resultados mostraram que foi viável a incorporação dos resíduos das membranas de impermeabilização, ricos em betume modificado, e que estes influenciaram de forma positiva e ativa o betume e, consequentemente, o desempenho da mistura betuminosa.

Palavras-chave: Construção rodoviária, Misturas betuminosas, Resíduos de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem sido um tema bastante discutido ao longo dos últimos anos, devido em grande parte às alterações climáticas causadas, entre outro fatores, pela exploração em massa de matérias-primas, consumo de energia não renovável e pela forma como os resíduos são eliminados após o seu fim de vida útil. Em 2022, o setor da construção, em particular, foi responsável por 37% das emissões de CO_2 e da energia operacional global (UNEP 2024). Surge assim a necessidade urgente das indústrias encontrarem padrões de produção sustentáveis e baseados no princípio da economia circular.

Na indústria de produção de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização, é gerada anualmente uma quantidade estimada de 100 toneladas de resíduos (com base na experiência do setor), devido à ocorrência de diferentes tipos de defeitos que são obrigatoriamente eliminados ao longo do processo de fabrico. O setor tem-se confrontado atualmente com o grande dilema relacionado com o descarte dos resíduos produzidos. Com efeito, a incineração e a deposição em aterros sanitários têm sido as soluções encontradas para resolver este problema, mas surge a questão de encontrar uma forma sustentável de dar um destino final a estes resíduos como, por exemplo, a sua utilização por outros setores da indústria de construção.

O setor da pavimentação rodoviária, desde longa data, tem vindo a considerar nos seus processos construtivos a reutilização e a reciclagem de resíduos e subprodutos de outras indústrias como, por exemplo, resíduos de construção e demolição (RCD), escórias, pneus em fim de vida útil e telhas betuminosas (Antunes *et al.* 2021; Freire e Maia 2019; Haas *et al.* 2019; Neves e João 2023; Neves *et al.* 2019; Picado-Santos *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Shirzad *et al.* 2018; Yang *et al.* 2013; Yu *et al.* 2021). Com base nestas experiências, é expectável que também a utilização de resíduos de membranas de impermeabilização na construção rodoviária seja viável.

A indústria de produção de materiais de impermeabilização é caracterizada pelo fabrico de diversos tipos de sistemas de impermeabilização, tendo como material fundamental na sua constituição o betume. Na produção industrial de misturas betuminosas para impermeabilização, são comumente utilizados misturadores verticais projetados para eficiência máxima na fusão de polímeros e homogeneização da mistura com o betume, dadas as elevadas viscosidades. Um betume de destilação ou betume oxidado é aquecido, e os polímeros e aditivos são adicionados e agitados a temperaturas entre 180 e 200°C até à completa fusão e dispersão dos materiais. Em alguns casos, esses misturadores também podem ser usados para adição e dispersão de cargas minerais. A mistura é então transferida para misturadores horizontais, onde podem ser adicionadas cargas minerais, mantendo a dispersão enquanto aguarda a entrada na linha de fabricação de membranas betuminosas. Durante o consumo da mistura betuminosa, ela geralmente circula continuamente entre o misturador lento e a balsa de impregnação, o primeiro componente da linha de fabricação de membranas (Estalagem 2010).

Um sistema de impermeabilização de coberturas com membranas betuminosas é composto por uma ou duas membranas betuminosas de impermeabilização armadas. As principais matérias-primas e composição média são as seguintes: betume (podendo tratar-se de betume oxidado ou de destilação direta, sendo que para o caso deste estudo trata-se do segundo caso) com 45-52%; polímeros com 6-10%; armadura com 2-4%; minerais como cargas ou acabamentos com 30-41%; e, em complemento, outros materiais com 3-5%. As membranas betuminosas de impermeabilização são largamente utilizadas na proteção de edifícios contra a entrada de água e de humidade, podendo ser utilizadas principalmente em coberturas para circulação e permanência de pessoas, para a circulação de veículos ou para criação de sistemas de vegetação, as chamadas coberturas ajardinadas, bem como na proteção de fundações, entre outras aplicações. As membranas betuminosas de impermeabilização podem ser classificadas como sistemas de camadas única ou multicamada (EWA 2022).

Os resíduos de membranas betuminosas são originados de três formas: durante a fase de produção (paragens da produção, emendas de armaduras, deficiente colocação dos revestimentos superficiais entre outras causas), durante a fase de aplicação (sobras de materiais, eliminação de materiais com deficiente colocação) e após o fim de vida útil. Os destinos destes resíduos são maioritariamente os aterros sanitários ou, quando possível, a incineração. Perante isto, a maior preocupação dos produtores tem sido a busca de soluções de viabilidades técnica e sustentável para o encaminhamento dos resíduos produzidos, evitando assim o recurso a um dos dois destinos atualmente em utilização.

O artigo apresenta um estudo preliminar sobre a viabilidade de incorporação de resíduos de membranas de impermeabilização, resultantes da fase de produção, em misturas betuminosas de pavimentação rodoviária (Paulo 2023). O artigo descreve o estudo realizado em laboratório numa mistura betuminosa do tipo betão betuminoso para camada de regularização – AC 20 reg 35/50 (MB) – que é uma mistura betuminosa correntemente aplicada em obras de pavimentação. No estudo foi utilizado um processo simples de trituração dos resíduos de membranas de impermeabilização e da correspondente incorporação por via seca na mistura betuminosa, com diferentes taxas de incorporação. Nesta investigação pretendeu-se, em primeiro lugar, conhecer o efeito dos resíduos no desempenho da mistura betuminosa, bem como no seu betume de constituição, ao nível das propriedades volumétricas e das características Marshall, e daí inferir a viabilidade do processo. Em segundo lugar, pretendeu-se estabelecer uma formulação simples para a composição da mistura betuminosa com os resíduos que possa ser de fácil implementação pela indústria de pavimentação, sem alteração do processo corrente de produção em central.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

O estudo foi realizado numa mistura betuminosa convencional, fabricada a quente, do tipo betão betuminoso AC 20 reg 35/50 (MB), utilizada frequentemente como material de regularização em trabalhos de beneficiação de pavimentos rodoviários e designada correntemente por macadame betuminoso. A esta mistura betuminosa pretendeu-se incorporar, pelo processo mais simples de via seca e após trituração, os resíduos de membranas de impermeabilização com várias taxas de incorporação: 0%, 2%, 3% e 5% (percentagem expressa em relação à massa total da mistura betuminosa). A adição de 0% de resíduo correspondeu à mistura betuminosa de referência do estudo (mistura betuminosa sem resíduo), para uma melhor avaliação do efeito dos resíduos provenientes das membranas de impermeabilização no comportamento da mistura betuminosa.

Na mistura betuminosa foram utilizados agregados de natureza calcária, com granulometrias nas frações 0/4, 4/10 e 10/20. Foi utilizado 4,5% de betume de destilação 35/50, em conformidade com as especificações da norma NP EN 12591, que é o betume mais utilizado na pavimentação rodoviária em Portugal. O Quadro 1 mostra a composição da mistura betuminosa relativamente às quantidades (expressas em percentagem) de betume e das várias frações de agregado.

Quadro 1 – Composição da mistura betuminosa

Agregados			**Betume**
Fração 0/4	**Fração 4/10**	**Fração 10/20**	
51,6%	23,9%	20,1%	4,5%

As membranas de impermeabilização utilizadas no estudo são compostas por betume modificado com polipropileno atático (APP) (Imperalum 2023). Foram selecionados quatro tipos de membranas, designados por M1, M2, M3 e M4. Estas membranas distinguem-se pelo tipo de betume modificado, tipo de armadura, tipo de acabamento (com e sem revestimento de grânulos de ardósia) e níveis de desempenho. Na Figura 1 pode ver-se uma amostra da membrana betuminosa de impermeabilização M1. No estudo foram investigadas duas composições de resíduos de membranas de impermeabilização: resíduo simples (RS) constituído apenas pela membrana M1; resíduo misto (RM) constituído pelas quatro membranas M1, M2, M3 e M4, em igual proporção (25%).

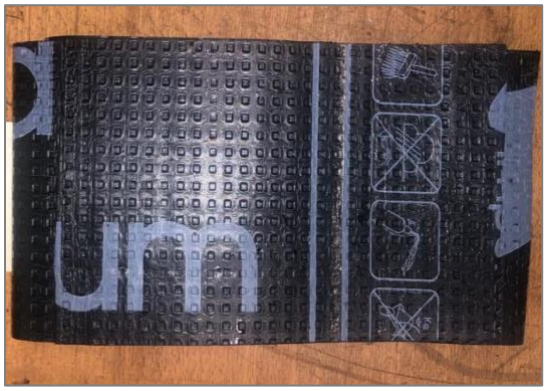
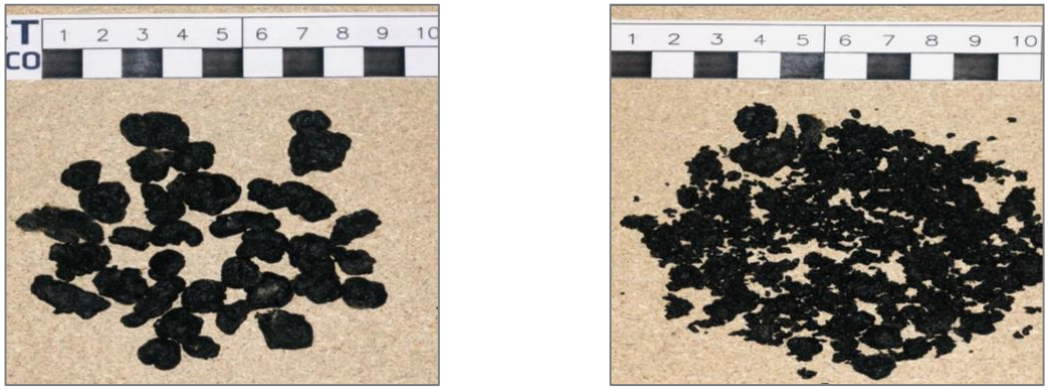


Figura 1 – Amostra de membrana betuminosa de impermeabilização

O processamento dos resíduos para incorporação nas misturas betuminosas consistiu na sua trituração realizada em diferentes fases: (a) o resíduo foi previamente cortado de forma manual para redução da sua dimensão e facilitar a sua posterior trituração; (b) trituração primária; e (c) trituração secundária. A trituração foi efetuada por meio de moinhos para moagem de produtos alimentares, com rotor de facas e diferentes capacidades e potências. Previamente à trituração, o material foi colocado em câmara de refrigeração à temperatura de 10°C. Quando triturado à temperatura ambiente do laboratório (cerca de 20°C), foi constatado que o resíduo se apresentava muito elástico e provocava o sobreaquecimento do moinho. Por sua vez, quando a baixas temperaturas, a trituração do resíduo era muito dificultada. Na trituração primária foi utilizado um moinho de média capacidade que permitiu reduzir os resíduos até à dimensão média de 12,5 mm (Figura 2a). Na fase de trituração secundária, o resíduo foi triturado num moinho de pequena capacidade e resultou numa dimensão média de 4,0 mm (Figura 2b). Para o caso do resíduo misto, foi realizado inicialmente o processamento individual de cada um e, por fim, procedeu-se à sua mistura homogénea de forma manual.



a) Trituração primária b) Trituração secundária

Figura 2 – Amostras de resíduo simples após trituração da membrana betuminosa

2.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Relativamente à mistura betuminosa, o programa experimental consistiu em ensaios de determinação das propriedades volumétricas e das características Marshall realizados no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico (Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Ambiente). Em complemento, foram realizados ensaios no betume original e no betume recuperado: determinação da penetração com agulha, determinação da temperatura de amolecimento (Método do Anel e Bola) e determinação da viscosidade dinâmica. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Controlo de Qualidade da empresa IMPERALUM.

As propriedades volumétricas da mistura betuminosa foram determinadas segundo a norma NP EN 12697-8: porosidade e volume de vazios na mistura de agregados (VMA). A realização do ensaio Marshall seguiu a norma NP EN 12697-34, tendo sido determinados a estabilidade, a deformação e o quociente Marshall. Os ensaios realizados na mistura betuminosa com resíduos seguiram exatamente os mesmos métodos de ensaio. A incorporação dos resíduos foi efetuada por via seca, ou seja, os resíduos foram adicionados após a prévia mistura a quente dos agregados e do betume original, durante o tempo necessário até se obter uma mistura betuminosa o mais homogénea possível. Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos compactados por impacto com 50 pancadas em cada face, à temperatura de 165°C (NP EN 12697-30).

Da mistura betuminosa procedeu-se à recuperação do betume segundo a norma NP EN 12697-3 (mistura betuminosa sem e com resíduo simples) que, em conjunto com o betume original 35/50, foram ensaiados para determinação das propriedades mais correntes: na determinação da penetração com agulha e da temperatura de amolecimento foram seguidas as normas NP EN 1426 e NP EN 1427, respetivamente; a determinação da viscosidade dinâmica foi baseada na norma NP EN 13302.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 INFLUÊNCIA NA MISTURA BETUMINOSA

Em relação ao resíduo simples, foram estudadas diferentes taxas de incorporação por via seca na mistura betuminosa: 0%, 2%, 3% e 5% (percentagem relativa à massa total da mistura betuminosa). Para cada taxa de incorporação, foi analisada a influência do resíduo nas características Marshall e nas propriedades volumétricas: estabilidade, deformação, quociente Marshall, porosidade e VMA. O Quadro 2 mostra os resultados obtidos para esses parâmetros. O quadro apresenta ainda os limites das especificações estabelecidas no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Infraestruturas de Portugal (IP 2014), que são os limites exigidos em obras de pavimentação rodoviária em Portugal.

Quadro 2 – Variação das características da mistura betuminosa

Parâmetro	Taxa de incorporação do resíduo (%)					Especificações
	Resíduo simples				Resíduo misto	
	0	2	3	5	2	
Estabilidade (kN)	10,3	11,9	8,7	7,3	12,1	7,5-15,0
Deformação (mm)	4	4	4	6	4	2-4
Quociente (kN/mm)	2,8	3,0	1,9	1,2	2,9	$\geq$ 2,5
Porosidade (%)	5	4	4	2	6	3-6
VMA (%)	15	14	14	13	16	$\geq$ 14

Da análise do Quadro 2 é possível constatar que, primeiramente, a incorporação dos resíduos de membrana de impermeabilização influenciou de forma positiva e ativa o comportamento da mistura betuminosa. Em segundo lugar, quando incorporados em baixa dosagem, os resíduos continuaram a garantir as especificações da IP para a mistura betuminosa. Numa perspetiva de maximização da quantidade de resíduo, a taxa de incorporação de 2% foi considerada a maior possível que continuou a garantir ainda para a mistura betuminosa o cumprimento das especificações. Igualmente, foi fabricada uma mistura betuminosa com 2% de incorporação de resíduo misto. Os resultados constantes no Quadro 2 permitem confirmar que também esta mistura cumpre as especificações.

Os resultados das propriedades volumétricas para as misturas betuminosas contendo 0% de resíduo (0%), 2% de resíduo simples (2% RS) e 2% de resíduo misto (2% RM) são apresentados na Figura 3. A análise dos resultados permite concluir que a incorporação de resíduo simples levou a uma redução da porosidade. Tal efeito pode ser atribuído à presença de betume modificado no resíduo. No caso do resíduo misto, observou-se um aumento da porosidade que pode ser explicado pela presença de grânulos de ardósia em alguns dos resíduos, reduzindo o efeito do betume e do seu impacto na composição da mistura. A porosidade dessa mistura está no limite superior do intervalo especificado. Quanto ao VMA, foi observado que a mistura betuminosa com resíduo simples apresentou um volume menor em comparação com a mistura betuminosa padrão e a mistura betuminosa com resíduo misto. Isso pode ser devido, igualmente, à presença do betume modificado adicionado pelo resíduo. Ao analisar a mistura betuminosa com resíduo misto, notou-se um aumento do VMA. Esse efeito é desejável, indicando que há mais espaço para o ligante betuminoso revestir a mistura, o que pode contribuir para a flexibilidade, durabilidade e desempenho da mistura betuminosa. É importante salientar que todos os resultados estão dentro dos limites das especificações.

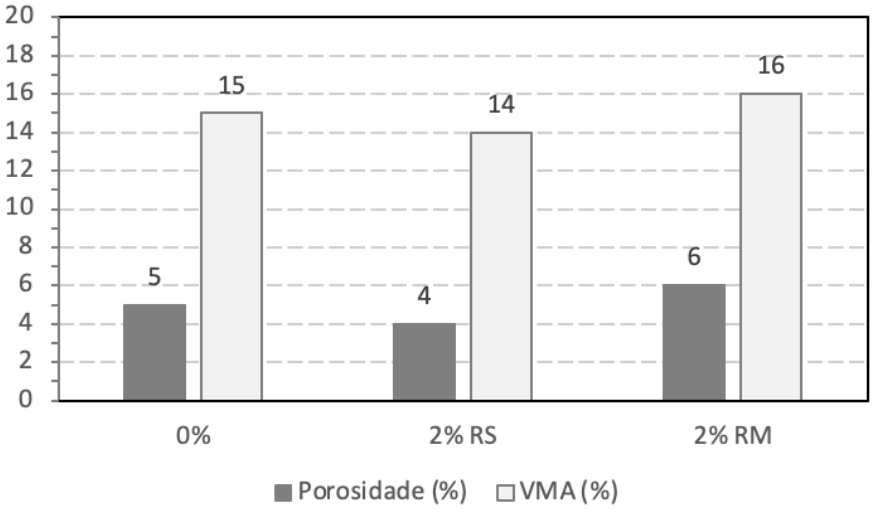


Figura 3 – Variação das propriedades volumétricas

A Figura 4 mostra os resultados das características Marshall das misturas betuminosas: estabilidade, deformação e quociente Marshall. A identificação das misturas betuminosas é igual à utilizada na apresentação dos resultados da Figura 3. A mistura betuminosa com 2% de resíduo simples revelou um aumento da estabilidade, indicando que a presença do resíduo, mesmo com betume modificado, não teve um impacto negativo na estabilidade. Relativamente à deformação, não houve influência e o

valor continuou a garantir o limite especificado. Por sua vez, a mistura betuminosa com 2% de resíduo misto apresentou um aumento de estabilidade. Quanto à deformação, comparando com a mistura convencional, também não se constatou influência significativa. Em relação ao quociente Marshall, a presença do resíduo também não teve impacto importante. Todos os resultados obtidos estão dentro dos limites das especificações.

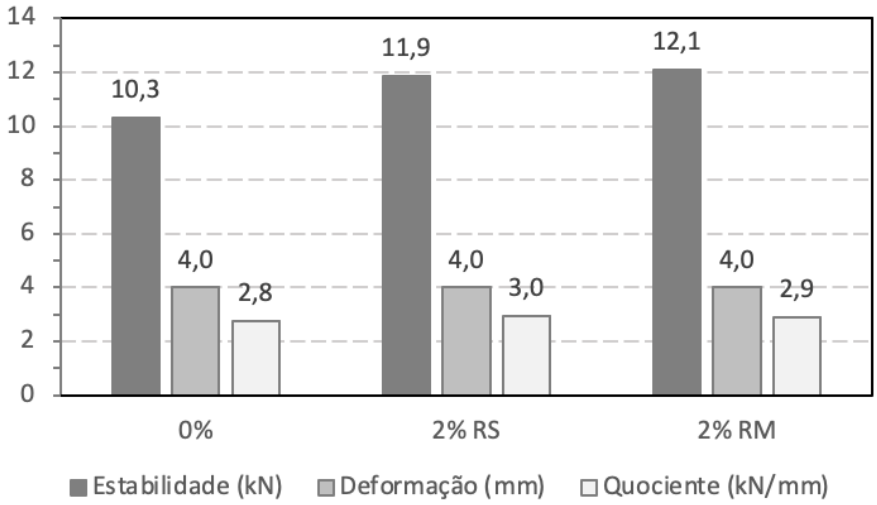


Figura 4 – Variação das características Marshall

Em geral, a incorporação de resíduos de membranas de impermeabilização na mistura betuminosa teve resultados positivos nas propriedades volumétricas e nas características Marshall, embora a deformação e a porosidade tenham ficado no limite dos intervalos especificados. Isto reforça a ideia de que a presença do resíduo não afeta o comportamento da mistura betuminosa, desde que garantida uma correta formulação. A taxa máxima de incorporação dos resíduos de membranas de impermeabilização na mistura betuminosa recomendada, atendendo ao estudo realizado, foi de 2%. O estudo permitiu assim validar a incorporação de resíduos de membranas de impermeabilização por via seca em misturas betuminosas de pavimentação.

3.2 INFLUÊNCIA NO BETUME

Da mistura betuminosa com e sem resíduo simples procedeu-se à recuperação de betume que, em conjunto com o betume original 35/50, foram submetidos aos ensaios apresentados em 2.2. As figuras seguintes apresentam os resultados obtidos para a penetração (Figura 5), temperatura de amolecimento (Figura 6) e viscosidade dinâmica para a temperatura de 90°C (Figura 7). No caso da viscosidade dinâmica, o Quadro 3 apresenta os resultados da curva de viscosidade dos betumes a diferentes temperaturas: 90, 100 e 110°C. Para o betume recuperado da mistura betuminosa com resíduo simples, o ensaio foi realizado apenas a 90°C, pois o valor estava próximo do limite de deteção do equipamento. A análise dos resultados centrou-se, portanto, nesta temperatura conforme se representa na Figura 7. Nas figuras e quadro, a identificação dos betumes é a seguinte: betume recuperado sem resíduo (BR1 (S/R)); betume recuperado com resíduo (BR2 (C/R)); e betume original 35/50 (BET 35/50).

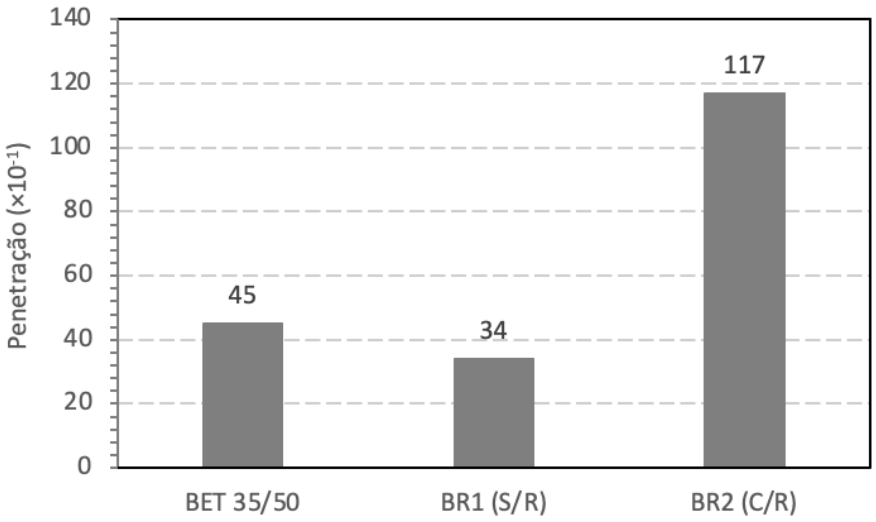


Figura 5 – Variação da penetração

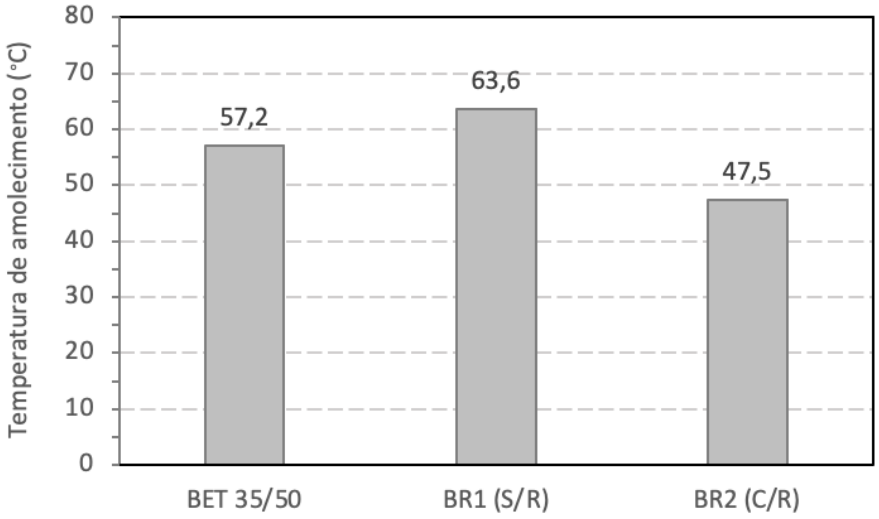


Figura 6 – Variação da temperatura de amolecimento

Da análise da Figura 5, é possível concluir que o betume original exibiu uma penetração dentro dos intervalos definidos pela sua especificação. Por outro lado, o betume recuperado da mistura betuminosa sem resíduo apresentou uma penetração abaixo do limite superior do intervalo, indicando um envelhecimento devido ao aquecimento durante os ensaios. Esse envelhecimento resultou num betume mais rígido e menos suscetível à deformação. Os resultados de penetração para o betume recuperado da mistura com a incorporação de resíduo simples estão acima do limite superior do intervalo definido, indicando uma penetração elevada. Isso sugere que o resíduo simples teve um impacto no betume original, tornando-o mais macio e mais propenso a deformações.

Os resultados da temperatura de amolecimento apresentados na Figura 6 permitem constatar que a incorporação do resíduo simples na mistura betuminosa afetou o betume original, fazendo baixar o seu ponto de amolecimento e tornando-o suscetível a deformações para temperaturas mais elevadas.

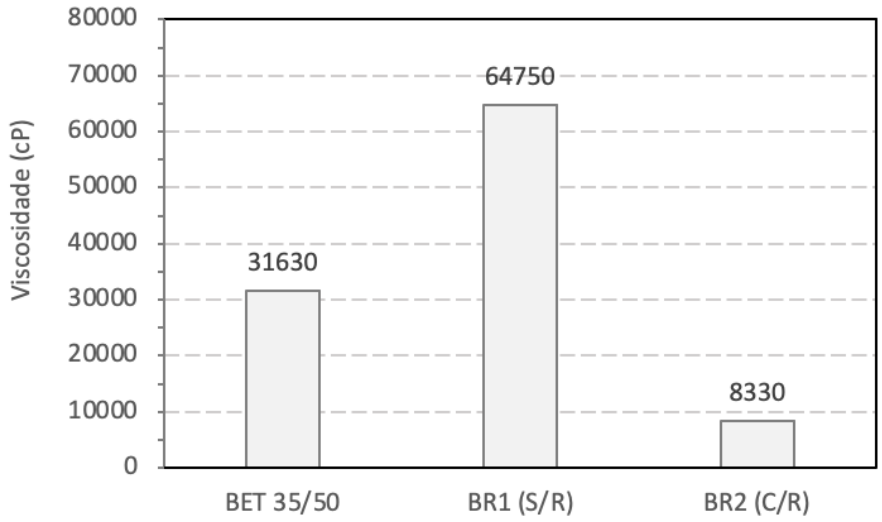


Figura 7 – Variação da viscosidade dinâmica (90°C)

Quadro 3 – Variação das características da mistura betuminosa

Betume	Temperatura (°C)	rpm	cP	%
BET 35/50	90	30	31630	94,9
	100	50	14680	73,5
	110	50	8540	42,7
BR1 (S/R)	90	12	64750	77,7
	100	30	25930	77,8
	110	60	11050	66,3
BR2 (C/R)	90	60	8330	50,0

Relativamente à viscosidade dinâmica (Figura 7), foi constatado que a incorporação do resíduo simples na mistura betuminosa reduziu significativamente a viscosidade do betume original, ou seja, diminuiu a sua resistência ao escoamento e tornou-o mais fluido.

Em geral, foi possível concluir que o resíduo simples afetou o betume original da mistura betuminosa, na medida em que o tornou mais flexível e menos resistente a deformações, especialmente para temperaturas elevadas.

4 CONCLUSÕES

Com o propósito de abordar a questão da eliminação sustentável de resíduos provenientes da indústria de produção de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização, considerando uma perspetiva de economia circular, o artigo apresentou os resultados preliminares de um estudo de investigação sobre a viabilidade de incorporar esses resíduos na produção de misturas betuminosas para pavimentação rodoviária.

Numa primeira fase, foi investigado o processamento e composição dos resíduos para determinar a viabilidade de sua incorporação em misturas betuminosas por via seca. Os resíduos utilizados no estudo foram compostos principalmente por betume modificado, polímeros, armaduras e acabamentos em filme plástico ou granulado de ardósia. Pelo facto do maior constituinte do resíduo ser betume, isso confere ainda maior viabilidade à sua incorporação em misturas betuminosas.

Posteriormente, numa segunda fase, foi realizado um estudo numa mistura betuminosa AC 20 reg 35/50 (MB) para estabelecer a percentagem ideal de resíduo a ser incorporada por via seca. Com base nos vários ensaios realizados em laboratório para avaliação das propriedades volumétricas e características Marshall, para várias taxas de incorporação do resíduo, foi possível analisar o desempenho das misturas betuminosas, bem como a influência do resíduo no betume utilizado na mistura betuminosa. Os ensaios mostraram que 2% de resíduo, relativa à massa total da mistura betuminosa, foi a incorporação máxima considerada adequada por continuar a garantir os requisitos da mistura betuminosa na sua formulação inicial. Atendendo à quantidade de resíduo com origem no fabrico que é gerada anualmente em Portugal, a sua incorporação em misturas betuminosas permitirá o seu fácil e rápido consumo, resolvendo um problema atual da indústria de produção de membranas de impermeabilização e podendo até constituir vantagem para a indústria de pavimentação rodoviária. De notar que 2% foi a máxima incorporação recomendada, mas a viabilidade provada no estudo continuará a ser garantida para percentagens menores a definir em cada caso (obra rodoviária).

O estudo foi realizado em vários tipos de resíduos (resíduo simples e resíduo misto). Para ser possível a sua incorporação por via seca nas misturas betuminosas, os resíduos foram processados por meio de corte manual e trituração efetuada em moinhos para corte de alimentos. Este processo foi viável à escala laboratorial. Contudo, em trabalhos futuros será necessário analisar meios mais adequados à trituração dos resíduos a uma escala industrial.

Em trabalhos futuros, estando alguns já em curso, será aprofundado o estudo de avaliação do efeito da presença do resíduo noutras características de desempenho das misturas betuminosas como, por exemplo, na rigidez e fadiga. Também serão incluídos na investigação outros tipos de misturas betuminosas, como é o caso de misturas betuminosas para camadas de desgaste. Também será importante que a investigação no futuro venha a abranger a viabilidade de utilização de resíduos com origem em membranas de impermeabilização em fase de aplicação (sobras de materiais, eliminação de materiais com deficiente colocação), bem como após o fim de vida útil.

Como conclusão final e em resposta à questão formulada no artigo, considera-se que o estudo apresentado no artigo confirmou a viabilidade da construção rodoviária ser um destino sustentável aos resíduos de produção de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Alves Ribeiro, S.A. e à empresa Cepsa pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas no estudo (agregados e betume).

O primeiro autor agradece ainda o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade), unidade de investigação registada na FCT na área da Engenharia Civil e pertencente ao Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa. O primeiro autor expressa ainda o seu agradecimento ao Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Ambiente, Instituto Superior Técnico, pelo apoio prestado na realização do programa experimental.

REFERÊNCIAS

Antunes, V., Freire, A.C., Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. Construction and Building Materials, 211:453-469. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258

Estalagem, A. (2010). Qualificação de betumes para a produção de membranas de impermeabilização. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

EWA (2022). Telas de betume flexíveis para impermeabilização de coberturas. EDP: Declaração Ambiental do Produto.

Freire, A.C., Maia, A. (2019). Estado da arte ibero-brasileira sobre a aplicação de agregados de escórias de aciaria em misturas betuminosas. Geotecnia, 146:19-50. https://doi.org/10.24849/j.geot.2019.146.02

Haas, E., Ericson, C., Bennert, T. (2019). Laboratory designed hot mix asphalt mixtures with post-consumer Recycled Asphalt Shingles (RAS) utilizing AASHTO PP78. Construction and Building Materials, 226: 662-672. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.314

Imperalum (2023). Membranas de Impermeabilização. Catálogo disponível em: https://www.imperalum.com/produtos-2/impermeabilizacoes/betume-app-new/

Infraestruturas de Portugal (2014). Caderno de Encargo Tipo Obra: Pavimentação. Características dos materiais. Almada, Portugal.

Neves, J., João, C. (2023). Performance evaluation of steel slag asphalt mixtures for sustainable road pavement rehabilitation. Applied Sciences, 13(9), 5716. https://doi.org/10.3390/app13095716

Neves, J., Lameirão, J., Freire, A.C. (2019). Physical and mechanical properties of warm mix asphalt composed of recycled concrete aggregates. Bituminous Mixtures and Pavements VII.

NP EN 1426 (2017). Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da penetração com agulha. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 1427 (2017). Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da temperatura de amolecimento - Método do Anel e Bola. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 12591 (2011). Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 12697-3:2013+A1:2018 (2013). Bituminous mixtures – Test methods – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 12697-8 (2018). Bituminous mixtures – Test methods – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 12697-30 (2018). Bituminous mixtures – Test methods – Part 30: Specimen preparation by impact compactor. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 12697-34 (2020). Bituminous mixtures – Test methods – Part 34: Marshall test. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

NP EN 13302 (2018). Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. Instituto Português da Qualidade, Almada, Portugal.

Paulo, A. (2023). Investigação sobre a utilização de resíduos de membranas betuminosas de sistemas de impermeabilização na pavimentação de estradas. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Picado-Santos, L., Capitão, S., Neves, J. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials, 247: 118577. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577

Santos, C., Antunes, V., Neves, J., Freire, A.C. (2021). Performance and ageing evaluation of bituminous mixtures with High RAP content. Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020), 33-41.

Shirzad, S., Aguirre, M., Bonilla, L., Elseifi, M. (2018). Mechanistic-empirical pavement performance of asphalt mixtures with recycled asphalt shingles. Construction and Building Materials, 160:687-697. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.114

UNEP (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. United Nations Environment Programme. Nairobi. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095

Yang, J., Ddamba, S., UL-Islam, R., Safiuddin, M., Tighe, S. (2013). Investigation on use of recycled asphalt shingles in Ontario Hot Mix Asphalt: A Canadian case study. Canadian Journal of Civil Engineering. https://doi.org/10.1139/cjce-2013-002

Yu, Y., Yazan, D., Bhochhibhoya, S., Volker, L. (2021). Towards circular economy through industrial symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. Journal of Cleaner Production, 293(126083): 12-13. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126083

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CHARACTERIZATION OF DIABASE SLUDGE FOR OPTIMAL INTEGRATION IN CEMENT-BASED MORTAR APPLICATIONS

María Concepción Pacheco-Menor [a]; Manuel F. C. Pereira [b]; Inês Flores-Colen [a]; Jorge de Brito [a]

[a] CERIS, Civil Engineering, Architecture and Environment Department, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisbon, Portugal concepcion.pacheco@tecnico.ulisboa.pt, ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt, jb@civil.ist.utl.pt

[b] CERENA, Mineral and Energy Resources Engineering Department, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisbon, Portugal mfcp@ist.utl.pt

ABSTRACT

Mortar, the second most widely used construction material, consists of cement, fine aggregate, and water. However, conventional methods of producing cement and sourcing sand are unsustainable. Concurrently, quarrying activities, mineral-asphalt mixes, and dimension stone factories generate fine waste, presenting significant environmental challenges. This fine waste, however, has the potential to serve as fine aggregate or filler in construction, particularly in mortar applications. To capitalize on this potential and mitigate environmental impact, it is essential to characterize thoroughly industrial waste to ensure its suitability for construction use. In this context, the present research focuses on diabase sludge powder, evaluating its appropriateness for mortar applications for the first time. This study involves an in-depth chemical, mineralogical, and physical characterization of diabase sludge from Villar del Rey, Spain. A chemical analysis identified significant amounts of silica, alumina, iron oxide, calcium oxide, and sodium oxide. Mineralogical studies using XRD revealed that diabase sludge predominantly contains plagioclase and amphibole, along with clinoclore, augite, quartz, stilpnomelane, and phlogopite. Stereomicroscopic examination showed a variety of components in the sludge, including wood fibres and slate particles. Wet sieving analysis indicated that only about 3% of particles exceed 475 µm, with over 60% being smaller than 25 µm. A thorough understanding of diabase sludge's properties is crucial to avoid potential drawbacks and enable innovative advancements in construction materials.

Keywords: Diabase sludge, characterization, fine aggregate, cement, mortar

1 INTRODUCTION

Enhancing the comprehension of mechanisms, such as the distinction between natural sand and fine aggregates or filler replacements, and exploring the substitution of cement with fine powders, demands a thorough examination of both physical and chemical properties. Proper characterization of raw materials is essential for comparing new findings with the literature and generating innovative ideas. The industrial and economic development surge has triggered a rise in construction activities, requiring diverse building materials. Mortar, the second most utilized construction material, conventionally comprises cement, fine aggregate, and water (Chouhan et al., 2019). However, the current methods of cement manufacturing and sand extraction are unsustainable.

Conversely, quarry operations, mineral-asphalt mixes, and dimension stone factories generate fine waste, often in a dry or wet state, resulting in sludge. The improper disposal of this waste poses a significant environmental challenge stemming from mining and processing activities. Nevertheless, this fine waste holds the potential to serve as an alternative to fine aggregate or filler, supplementing cementitious materials in the construction sector (Khyaliya et al., 2017; Gautam et al., 2018). Therefore, one feasible solution to address these challenges involves utilizing this fine stone waste as a substitute for cement or fine aggregate in cement mortar.

A large variety of stones exists, including marble, limestone, granite, basalt, and diabase, among others. Diabase, prized by architects for its black hue and mechanical attributes, is extensively utilized as aggregate for high-speed train tracks. It belongs to the category of igneous rocks, resulting from intermediate-depth crystallization of magma. Although diabase fine waste's suitability as a construction material in mortar production remains unexplored, studies have examined the viability of granite and basalt fine waste as replacements for fine aggregate or filler in cement mortar.

Granite, a plutonic igneous rock, predominantly comprises alkaline feldspars (orthoclase, microcline, perthite, and albite) and quartz, in its mineral composition. The chemical constituents of granite primarily include silica (SiO_2) and aluminium oxide (Al_2O_3). The morphology and texture of granite fine waste crucially impacts mortar rheology (de Acevedo et al., 2019). Mortars composed entirely of granite powder as sand may exhibit irregularities in squeeze-flow curves due to heightened internal friction, attributable to the particles' irregular morphology. In opposition, mortars predominantly composed of fine granite waste may show reduced penetration rates owing to the challenging initial movement facilitated by grain shape.

Sharma and Vyas (2023) observed that the fineness of granite fine waste used as sand influences the water-cement ratio, with increased fineness requiring more water to achieve the target flow. Moreover, the predominance of fine particles in granite fine waste contributes to heightened water demand, as highlighted by the particle size distribution curve (Gupta and Vyas, 2018). Fineness also affects properties such as tensile bond strength between brick and mortar and shrinkage. Excessive incorporation of granite fine waste may diminish tensile bond strength by penetrating into the brick instead of forming cement hydration products, thus weakening the interface (Sharma and Vyas, 2023).

Basalt, a mafic extrusive rock, represents one of the most widespread igneous rocks, characterized by its volcanic origin, aphanitic fine-crystalline structure, and often compact texture. The chemical composition is determined by silicon (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), and iron (Fe_2O_3) oxides (Dobiszewska et al., 2023). While research on waste basalt powder in mortars is relatively limited compared to granite, Abdelaziz et al. (2014) reported acceptable levels of chloride and sulphate content in basalt fine waste, meeting Egypt code standards.

Properties such as shape and texture have been scrutinized through SEM analysis (Dobiszewska and Beycioğlu, 2017). Basalt's sharp-edged grains negatively impact the workability of cement paste (Laibao et al., 2013). Nonetheless, incorporating up to 20% of basalt fine waste as replacement of sand improves mortar's compressive and flexural strength, primarily due to enhanced particle packing (Dobiszewska and Barnes, 2020). However, increasing the fineness of basalt fine waste as a cement replacement only minimally influences the hydration kinetics and mechanical properties of mortar. Remarkably, substituting cement with basalt fine waste does not significantly alter water demand to achieve normal consistency, attributed to similarities in fineness between basalt and cement particles (Dobiszewska et al., 2019).

Due to the dearth scarcity of studies on using fine waste from diabase stone as a replacement of cement or fine aggregate in cement mortars, the present research endeavours to address this gap by pioneering the characterization of diabase sludge. This study intends to evaluate its suitability for mortar applications, offering potential insights into optimizing construction material utilization.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 SAMPLING AND SAMPLE PREPARATION

The diabase sludge utilized in this investigation was sourced from a dimension stone quarry situated in Villar del Rey, Badajoz, a province within Extremadura, one of Spain's autonomous regions. This sludge emerges during the extraction process, particularly during the cutting of parallelepiped blocks from the raw stone and subsequent squaring operations. Following this, slabs of various thicknesses and sizes undergo cutting, smoothing, and polishing stages. According to the company information, the sludge under examination in this study originated specifically from the block squaring process, utilizing diamond mono-wire techniques (Figure 1).

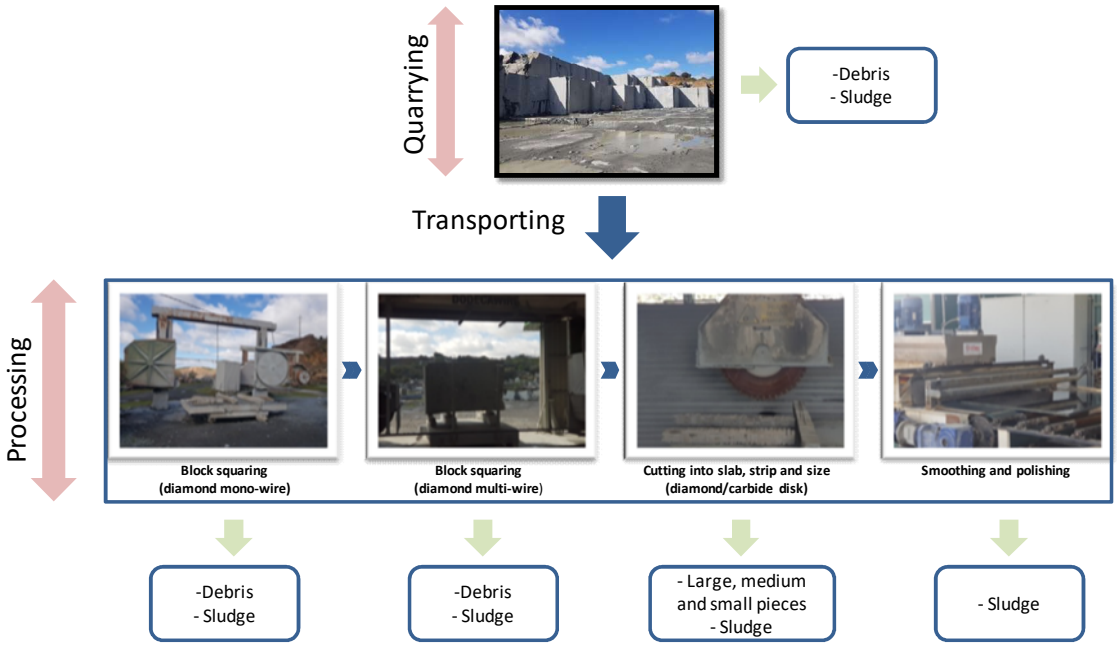


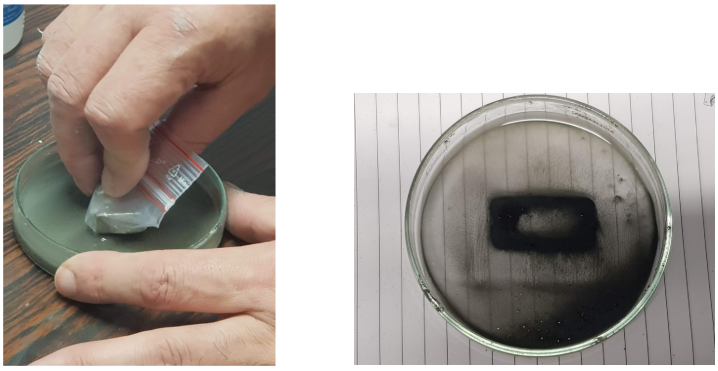
Figure 1 - Transformation process of the diabase at the dimension stone factory: *Villar del Rey Natural Stone* (Spain).

Approximately 60 kilograms of diabase sludge were procured from an earthen settling basin and collected carefully in plastic bags. Due to its nature, diabase sludge tends to clump together, resulting in non-uniform distribution within the mix. Initially containing around 40% water content, the sludge was subjected to a thorough drying process lasting 48 hours at 100 °C in a laboratory oven. Subsequently, the dried sludge underwent hammering and hand-milling to eliminate lumps, yielding diabase powder. To ensure the removal of all residual moisture, the diabase powder was further dried in an oven for 24 hours at 100 °C until reaching a constant weight, prior to characterization.

2.2 MINERALOGICAL COMPOSITION

In addition to standard XRD analysis, a comprehensive examination was conducted, encompassing both full sample and separate phase analyses, including magnetic and non-magnetic components (separation with manual Nd magnet), Figure 2, and different size fractions. This comprehensive approach was adopted to augment the accuracy and depth of the results obtained.

The X-ray diffraction (XRD) analysis was carried out using a Malvern Panalytical X-ray diffractometer model X'Pert PRO, equipped with a Cu Kα radiation X-ray source (λ=1.542Å). The scan step size was 0.033° ranged from 5° to 70° degrees (2θ), with an equivalent collection time of 150 seconds per step. The X-ray tube operated at a fixed voltage of 40 kV and a current of 35 mA. For phase identification, X´Pert Plus software and a PDF4 database were employed. This database facilitated the identification of various crystalline phases present in the sample based on their X-ray powder diffraction patterns.



(a) (b)

Figure 2 - Magnetic phase separation: (a) manual wet magnetic separation process detail; (b) magnetic fraction.

2.3 CHEMICAL COMPOSITION

The chemical composition of diabase powder was taken using a Bruker X-ray fluorescence S4 Pioneer Model spectrometer featuring a 4 kW at room temperature. The measurements were carried out using the device's internal calibration.

2.4 PHYSICAL PROPERTIES

2.4.1 Shape, texture and colour

The shape, texture, and colour of diabase powder particles were assessed using a Nikon SMZZ645 stereomicroscope (Nikon Instruments Inc., Melville, NY) coupled with a MOTICAM 10 MP digital camera. The particles' shape and texture were evaluated in accordance with the classification outlined in BS: 812-1, with Table 1 presenting the terms utilized to define particle shape. The colour

of diabase powder particles was determined using the Munsell colour system, as per the specifications prepared by the Rock-Color Chart Committee (Geological Society of America, 1995).

Prior to the analysis, the sample underwent wet sieving to separate the diabase powder into distinct particle fractions. Subsequently, the separated particle fractions were dried in an oven at 50 °C.

Table 1 - Visual classification of the particles shape (Menor et al., 2019).

Term	Rounded	Irregular	Angular	Flaky	Elongated
Shape					

2.4.2 Particle size distribution and fineness modulus

The determination of the diabase powder's particle size distribution was performed as per EN 933-2. A 300 g sample was considered, and three specimens of diabase powder were analysed. The particles that appeared to be lumpy due to the presence of fibres were carefully separated manually.

2.4.3 Specific density and loose bulk density

The specific density of the diabase powder sample was determined using a Quanta Chrome model SPY-3 helium pycnometer. Four specimens of different particle sizes were evaluated. The specific density of the powder sample as collected and of particle fractions >475 µm, 212-106 µm, and <25 µm was evaluated by three measurements. Following the procedure described in EN 1097-3, loose bulk density was tested using three specimens of diabase powder. Each specimen weighed 150% of the amount needed to fill the 1 l calibrated container.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 MINERALOGICAL COMPOSITION

Figure 3 (a) shows that the minerals present in the diabase industrial waste primarily consisted of tectosilicates such as feldspars (plagioclase-solid solution of two-end members, albite ($NaAlSi_3O_8$) and anorthite $CaAl_2Si_2O_8$)) and amphiboles such as magnesiohornblende ($(Ca_2[Mg_4(Al,Fe^{3+})](Si_7Al)O_{22}(OH)_2)$). Phyllosilicates such as clinoclore ($Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$), stilpnomelane $K_5(Fe,Mg)_{48}[Si_{63}Al_9]O_{168}(OH)_{48}.12H_2O$ and phlogopite $KMg_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$, pyroxene-type inosilicates such as augite ((Ca, Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)(Si,Al)$_2O_6$) and tectosilicates such as quartz (SiO_2) area also present.

These findings did not concur with the mineralogy corresponding to a common fresh diabase rock (plagioclase, pyroxene as essential components and biotite, magnetite, ilmenite, and apatite as accessory components), and revealed a significant presence of phyllosilicate (clay minerals). It is known that clay mineral fines can improve the plasticity or adherence of mortar but can also affect other properties, such as compressive strength. The presence of these minerals may come from weathering or from other local clay-bearing rocks. The dimension stone factory *Villar del Rey, Natural Stone* also produces slate, although to a lesser extent. The squaring processing of slate blocks is made on the same processing line as the diabase stone, so an eventual contamination of this slate rock powder is considered.

In general, the minerals identified in the diabase powder do not have any reactive contributions in the cement formulations. The XRD patterns also indicate no significant amorphous content in the diabase powder, usually recognized by broad reflections in the 15-35° 2Θ range. The XRD pattern for

particles under 25 µm is similar to the overall powder (Figure 3 (b)).

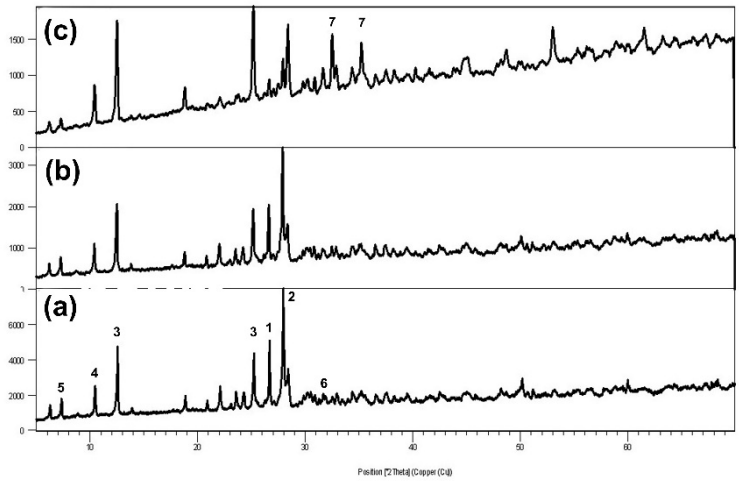


Figure 3 - XRD pattern of the diabase powders: (a) global; (b) under 25 µm; (c) magnetic fraction. Main peaks for mineral phase identification: 1 - quartz; 2 - plagioclase; 3 - clinochlore; 4 - amphibole; 5 - stilpnomelane; 6 - augite; 7 - ilmenite

The XRD pattern presented in Figure 3 (c) indicates magnetic and paramagnetic fractions in the mineralogical composition of diabase. Clinochlore $(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$, magnesiohornblende $((Ca_2[Mg_4(Al,Fe^{3+})](Si_7Al)O_{22}(OH)_2))$ and ilmenite $(FeTiO_3)$ dominate, as well as augite ((Ca, Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)(Si,Al)$_2O_6$), and stilpnomelane $K_5(Fe,Mg)_{48}[Si_{63}Al_9]O_{168}(OH)_{48}.12H_2O$. The presence of specific minerals containing heavy metals, such as Hg, Cd, Pb or Cr, is not observed, so it can be predicted that the release of hazardous components to the environment or human health must be very limited.

3.2 CHEMICAL COMPOSITION

The chemical composition of diabase powder is presented in Table 2. The mass fractions of silica, alumina, and iron oxide (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) dominate, which is typical for diabase rock, and are about 70%. The majority components, SiO_2 (~41 wt.%) and Al_2O_3 (~14 wt.%), Fe_2O_3 (~13 wt.%), were found together with other oxides such as CaO (~7.0 wt.%), Na_2O (~4.7 wt.%), MgO (~3 wt.%), TiO_2 (~2.5 wt.%). By comparing the chemical compositions of diabase powder and granite powder (Table 3), the mass fractions of SiO_2 +Al_2O_3 +Fe_2O_3 are somewhat lower in diabase powder than in granite powder but have a similar NaO_2 content. The granite powder, given its acidic chemistry (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 > 70%) and a high equivalent Na_2O content and small particle size, this type of waste may, like natural pozzolans, exhibit some pozzolanic activity (Medina et al., 2017).

Moreover, Al-Rawas et al. (1998) and Chakchouk et al. (2006) indicated that a total percentage of SiO_2, Al_2O_3, and Fe_2O_3 greater than 50% is sufficient to produce good pozzolanic material. The chemical composition, however, cannot be used as the only criterion to determine the pozzolanic activity of the pozzolanic materials (Saraya, 2011).

Table 2 - Chemical composition of diabase powder.

Oxides	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Diabase	4.67	3.01	13.8	41.21	1.22	0.13	0.505	6.971	2.14	0.201	13.37

Table 3 - Chemical composition (ranges) of granite powder (Gehlot and Shrivastava, 2024; Gupta and Vyas, 2018; Mashaly et al., 2018) and basalt powder (Dobiszewska and Barnes, 2020; Dobiszewska and Beycioğlu, 2017; Unčík and Kmecová, 2013).

Oxides		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Granite	Min.	4.16	0.36	11.96	58.17	0.02	-	3.01	0.41	0.15	-	0.82
	Max.	4.82	0.42	13.5	75.12	0.41	0.39	4.79	3.27	0.37	-	13.35
Basalt	Min.	1.76	4.31	12.68	38.16	0.60	0.02	0.83	13.00	-	0.25	8.87
	Max.	4.11	7.82	15.05	44.59	1.80	0.20	1.39	15.16	1.03	0.26	15.88

On the other hand, the low presence of SO_3 leads to the deduction of the low presence of sulphur contents, which indicates that diabase powder will not affect the failure by expansion of the mortar due to these components, unlike SiO_2 and the possibility of expansion due to alkali-silica reactivity. Despite the presence of MgO and CaO in the diabase powder, these are in a crystalline state, so no expansion is expected due to these two chemical components. The mass fraction P_2O_5 of the diabase powder is higher than that of granite powder (Table 3). The P_2O_5 tends to form phosphoric acid that could reduce the pH of the pore solution in pastes, which negatively affects cement hydration.

3.3 PHYSICAL PROPERTIES

3.3.1 Shape, texture and colour

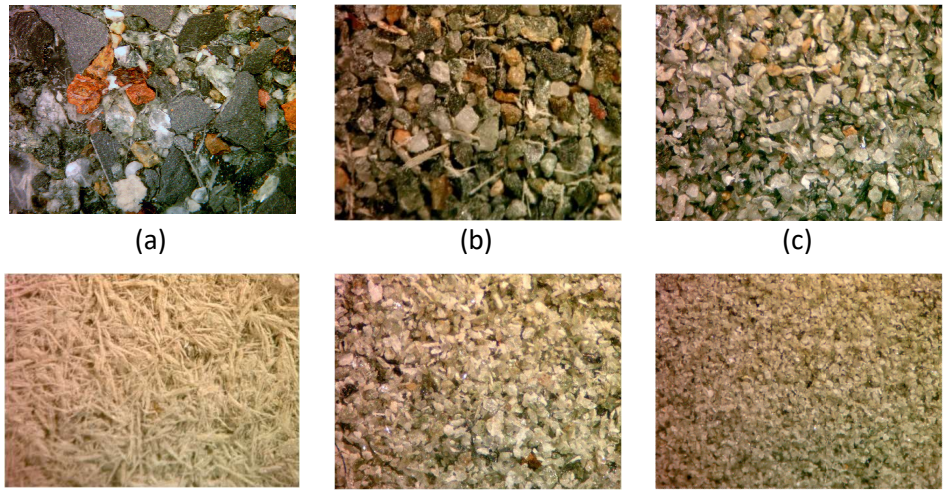
In addition to the petrological character of the diabase powder, its external characteristics are of importance, in particular the particle shape and surface texture. Table 4 shows the wet particle size analysis carried out to evaluate the shape, texture and colour of the diabase powder particles. An additional industrial fibre contamination was identified.

Table 4 - Wet particle size distribution of the diabase sludge powder.

Nº sieve, µm	475	212	106	53	25	<25
Retained wt., %	2.6	1.0	2.2	12.6	22.0	59.5
Fibre wt., %	10.6	27.9	6.1	-	-	-

Figures 5a, b, and c show that the diabase powder evaluated is composed of fine particles from the source stone, fibres, and other mixtures. The presence of fibres (~1 wt.%) is mainly observed in the fractions of the diabase powder, over 475 µm, 212 µm, and 106 mm (Table 3 and Figure 5d).

The fibres may be of organic origin as they can come from the wooden pegs. When the stone is squared, it is wedged with wooden pegs (Figure 6). Stone sludge from the cutting, smoothing and polishing processes of the dimension stone industry may contain additives such as lime, grit or particles derived from the progressive wear of the elements used in the cutting and polishing process (Alaejos et al., 2002). In this stone sludge, wood fibres are derived from the process of squaring. The presence of these organic fibres should not affect the setting or hardening of mortar containing this diabase sludge as it is present in very low quantity.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figure 5 - Stereomicroscope of diabase powder: (a) over 475 µm; (b) 475-212 µm fraction; (c) 212-106 µm fraction; (d) fibres; (e) 106-53 µm fraction; (f) 53-25 µm fraction.

Figure 6 - Wooden pegs used in the squaring of diabase block.

If a visual classification is made according to their degrees of roundness as set out in BS: 812-1, diabase powder presents flaky and irregular (Figure 5a) particles in the fraction > 475 µm. In the fractions, 475-212 µm and 212-106 µm (Figure 5b and c) the diabase powder particles show irregular shape. A rounded shape is observed in the rest of the fractions of diabase sludge, 106-53 µm and 53-25 µm (Figure 5e and f). Diabase powder particles show an appropriate shape and are to be utilized as aggregate to produce mortar. It is known that flaky aggregates decrease the compressive strength of mortar, and rough texture aggregates increase the adhesion of the cement paste. On the other hand, the angular shape of diabase powder can decrease the workability or increase the water required for the same consistency in a conventional mortar when fine aggregate is replaced by diabase powder, as is the case with granite and basalt powder (Gupta and Vyas, 2018; Dobiszewska and Barnes, 2020). Diabase sludge evaluated shows mainly rough texture in the fraction > 106 µm and three different colours: some are dark grey particles (N3), others are orange (10YR 6/6), and a few of them display white colour (N9). The different colours observed in the diabase powder particles are related to the areas with different mineralogical compositions, as shown in the XRD analysis.

3.3.2 Particle size distribution and fineness modulus

The size distribution curves of the three specimens evaluated show that the diabase powder can be classified as filler according to standard EN 13139. This standard establishes the particle size distribution that the aggregate must have to be considered as filler; the contents by mass that pass

through the 2 mm, 0.125 mm, and 0.063 mm sieves must be 100%, 85-100% and 70-100%, respectively. Moreover, the size distribution curves indicate that diabase powder is poorly graded, characterized by small variations in size. It contains diabase powder particles that are almost of the same size. This can limit the solid structure of mortar, but it can be compensated by natural aggregate grading if a partial replacement is foreseen; this is not the case when it is used as a replacement of cement.

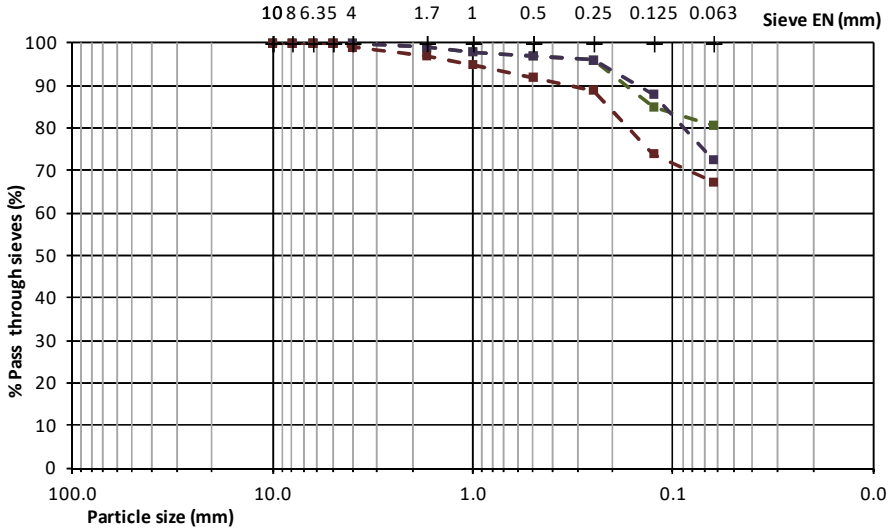


Figure 7 - Size distribution curves of three specimens of diabase powder.

The modulus of fineness varies from 4.40 to 6.20. These values are somewhat higher than those found in the literature for granite powder as a replacement of sand in mortar, 1.02 and 1.48 (Sharma and Vyas, 2023; Gehlot and Shrivastava, 2024).

3.3.3 Specific density

The specific density of aggregates depends on the specific density of the minerals of which they are composed and on the volume of voids. The specific density of aggregate is used to calculate quantities of cement-based material, but the actual value of the specific gravity of aggregate is not a measure of its quality (Neville, 2002). Table 5 shows the specific density of the diabase powder and its different particle size fractions (without fibres) together with the range. The specific gravity of the diabase powder, regardless of the fraction tested, has comparable specific density values to basalt powder and is higher than those of granite powder (Sharma and Vyas, 2023; Dobiszewska et al., 2019). As mentioned above for the aggregates, the minerals and porosity of the powder influence this value. The specific density increases as the fraction of diabase powder decreases.

Table 5 - Specific density of the powder sludge.

Fraction, µm	Total fraction	>475	475-212	212-106	106-53	53-25	<0.25
Specific density, g/cm^3	2964 ± 46	2953 ± 44	-	2963 ± 74	-	-	3051 ± 41

3.3.4 Loose bulk density

The knowledge of the loose bulk density is both of interest when stone powder is to be actually

batched by volume and for production control and transport managing of the stone powder. Despite its interest, there are few data reported in the literature concerning mortars containing rock powder. The loose bulk density of diabase powder was 1085 kg/m^3. Diabase powder has loose bulk density values, no higher density value than granite powder 1368 kg/m^3 (Gupta and Vyas, 2018). The bulk density clearly depends on how densely the aggregate is packed, and it follows that, for a material of a given specific gravity, it depends on the size distribution and shape of the particles: particles all of one size can be packed to a limited extent, but smaller particles can be added in the voids between the large ones, thus increasing the bulk density of the packed material (Neville, 2002). This can explain why the bulk density values are lower despite the higher specific density of granite powder. In addition, the presence of the fibres can create more voids and, therefore, reduce the bulk density.

4 CONCLUSION

As the study progressed, it became evident that the industrial waste comprised not only diabase stone leftovers but also other slate rocks and materials resulting from various transformation activities. This realization underscores the complexity of the waste stream and highlights the diverse range of materials involved in the quarrying and processing operations. By acknowledging this multifaceted nature of the waste, the study gains a deeper understanding of its composition and potential implications for reuse or repurposing. Therefore, the research expanded its scope to encompass a broader examination of the composition and properties of industrial waste, leading to a more comprehensive assessment of its suitability for alternative applications in construction materials.

The properties of diabase industrial sludge were meticulously examined to gauge its potential as a substitute for fine aggregate or cement in cement-based mortars. Interestingly, its mineralogy exhibits a slightly different composition from that of typical diabase stone, attributed to the presence of phyllosilicates, commonly known as clay minerals. Clay mineral fines have been recognized for their capacity to enhance mortar plasticity and adherence, although they may also influence other characteristics, such as compressive strength.

Analysing its chemical composition reveals that the mass fractions of SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3, comprising approximately 70% of the diabase, suggest a potential pozzolanic activity. While most components present in stone waste powder appear to have neutral or beneficial effects on cement-based materials, particular attention is drawn to silicate minerals, known for their propensity to induce alkali-silica reactivity. However, the presence of sulphur is minimal, indicating a negligible impact on mortar expansion due to sulphur compounds, with no chloride compounds detected.

Regarding density, diabase waste powder's specific and loose bulk densities align closely with those of igneous rocks such as granite and basalt. Consequently, employing diabase powder offers the advantages of reduced energy consumption, decreased reliance on non-renewable resources, and enhanced cost-effectiveness compared to conventional fine aggregate or cement. Furthermore, diabase waste powder demonstrates promise as a suitable filler material based on its physical properties.

Despite these promising findings, further investigations are warranted to investigate additional physical properties such as specific surface area, water absorption, pozzolanic activity, and alkali-silica reactivity. This comprehensive approach will facilitate a more thorough understanding of diabase waste powder's potential and enable informed decision-making regarding its application in cement-based materials.

This study is ongoing; therefore, the integration in cement-based mortars will be validated by tests with experimental mortars subsequently, at fresh and hardened states.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the support of the CERIS (UIDB/04625/2020) and CERENA (UIDB/04028/2020) research units from IST-University of Lisbon (Portugal) and the project 101109675-Eco- Mortar 2.0-HORIZON-MSCA-2022-PF-01, supported by the European Commission.

REFERENCES

Alaejos, M. P., Sánchez, M., Sinis, F., and Cano, H. (2008). Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción. CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente. Madrid (España).

Abdelaziz, M. A., El-Aleem, S. A., and Menshawy, W. M. (2014). Effect of fine materials in local quarry dusts of limestone and basalt on the properties of Portland cement pastes and mortars. International Journal of Engineering Research, 3, 1038-1056.

Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., Corcoran, T. C., and Al-Ghafri, K. M. (1998). Properties of Omani artificial pozzolan (sarooj). Applied Clay Science, 13(4), 275-292.

Balasubramanian, J., Gopal, E., and Periakaruppan, P. (2016). Strength and microstructure of mortar with sand substitutes. Građevinar, 68(01.), 29-37.

BS 812-1, Testing Aggregates. Methods for Determination of Particle Size and Shape, British Standards Institution (BSI), 1975.

Chakchouk, A., Samet, B., and Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. Applied Clay Science, 33(2), 79-88.

Chouhan, H. S., Kalla, P., Nagar, R., and Gautam, P. K. (2019). Influence of dimensional stone waste on mechanical and durability properties of mortar: A review. Construction and Building Materials, 227, 116662.

de Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., da Silva Barroso, L., Zanelato, E. B., Alexandre, J., de Castro Xavier, G., and Monteiro, S. N. (2019). Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. Materials, 12(9), 1449.

Dobiszewska, M., Bagcal, O., Beycioğlu, A., Goulias, D., Köksal, F., Płomiński, B., and Ürünveren, H. (2023). Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. Journal of Building Engineering, 106180.

Dobiszewska, M. and Barnes, R. W. (2020). Properties of mortar made with basalt powder as sand replacement. ACI Materials Journal, 117(2), 3-9.

Dobiszewska, M., Pichór, W., and Szołdra, P. (2019). Effect of basalt powder addition on properties of mortar. In MATEC Web of Conferences (Vol. 262, p. 06002). EDP Sciences.

Dobiszewska, M. and Beycioğlu, A. (2017). Investigating the influence of waste basalt powder on selected properties of cement paste and mortar. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245(2), p. 022027. IOP Publishing.

EN 933-2, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 2: Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures, European Committee for Standardization (CEN), 2020.

EN 1097-3, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 3: Determination of loose bulk density and voids, European Committee for Standardization (CEN), 1998.

EN 13139, Aggregates for mortar, European Committee for Standardization (CEN), 2002.

Gautam, P. K., Kalla, P., Jethoo, A. S., Agrawal, R., and Singh, H. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. Construction and Building Materials, 180, 239-253.

Gehlot, M. R. and Shrivastava, S. (2024). Development of rendering mortar from granite cutting waste and impact of accelerated aging environment on its adhesive strength. Construction and Building Materials, 411, 134177.

Gupta, L. K. and Vyas, A. K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. Construction and Building Materials, 191, 155-164.

Khyaliya, R. K., Kabeer, K. S. A., and Vyas, A. K. (2017). Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. Construction and Building Materials, 147, 598-607.

Mashaly, A. O., Shalaby, B. N., and Rashwan, M. A. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. Construction and Building Materials, 169, 800-818.

Medina, G., Del Bosque, I. S., Frías, M., De Rojas, M. S., and Medina, C. (2017). Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca $(OH)_2$ system: Influence of the activation process. Applied Clay Science, 135, 362-371.

Menor, M. C. P., Ros, P. S., García, A. M., and Caballero, M. J. A. (2019). Granulated cork with bark characterised as environment-friendly lightweight aggregate for cement based materials. Journal of Cleaner Production, 229, 358-373.

Neville, A.M., 2002. Properties of Concrete, fourth Ed. Pearson, Prentice Hall.

Ramadji, C., Messan, A., and Preud'Homme, E. (2020). Influence of granite powder on physico-mechanical and durability properties of mortar. Materials, 13(23), 5406.

Rock-Color Chart Committee. (1970). Rock Color Chart: With Genuine Munsell Color Chips. Geological Society of America.

Saraya, M. E. S. (2011). Study the pozzolanic activity of fresh basalt. Journal of Materials Science and Engineering. A, 1(6A), 790.

Sharma, S. and Vyas, A. K. (2023). A study on the use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. Materials Today: Proceedings, 93, 176-181.

Unčík, S. and Kmecová, V. (2013). The effect of basalt powder on the properties of cement composites. Procedia Engineering, 65, 51-56.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MECANISMOS DE EXPANSÃO EM ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO CONTAMINADO POR RESÍDUO DE GESSO: UMA ANÁLISE EXPLORATÓRIA EXPERIMENTAL

Patrícia Krüger[a]; Adriana A.S. Chinelatto[b]; Eduardo Pereira[c]

[a]Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, Ponta Grossa, Paraná, Brasil) pkruger@uepg.br

[b]Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, Ponta Grossa, Paraná, Brasil) adriana@uepg.br

[c]Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, Ponta Grossa, Paraná, Brasil) eduardopereira@uepg.br

RESUMO

Baseado no conceito de sustentabilidade integrado ao uso de materiais de construção civil, torna-se importante entender as consequências de se usar agregados reciclado de concreto (ARCO) contaminado com teores de gesso na produção de compósitos cimentícios. A contaminação do agregado reciclado por gesso é um cenário bastante realista, uma vez que, a separação das frações de gesso provenientes de revestimentos dificilmente ocorre de forma total em canteiros de obras quando do processo de desmonte ou demolição. O objetivo principal deste trabalho é apresentar possíveis efeitos da formação de etringita secundária na matriz cimentícia de argamassas produzidas com ARCO contaminado com resíduo de gesso. Para análise do efeito das reações expansivas elaborou-se argamassas de traço 1:3,2 (uma parte de cimento para 3,2 partes de agregado reciclado de concreto). Foram utilizadas curvas granulométricas diferentes para o agregado miúdo e duas porcentagens de contaminante sendo 0% e 1% de teor de SO_3 (teor corresponde à porcentagem em relação à massa de agregado). Os resultados demonstram que todos os tratamentos podem conter aluminatos e sulfatos disponíveis para a formação de etringita, mesmo os tratamentos sem adição de resíduo de gesso. A granulometria do agregado e o teor de sulfato tiveram influência sobre as propriedades das argamassas. O ambiente de exposição (submerso e ambiente natural) afeta de forma diferente as propriedades das argamassas e em função da saturação da solução e o nível de saturação podendo ter influência sobre a quantidade de cristais de etringita secundária formados, sobre sua morfologia e local de formação. O estudo mostrou que nas argamassas expostas a ambiente submerso (UR de 100%), quanto maior o teor de SO_3, maior a quantidade de etringita secundária formada, nucleando em espaços mais restritos, com cristais de morfologia massiva e de menor dimensão. Neste cenário não se observou tensões internas suficientes para causar fissuras de forma a afetar negativamente o desempenho das argamassas. Quando expostas a ambiente natural (UR<100%), observa-se inicialmente alta retração em todos os tratamentos e queda inicial no desempenho físico e mecânico das argamassas. Quando a solução no interior dos poros está pouco saturada, os cristais formados são maiores e, quando formados em espaços restritos podem causar tensões internas e afetar a durabilidade das argamassas. Em idades mais avançadas não se observa diminuição do desempenho físico ou mecânico das argamassas possivelmente devido ao efeito combinado do relaxamento da pressão de cristalização e densificação de cristais dentro dos poros das argamassas.

PALAVRAS-CHAVE

Agregado Reciclado de Concreto; Resíduo de Gesso; Reações Expansivas; Etringita Secundária

1 INTRODUÇÃO

A utilização de agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma alternativa em substituição ao agregado natural e tem sido uma prática explorada nas pesquisas e relatos da literatura. O RCD pode apresentar características específicas em função de seu processo de beneficiamento e de sua origem, sendo que para o presente artigo propõem-se o cenário bastante realista em que o material de resíduo foi de alguma forma contaminado por gesso quando do seu beneficiamento.

Neste contexto o agregado contaminado com gesso se enquadra como um dos fatores responsáveis pela formação de etringita secundária segundo a visão holística do fenômeno de ataque por sultato interno. O termo “ataque por sulfatos”, segundo Collepardi (2003), significa deterioração do concreto envolvendo qualquer tipo de interação do sulfato com a pasta de cimento, independentemente da temperatura de cura e da fonte de sulfato.

Entre as teorias que exploram as causas das expansões observadas no ataque interno por sulfato, encontra-se a que considera que a principal causa seria a formação de produtos expansivos durante o processo de ataque. Esta expansão pode ser resultado do volume gerado pelos produtos expansivos ou causada pela pressão de cristalização exercida nas paredes de poros, devido a formação de etringita (Huang; Wang; Zhuc, 2024; Ikumi e Segura, 2019; Müllauer et al. 2013; Scherer, 2004; Shan et. Al., 2024; Wang; Wilson; Scrinever, 2023; Yu et al. 2013).

A força expansiva desenvolvida durante o ataque por sulfato é determinada principalmente pelos locais de crescimento da etringita na microestrutura e não somente pelo volume total de etringita formada. Para que ocorra a expansão devido à pressão de cristalização são necessárias duas condições: o cristal de etringita deve formar-se a partir de uma solução supersaturada; e este crescimento deve ocorrer em condições confinadas, de modo que as forças expansivas nas paredes do poro consigam converter energia química em trabalho mecânico (Huang; Wang; Zhu, 2024; Ikumi e Segura, 2019; Wang; Wilson; Scrinever, 2023; Yu et al. 2013). Existe uma relação inversa entre a pressão exercida pelo cristal e o tamanho do poro, então os cristais que crescem em poros pequenos (da ordem de dezenas de nanômetros) geram pressões expansivas mais significativas (Wagner et. Al., 2022; Yu et al. 2013). O crescimento dos cristais em poros maiores gera uma tensão de cristalização menor, insuficiente para gerar fissuras e ainda proporcionam a colmatação dos poros com consequente aumento da resistência e redução da absorção (Pereira, 2018).

Para que ocorra a fissuração da matriz devido à formação de cristais de etringita secundária, é preciso que a tensão exercida pelo cristal sobre a parede do poro seja superior à resistência de tração da matriz. Isto pode ocorrer devido à pressão de cristalização (crescimento do cristal de etringita) e pela pressão de dilatação (elevada adsorção de água e estado de microcristalização) (Müllauer et al. 2013; Wagner et. Al., 2022). A concentração do soluto do poro menor é maior que a concentração do soluto do poro maior e há uma força motriz que faz com que os cristais menores se dissolvam em favor dos cristais maiores. Este soluto tende a se difundir para o poro maior, fazendo com que cristais menores se dissolvam e cristais maiores cresçam, ocorrendo assim o relaxamento da pressão de cristalização (Scherer, 2004; Shan et. Al., 2024).

Diante do exposto este artigo tem como objetivo principal apresentar possíveis efeitos da formação de etringita secundária na matriz cimentícia de argamassas produzidas com agregados reciclado de concreto - ARCO contaminado com resíduo de gesso.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A presente pesquisa foi elaborada com o objetivo de avaliar a interação entre os compostos do cimento e o agregado reciclado de concreto ao ser contaminado com teores de sulfato de cálcio. Como variáveis independentes do estudo tem-se a composição granulométrica (Agregado A e Agregado B), porcentagem de contaminante de sulfato de cálcio (0% e 1%) e cinco idades de controle (3, 7, 28, 180 e 360 dias). Como variáveis dependentes do estudo tem-se a variação dimensional, resistência à compressão, absorção por imersão e alterações microestruturais (tipologia e classificação dos cristais).

Para análise de propriedades físicas e mecânicas das argamassas foram moldados cinco corpos de prova para cada traço e por idade de avaliação dos resultados. Para o ensaio de variação dimensional foram produzidos prismas de argamassa com dimensões de (25 x 25 x 285) mm e para os demais ensaios, corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O presente estudo compreende um total de 04 (quatro) tratamentos combinando granulometria e teor de sulfato adicionado como contaminante.

No agregado miúdo de resíduo, foram feitas as seguintes análises: massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2009a), massa unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006), índice de vazios NBR NM 45 (ABNT, 2006), e teor de argamassa aderida. O procedimento de ensaio para determinação do teor de argamassa aderida consiste na dissolução da pasta de cimento aderida quando o agregado reciclado é imerso em uma solução de ácido clorídrico (Tam *et al.* 2007). O ensaio precisou ser adaptado para realização com agregado miúdo, pois os autores realizaram para agregado graúdo e se não adaptado poderia ocorrer perda da parcela fina no processo (Kruger, 2021).

Para a análise em argamassas, foram realizados estudos no estado endurecido de variação dimensional NBR 15261 (ABNT, 2005), absorção por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009b) e resistência à compressão axial NBR 7215 (ABNT, 2019). Para complementar as análises, as argamassas no estado endurecido também foram caracterizadas por DRX e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro Rigaku Última IV, instalado no C-LABMU-UEPG. O passo adotado no ensaio foi de 0,02º e tempo por passo de 1 s, o intervalo de varredura foi de 5º e 75º (2θ). Utilizou-se a radiação Cu-Kα (40 kV, 30 mA) e uma fenda divergente de 1º. As fases químicas minerais foram identificadas por comparação com os padrões do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). As imagens em microscopia foram obtidas com o uso de um microscópio FEG SEM, Tescan, Mira 3, com detectores SE, BSE e microssonda analítica de raios X Oxford X-Maxn 50 (EDS), instalado no C-LABMU da UEPG, com metalização superficial das amostras em ouro. Para a avaliação da resistência à compressão axial foi utilizada uma prensa marca SOLOCAP, Modelo CI de 100 toneladas-força de capacidade, com controle de velocidade de aplicação de carga.

Todos os corpos de prova, sejam cilíndricos ou prismáticos, foram submetidos à cura úmida por 28 dias após a desmoldagem (UR de 100%). Finalizado o prazo de 28 dias, as amostras foram deixadas em ambiente externo expostas ao envelhecimento natural até a data de realização dos ensaios (UR<100%). Para a análise estatística dos dados foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) e utilizado o Teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

2.2 OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS

Foi definido um traço constante para todas as argamassas moldadas na pesquisa, sendo 1 (uma) parte de cimento para 3,2 partes de agregado miúdo e relação água/cimento (a/c) de 0,60. Conforme

recomendado pela NBR 15.116 (ABNT, 2021), para agregados reciclados é necessário considerar a etapa de pré-umedecimento, porém este teor de água utilizado para esta etapa não foi considerado para o cálculo da relação a/c.

A consistência das argamassas neste trabalho foi mantida constante, com índice de consistência médio de 250mm ± 5mm. Para obtenção deste índice constante, sem alteração da relação água-cimento, foi feita a dosagem de aditivo superplastificante de policarboxilato necessário em cada traço produzido. Para a produção das argamassas foi necessária a transformação do teor de SO_3 em teor de gesso dihidratado, pois este foi o material adicionado efetivamente. Para o teor de 1% de SO_3, considerou um teor de 2,15% de gesso hidratado. O consumo de materiais para um metro cúbico de argamassa, considerando o teor de ar aprisionado, está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de materiais - argamassas produzidas com ARCO, em kg/m³

Materiais	Argamassa			
(kg/m³)	Agregado A 0% SO3	Agregado A 1% SO3	Agregado B 0% SO3	Agregado B 1% SO3
Cimento CP-II F*	369,39	348,15	380,31	375,27
Agregado	1300,26	1225,48	1338,68	1320,96
Gesso	0,00	23,95	0,00	25,82
Água (a/c)	221,64	208,89	228,18	225,16
Água de umedecimento	53,78	50,69	55,37	54,64
Aditivo	7,39	8,36	7,80	8,82

*Obs: no cálculo do consumo de cimento já foi descontado o volume correspondente ao teor de ar aprisionado na argamassa.

A produção das argamassas foi seguindo o procedimento de mistura citado na NBR 7215 (ABNT, 2019). O aditivo foi adicionado à água de amassamento e o resíduo de gesso foi misturado e homogeneizado com a parcela cimentícia, com o objetivo de melhor distribuição das partículas na pasta de cimento antes da colocação dos agregados na mistura. Foi realizada a etapa de pré-umedecimento do agregado de resíduo de construção conforme recomenda a NBR 15.116 (ABNT, 2021).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland composto por clínquer e fíller carbonático classificado como CPII-F 32 (NBR 16697:2018), sendo equivalente ao cimento CEM II/B-L 32N de acordo com a norma europeia (EN197-1:2011), e os agregados utilizados são RCD enquadrados como Agregados de Resíduo de Concreto (ARCO) (ABNT, 2021). Os dados de caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 2. Verificou-se que os agregados não apresentaram diferença estatística entre os valores de massa específica, indicando que a granulometria não é um fator que afete a densidade dos agregados de resíduo de concreto estudados na pesquisa. Porém quanto ao empacotamento de partículas, foi possível observar que o agregado de maior granulometria (Agregado B) apresentou maior massa unitária e menor índice de vazios, indicando um melhor empacotamento dos grãos.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto

Agregado	DMC (mm)	MF	MU (g/cm³)	ME (g/cm³)	Índice de vazios (%)
Agregado A	4,8	2,55	1,39[b]	2,38[a]	41,80[a]
Agregado B	6,3	3,96	1,45[a]	2,41[a]	39,79[b]

Nota: Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente no Teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Na Figura 1 é apresentado a correlação entre a porcentagem retida individual dos agregados e as aberturas das peneiras. É possível observar que o agregado A apresenta maior quantidade de partículas < 1mm, enquanto o agregado B apresenta maior quantidade de partículas > 1mm. Materiais mais frágeis se fragmentam de forma mais fácil e se concentram em frações de menor dimensão. Esses materiais normalmente são compostos por materiais mais porosos, como argamassa aderida.

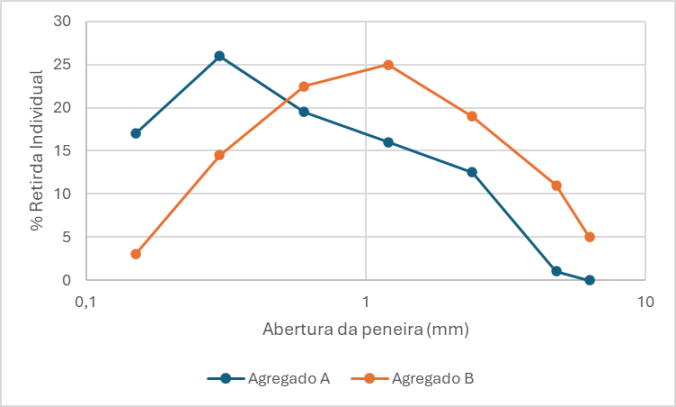


Figura 1 – Porcentagem retida individual dos agregados

O teor de argamassa aderida nos agregados de resíduo de concreto foi determinado por faixa de fração e está apresentado na Tabela 3. Observa-se que o Agregado A apresentou teor de argamassa aderida (28,7%), maior que o Agregado B (26,5%), confirmando o citado na literatura, que afirma que agregados de maior granulometria apresentam menor teor de argamassa aderida.

Tabela 3 – Teor de argamassa aderida (TAA) em cada fração granulométrica

Peneira (mm)	0,15	0,3	0,6	1,2	2,4	4,8	6,3	9,5
TAA (%)	27,3	38,9	32,7	36,4	15,2	7,9	2,0	2,8

A Tabela 4 apresenta o potencial de sulfatos e aluminatos que estão presentes nos agregados, sendo que uma parcela pode estar disponível no sistema para promover as reações químicas e formação de cristais de etringita. Os dados são apresentados em função dos tratamentos trabalhados na pesquisa considerando os diferentes teores de resíduo de gesso adicionado como contaminante.

Tabela 4 – Potencial de sulfato e aluminato presente nos materiais que compõem as argamassas

Tratamentos	Percentual de óxidos por m³ de argamassa	
	Aluminatos (Al2O3)	Sulfatos (SO3)
ARCO – 0% SO3	7,21	1,52
ARCO – 1% SO3	7,10	2,28

Os resultados demonstram que todos os tratamentos podem conter aluminatos e sulfatos disponíveis para a formação de etringita, mesmo os tratamentos sem adição de resíduo de gesso. Os sulfatos disponíveis podem estar associados ao gesso incorporado ao cimento no processo de fabricação ou aos compostos cimentícios hidratados presentes na argamassa aderida ao grão de ARCO.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise do efeito das reações expansivas elaborou-se argamassas produzidas com resíduo de concreto (ARCO) em duas granulometrias distintas (Agregado A e Agregado B), sendo analisado o comportamento das argamassas no estado endurecido. Foi procedida análise comparativa entre os tratamentos com diferentes teores de SO_3, sendo eles 0% e 1%. Estes teores foram adicionados sob a forma de sulfato de cálcio dihidratado (gesso reciclado).

A Figura 2 apresenta a variação dimensional das barras com dados de análise entre as datas de 3 a 360 dias de idade. Nas primeiras idades em ambiente totalmente submerso (UR de 100%) os tratamentos com agregados de menor granulometria apresentaram pequena expansão, com mudança de comportamento a partir de 28 dias (UR<100%), onde apresentaram retração acentuada. Os tratamentos com agregados de maior granulometria apresentaram retração a partir de 7 dias, se intensificando com a mudança de ambiente de exposição. A retração pode estar relacionada com a quantidade de água livre na mistura, sendo que, quanto maior a granulometria, maior a quantidade de água livre e maior a retração.

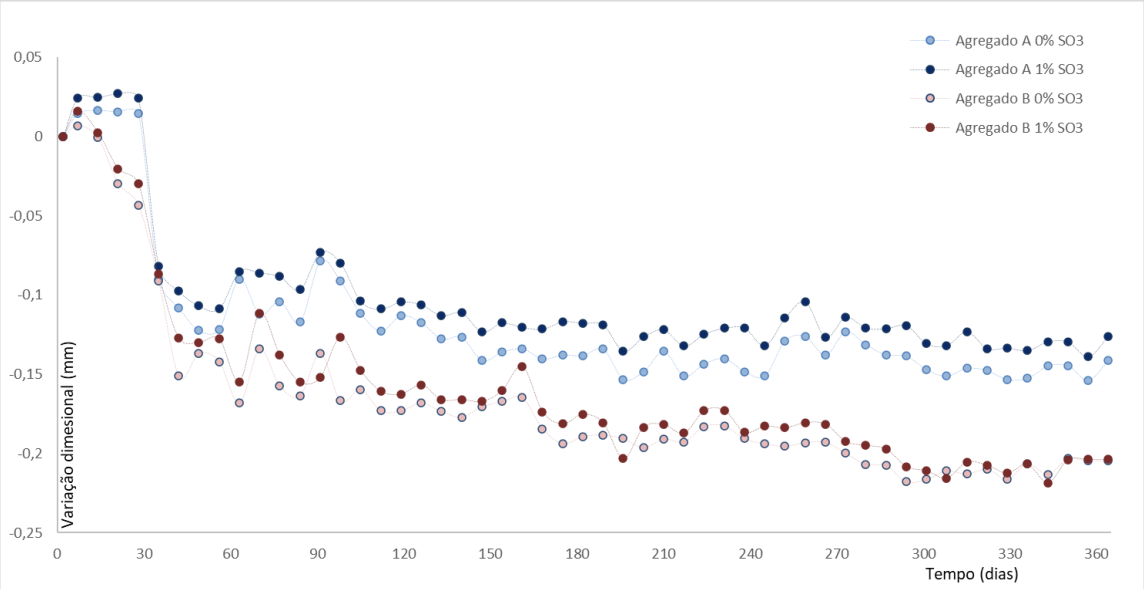


Figura 2 – Variação dimensional das barras com dados de análise entre as datas de 3 a 360 dias de idade

A maior expansão foi para a argamassa produzida com Agregado A e 1% de SO_3, que por ter menor granulometria, tem maior disponibilidade de argamassa aderida que contém núcleos de hidratação retardados e hidratos conectados, levando a uma solução mais saturada de íons sulfato. A Figura 3 apresenta a imagem de poros com a presença de cristais de etringita em formato aglomerado, bem como distribuído na matriz da parede interna do poro. Esta imagem é referente ao tratamento com a maior expansão aos 28 dias (Agregado A com 1% SO_3).

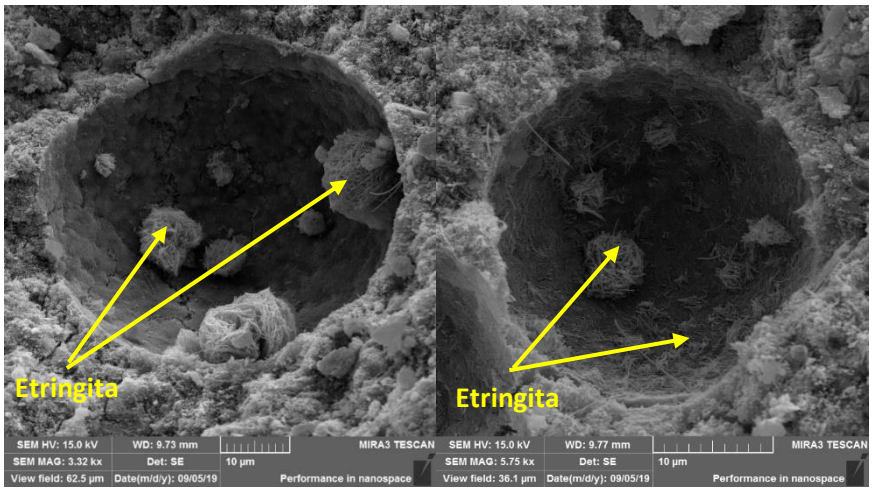


Figura 3 – Micrografia de poros com a presença de cristais de etringita em formato aglomerado

Quanto maior a supersaturação, maior a probabilidade de formação de pequenos cristais de etringita secundária em poros menores (pressão de cristalização). Outro efeito que pode estar ocorrendo é o aumento de volume ocupado pelos novos cristais em relação aos compostos de origem e aumento da adsorção de água entre os cristais (pressão de dilatação), causando assim o efeito de expansão.

A partir de 28 dias (mudança do meio de exposição) todos os tratamentos apresentaram retração das barras e quanto maior a granulometria maior foi a retração observada. A retração observada nesta fase pode ser considerada retração por secagem, pois após a idade de 28 dias, as argamassas saíram de um ambiente submerso e foram expostas à umidade ambiente, inferior a 100% da UR e então começaram a perder água e retrair.

Quando ocorre a secagem (UR local abaixo de 100 %), um menisco se forma em cada poro e diminui a pressão capilar do líquido nos poros. O líquido diminui primeiro nos poros maiores para depois ser eliminado dos poros menores, então é mais provável que os cristais de etringita secundária formados se precipitem nos poros menores (Scherer, 2004). Para que ocorra a fissuração da matriz devido à formação de cristais de etringita secundária, é preciso que a tensão exercida pelo cristal sobre a parede do poro seja maior que a resistência de tração da matriz. Isto pode ocorrer devido à pressão de cristalização e pela pressão de dilatação. Em ambos os casos é mais provável que ocorra a formação de fissuras com perda de resistência se pequenos cristais de etringita secundária se formarem em espaços restritos (Müllauer *et al.* 2013).

A Figura 4 apresenta a imagem de poro menor que 50 µm com aglomerados de etringita (a) e a formação de cristais aciculares de etringita na matriz cimentícia (b). Em ambas as situações observa a formação de cristais de etringita em espaços restritos.

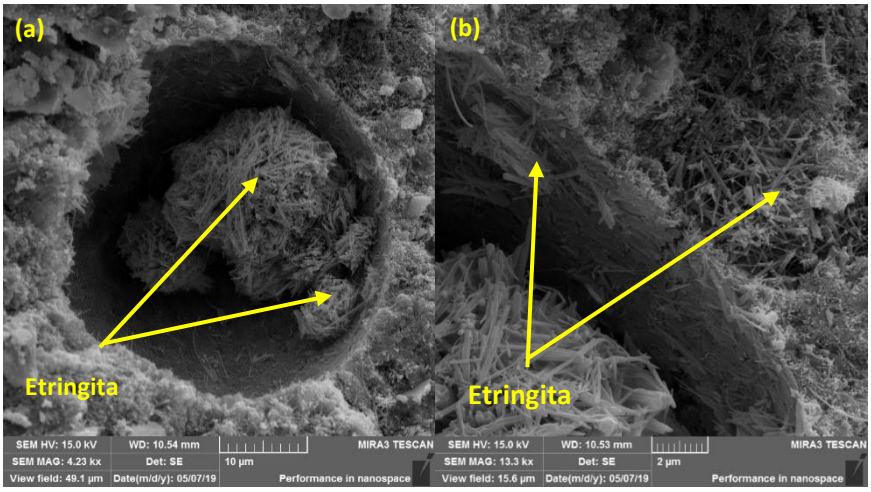


Figura 4 – Micrografia de poro com aglomerados de etringita (a) e a formação de cristais aciculares de etringita na matriz cimentícia (b)

Quanto ao comportamento mecânico e físico das argamassas (Figura 5), observa-se melhora do desempenho ao longo do tempo nas primeiras idades. Porém aos 28 dias, com a mudança do meio de exposição, ocorreu queda do desempenho com a redução da resistência mecânica e aumento da absorção.

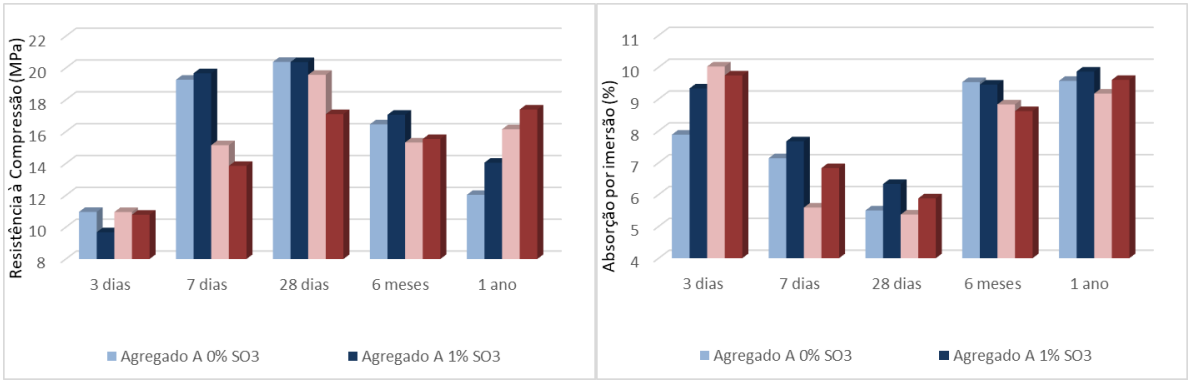


Figura 5 – Comportamento mecânico e físico das argamassas

O conjunto de fatores observado nas primeiras idades e após 28 dias, são indicativos de que a mudança do ambiente de exposição e a retração observada causaram fissuras internas na argamassa que comprometeram o desempenho físico e mecânico. Com idades mais avançadas (360 dias) observa-se que quase todos os tratamentos apresentaram uma estabilização do desempenho mecânico e físico, exceção foi para a resistência mecânica das argamassas produzidas com o Agregado A (menor granulometria) que manteve um cenário de queda de resistência à compressão.

Para melhor compreensão de como esse comportamento pode estar associado à quantidade e local de formação de etringita secundária na matriz cimentícia será apresentada uma análise combinada entre a intensidade dos picos de etringita (2θ = 9,10º) obtidos dos ensaios de DRX e micrografia das argamassas.

A Figura 6 apresenta a intensidade de pico de etringita (2θ = 9,10º) nas idades de 7 e 28 dias, para os tratamentos analisados. Lembrando que nestas datas as argamassas se encontram em ambiente de exposição totalmente submersos (UR de 100%).

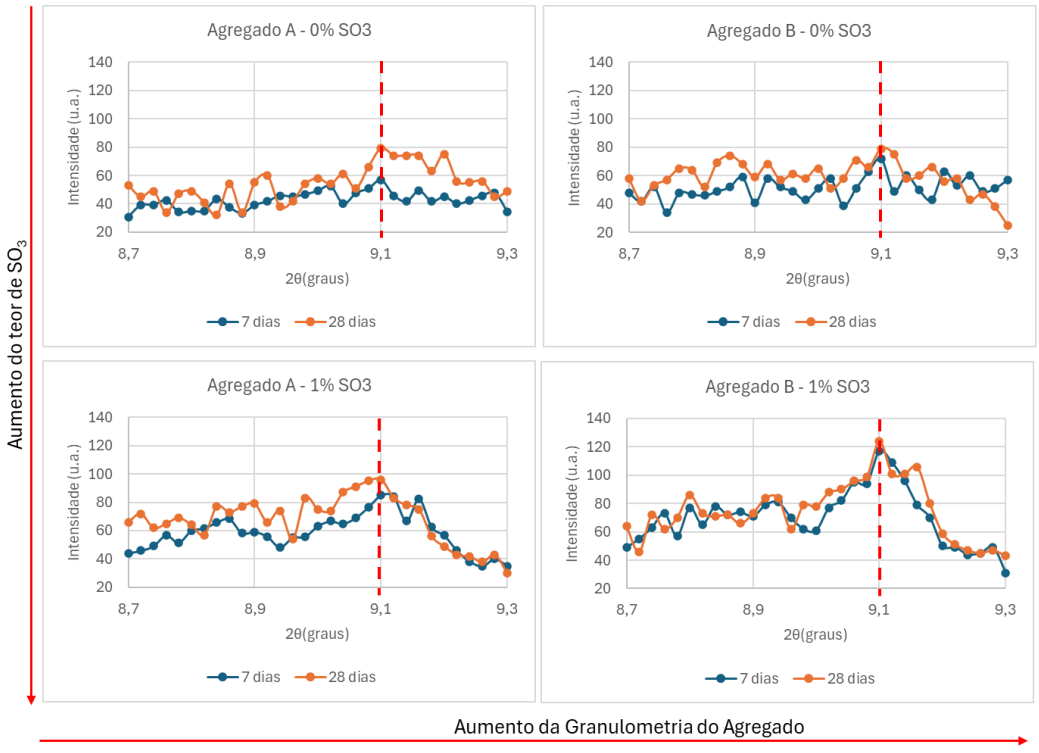


Figura 6 – Intensidade de pico de etringita (2θ = 9,10º) nas idades de 7 e 28 dias

Observou-se aumento da intensidade de pico com o aumento do teor de SO_3. A granulometria e a temporalidade também influenciaram na intensidade de pico de etringita observada. O tratamento com menor intensidade de pico de etringita no período entre 7 e 28 dias foi o que contém agregado de menor granulometria e 0% de teor de SO_3 (Figura 7a) e o tratamento com maior intensidade de pico no período de análise foi o que contêm agregado B (maior granulometria) e com maior teor de sulfato (1% SO_3) (Figura 7b).

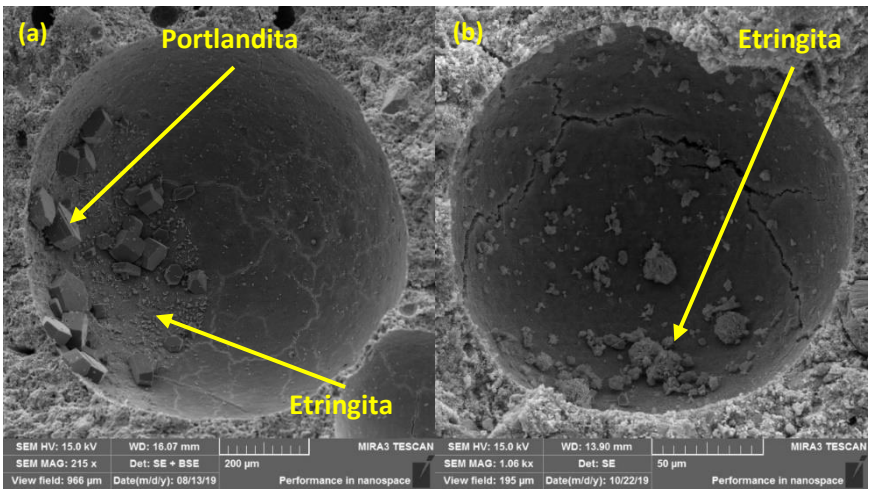


Figura 7 – Micrografias dos tratamento Agregado A/0% SO_3 (a) Agregado B/1% SO_3 (b)

A Figura 8 apresenta a intensidade de pico de etringita (2θ = 9,10º) nas idades de 28 e 180 dias, para os tratamentos analisados. Lembrando que nestas datas as argamassas mudaram de ambiente de exposição do totalmente submerso com UR de 100% (28 dias) para o ambiente de envelhecimento natural de UR<100% (180 dias).

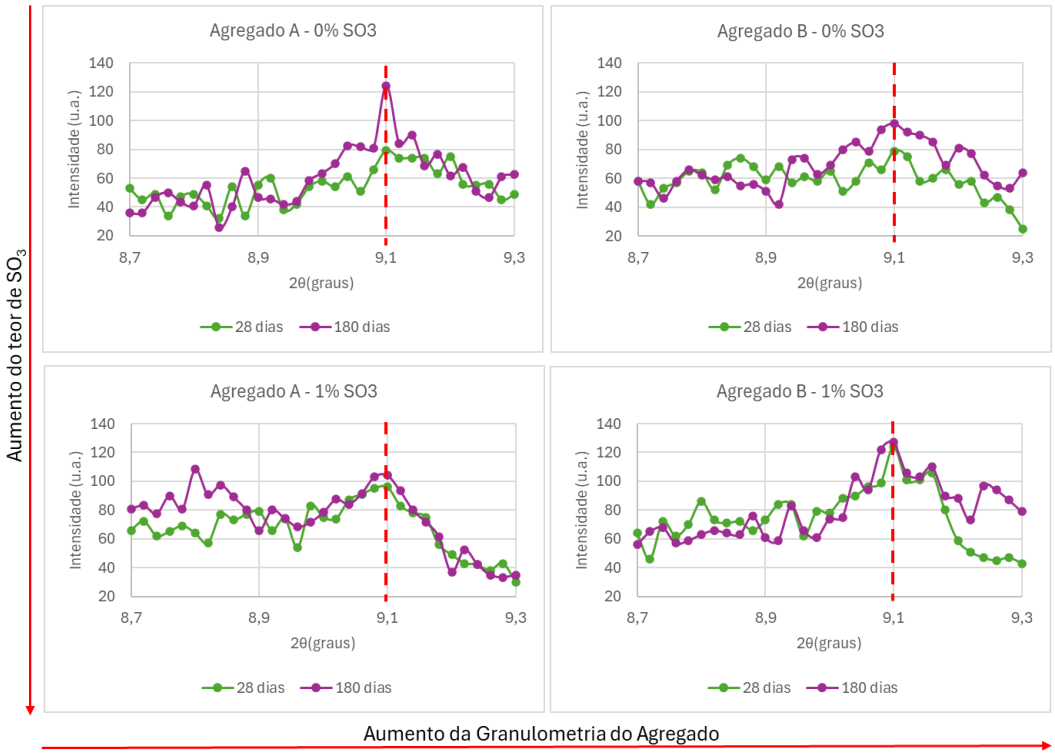


Figura 8 – Intensidade de pico de etringita (2θ = 9,10º) nas idades de 28 e 180 dias

Observou-se aumento da intensidade de pico com a mudança de granulometria, temporalidade e à medida que o teor de SO_3 aumenta. Neste período de análise o tratamento que apresentou menor intensidade de pico foi o que continha 0% de SO_3 aos 28 dias de idade. Os tratamentos com maior intensidade de pico foi o observado aos 180 dias de idade, com agregados de maior granulometria e maior teor de sulfato. A Figura 9 apresenta micrografias da argamassa referente ao tratamento com Agregado B e 1% de SO_3 aos 180 dias.

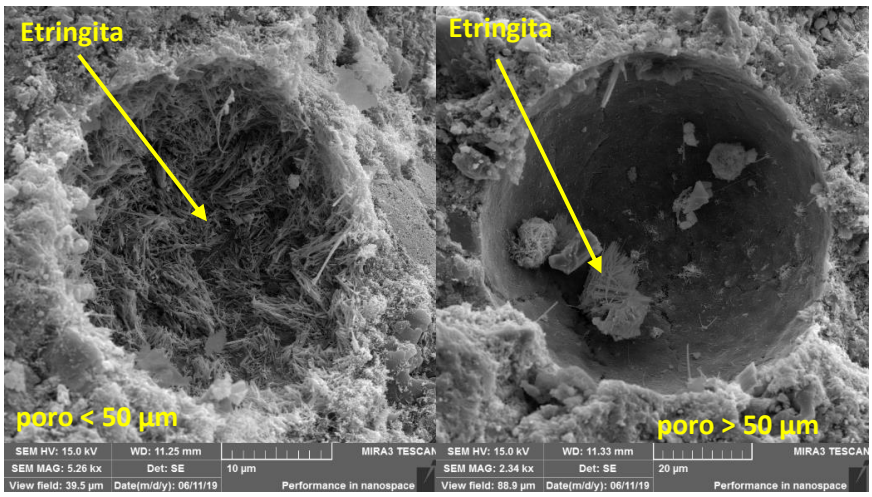


Figura 9 – Micrografias tratamento Agregado B/1% SO_3 aos 180 dias

Analisando o comportamento das argamassas após a idade de 28 dias foi observada que, em idades mais avançadas, maiores que a idade comumente utilizada em ensaios de caracterização (28 dias), o comportamento de argamassas de RCD difere das argamassas convencionais. Esta mudança de comportamento está relacionada em grande parte à alteração do ambiente de exposição, onde os corpos de prova saíram de um ambiente submerso, para um ambiente de envelhecimento natural.

Duas situações precisam ser compreendidas neste cenário, a primeira seria a queda de resistência mecânica e aumento da absorção para as argamassas produzidas com teores de 0% e 1% de SO_3 após a idade de 28 dias. A segunda situação é a análise da estabilização do desempenho físico e mecânico para as argamassas com idades mais avançadas.

A redução de desempenho das argamassas está em parte associada à retração que ocorreu com a alteração do ambiente de cura de totalmente submerso para ambiente natural. Além da retração por secagem, as argamassas trabalhadas nesta pesquisa podem ter sua retração atribuída a dessorção de água pelos cristais de etringita secundária, e pela retração de auto-secagem ocasionada pela redução da água de cristalização na estrutura destes cristais.

Outro fator que pode explicar a mudança de comportamento para argamassa é a formação de cristais de etringita secundária não somente no interior dos poros, mas também na pasta de cimento, o que levaria a um cenário mais propício a expansão devido à pressão de cristalização.

Já o comportamento em idades mais avançadas, onde se observa a estabilização do desempenho das argamassas pode estar relacionado ao preenchimento de poros de diversos tamanhos por cristais de etringitas. Na Figura 10 é possível observar poros maiores e menores que 50 µm com intensa formação de cristais de etringita em seu interior.

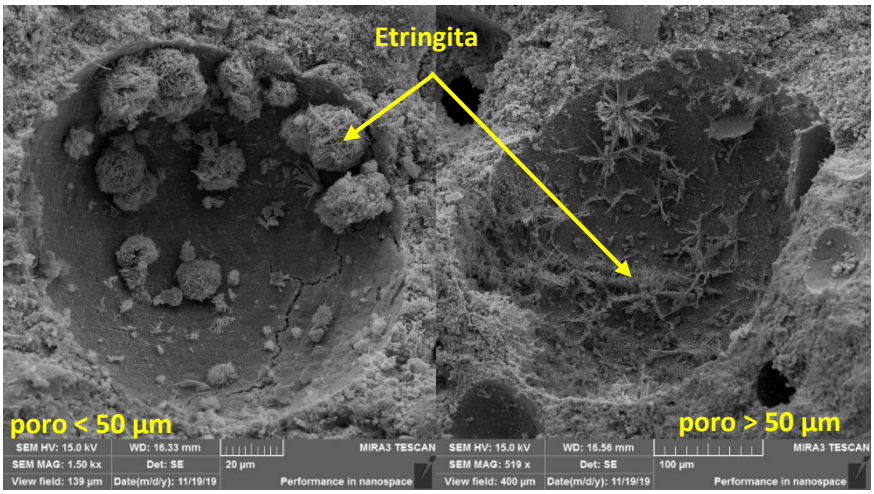


Figura 10 – Micrografia de poros com formação de cristais de etringita

No estudo de Pereira (2018) foi verificado que em função do teor de sulfato disponível, bem como da presença de água e espaço disponível para desenvolvimento dos produtos de reação, pode ocorrer o ganho ou perda de resistência mecânica devido à colmatação de poros e posterior surgimento de fissuras devido à presença de sais de sulfatos. Quando da colmatação dos poros, pode ocorrer a densificação da matriz cimentícia e com isso observar ganho ou estabilização das resistências mecânicas e da absorção das argamassas.

4 CONCLUSÕES

De forma geral, foi possível observar que a mudança de ambiente de exposição teve grande influência sobre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, porém também houve influência do teor de sulfato e a formação de etringita secundária em função deste teor. A morfologia e local de formação do cristal, bem como a saturação da solução dos poros influenciaram no comportamento das argamassas ao longo do tempo, quando em exposição em ambiente com UR menor que 100%. Com teores até 1% de SO_3 as argamassas apresentaram redução do desempenho mecânico e físico.

Com UR de 100%, quanto maior a quantidade de SO_3, maior a quantidade de etringita secundária formada, porém a nucleação ocorre em espaços mais restritos e a morfologia do cristal é massiva e de menor dimensão. Para teores menores, os cristais são maiores e se formam dentro de poros maiores. Em ambos os casos, não se observou tensões internas suficientes para causar fissuras e interferir de forma negativa no desempenho das argamassas.

Com UR < 100%, o primeiro efeito que se observa é alta retração para todos os tratamentos, que é uma combinação entre a retração por secagem e retração autógena. Porém em idades mais avançadas não se observa diminuição do desempenho físico ou mecânico das argamassas, sendo que esta estabilização de desempenho se deve ao efeito combinado do relaxamento da pressão de cristalização e densificação de cristais dentro dos poros das argamassas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Ponta Grossa por fornecer a infraestrutura para esta pesquisa, em particular ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) e a Fundação Araucária.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2019). NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 12p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2021) NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro. 17p

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2009) NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 4p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005) NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 10p

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2006) NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 1 ed. Rio de Janeiro, 8 p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2009) NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. 1 ed. Rio de Janeiro, 6 p.

Collepardi, M.A. (2003). State-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 4–5 SPEC, p. 401–407

Huang,Q.; Wang,Q.; Zhu,X. (2024) Contradict mechanism of long-term magnesium and sodium sulfate attacks of nano silica-modified cement mortars – Experimental and thermodynamic modeling. Cement and Concrete Composites. v. 147, p. 1-17

Ikumi, T.; Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. Cement and Concrete Research, v. 121, n. November 2018, p. 91–105

Kruger. P. (2021). Efeito de diferentes teores de resíduo de gesso sobre o ataque interno por sulfato em argamassas incorporando agregados reciclados de concreto (ARC) e misto (ARM). Doutorado (Tese). Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 207p. Ponta Grossa

Müllauer, W.; Beddoe, R. E.; Heinz, D. (2013). Sulfate attack expansion mechanisms. Cement and Concrete Research. v. 52, p. 208–215

Pereira, E. (2018). Efeito da reação álcali-agregado (raa) associada ao ataque interno por sulfato (isa) na absorção e porosidade de compósito de matriz cimentícia. Dissertação (Mestrado). Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 207p. Ponta Grossa

Scherer, G. W. (2004). Stress from crystallization of salt. Cement and Concrete Research. v. 34, p. 1613–1624

Shan, Z.; Yin, G.; Wen, X.; Miao, L.; Wang, S.; Zuo, X. (2024) Numerical simulation on transport-crystallization-mechanical behavior in concrete structure under external sulfate attack and wetting–drying cycles. Materials & Design, v. 241, p. 1-21

Tam, V.W.Y.; Tam, C.M.; Le, K.N. (2007) Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. Resources, Conservation and Recycling, v. 50, n. 1, p. 82–101

Wagner,M.; Seising,A.; Machner, A.; Beddoe, R.; Heinz, D. (2022) External Sulfate Attack on Cementitious Binders: Limitations and Effects of Sample Geometry on the Quantification of Expansion Stress. Materials, v. 15, p. 1-18

Wang,Q.; Wilson,W.; Scrivener,K. (2023) Unidirectional penetration approach for characterizing sulfate attack mechanisms on cement mortars and pastes. Cement and Concrete Research. v. 169, p. 1-11

Yu, C.; Sun, W.; Scrivener, K. (2013). Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. Cement and Concrete Research, v. 43, n. 1, p. 105–111

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROPRIEDADES REOLÓGICAS E MECÂNICA DE CONCRETO COM RESÍDUO DE VIDRO EM PÓ EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO

Abcael Ronald Santos Melo[a]; Madson Lucas de Souza[a]; Júlia Emilly Souza Gomes[a]; Larissa Sampaio Gomes[a]; Douglas Goes Sampaio Souza [a]; Antônio Eduardo Bezerra Cabral[a,b]

[a]Universidade Federal do Ceará, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza – CE, 60020-181, Fortaleza, Brasil, abcael.melo@alu.ufc.br

[b]Universidade Federal do Ceará, Campus do PICI, 60455-760, Fortaleza, Brasil, eduardo.cabral@ufc.br

RESUMO

A incorporação de resíduos industriais, como o vidro, na construção civil é uma forma de mitigar o impacto ambiental da produção, principalmente quando substitui o cimento *Portland*, um dos grandes geradores de CO_2.. Este trabalho visou analisar a influência da substituição de cimento por pó de vidro nas propriedades reológicas e mecânica do concreto. Para tanto, uma mistura de referência (REF) e quatro substituições volumétricas de cimento por pó de vidro (5% - G5, 10% - G10, 15% - G15 e 20% - G20) em um misturador de queda livre foram produzidas. No estado fresco, testes de abatimento (*slump*) e de reometria foram realizados. No estado endurecido, testes de resistência à compressão após 28 dias de cura submersa foram realizados. Constatou-se que o aumento das substituições reduziu o abatimento do tronco de cone, exceto para o teor de 20% de substituição. Na reometria, identificou-se uma tendência de redução no torque com aumento das substituições, exceto para o teor de 15%. Todos os concretos foram bem descritos pelo modelo plástico de Bingham, com R^2 entre 0,966 e 0,994. Para o estado endurecido, notou-se uma diferença não significativa entre os concretos REF e G5 e entre os concretos G10, G15 e G20.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Reologia, Concreto, Resíduo, Pó de vidro.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil consome uma grande quantidade de materiais, resultando em consequências ambientais significativas. Para mitigar esse impacto, a incorporação de resíduos de outras indústrias torna-se necessária. O resíduo de vidro é um exemplo com potencial de aplicação na construção civil. O vidro é um material amplamente utilizado com diversas aplicações, incluindo eletrônicos, recipientes e revestimentos estruturais (Tariq *et al.,* 2022). No entanto, o vidro destaca-se como um material favorável devido à sua reciclabilidade total, oferecendo economias substanciais em matérias-primas e energia (Shavan e Xu, 2006). Além disso, a reciclagem do vidro contribui para a conservação de espaço em aterros sanitários e auxilia na redução de emissões de gases, demonstrando seus benefícios ambientais (ABVIDROS, 2019).

Nos últimos 70 anos, pesquisas têm sido realizadas para incorporar o resísduo de vidro moído em materiais de construção (Mohajerani *et al.* 2017). Shi et al. (2005) analisaram quatro tipos diferentes de pós de vidro e obtiveram uma atividade pozolânica muito alta. Eles indicaram que quanto mais fino é o pó de vidro, maior é a sua atividade pozolânica. Nesse sentido, o pó de vidro pode ser utilizado para substituir ou complementar as reações químicas do cimento Portland. Além disso, Islam et al. (2017) analisaram a resistência à compressão de argamassas e concretos com substituições de 10%, 15%, 20% e 25% em massa de cimento por pó de vidro em diferentes idades (7, 28, 56, 90, 180 e 365 dias) e descobriram que, a partir de 90 dias, a resistência das argamassas e concretos com substituições superou a resistência das amostras sem substituição, exceto para as amostras com 25% de substituição. Muhedin e Rahel (2023) investigaram as resistências à compressão e à tração de concretos com substituição de cimento e areia por pó de vidro em teores de 5%, 10%, 15% e 25% em peso. Seus resultados mostraram que a resistência à compressão melhorou até 15% de substituição e identificaram que a microestrutura do concreto melhora, com mais C-S-H (responsável pela melhoria da resistência à compressão) e menos fissuras formadas como resultado da hidratação secundária.

A literatura citada acima contribui para a aplicação do resíduo do vidro em pó em substituição ao cimento Portland quando observada a sua reatividade e ganho de resistência mecânica em idades avançadas. Embora o uso do vidro como substituição do cimento Portland já tenha sido o foco de muitas investigações, há poucas pesquisas focadas no efeito do tamanho das partículas do pó de vidro na reologia do concreto (Tariq *et al.,* 2022). Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da substituição do cimento por pó de vidro nas propriedades reológicas (*slump test* e reometria) e mecânica (resistência à compressão) do concreto. Com isso, espera-se contribuir com o uso de resíduos na formulação de concretos, bem como com a sua caracterização reométrica e mecânica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para as análises, foram formuladas: (i) uma mistura de referência (REF) e; (ii) quatro misturas com substituições volumétricas de cimento por pó de vidro nos seguintes percentuais: 5%, 10%, 15% e 20%, rotuladas como G5, G10, G15 e G20, respectivamente. As misturas foram produzidas em um misturador de queda livre de 75L. O quadro 1 apresenta o consumo de materiais para 1m³ de concreto.

Quadro 1 – Consumo de materiais (kg/m^3)

ID	Cimento	Vidro em pó	Areia	Brita	Água	Aditivo
REF	368,02	0,00	736,04	1104,07	184,01	2,21
G5	349,62	15,36				2,10
G10	331,22	30,71				1,99
G15	312,82	46,07				1,88
G20	294,42	61,43				1,77

Os materiais utilizados foram: cimento Portland CP-V, areia quartzica e brita granítica como agregados finos e graúdos, respectivamente, e o resíduo de vidro em pó em substituição ao cimento Portland. A massa específica dos materiais utilizados foi de 3,05 g/cm³ para o cimento, 2,66 g/cm³ para o agregado miúdo, 2,63 g/cm³ para o agregado graúdo e 2,55 g/cm³ para o pó de vidro. As distribuições granulométricas dos agregados e do pó de vidro estão apresentadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Na Figura 1, nota-se que o tamanho máximo nominal (NMS) do agregado miúdo é 2,36 mm e do agregado graúdo é 12,5 mm, com um módulo de finura de 2,53 e 5,71, respectivamente. Na Figura 2, observa-se que quase 90% do pó de vidro apresenta um diâmetro inferior a 45 µm, satisfazendo o requisito físico para ser caracterizado como material pozolânico (ABNT NBR 12653, 2014). Atingindo ainda, um índice de atividade pozolânica de 102% (ABNT NBR 5752, 2012).

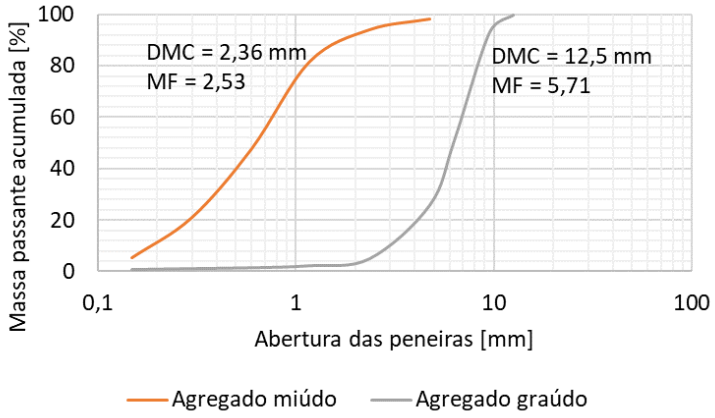


Figura 1 – Distribuição granulométrica dos agregados

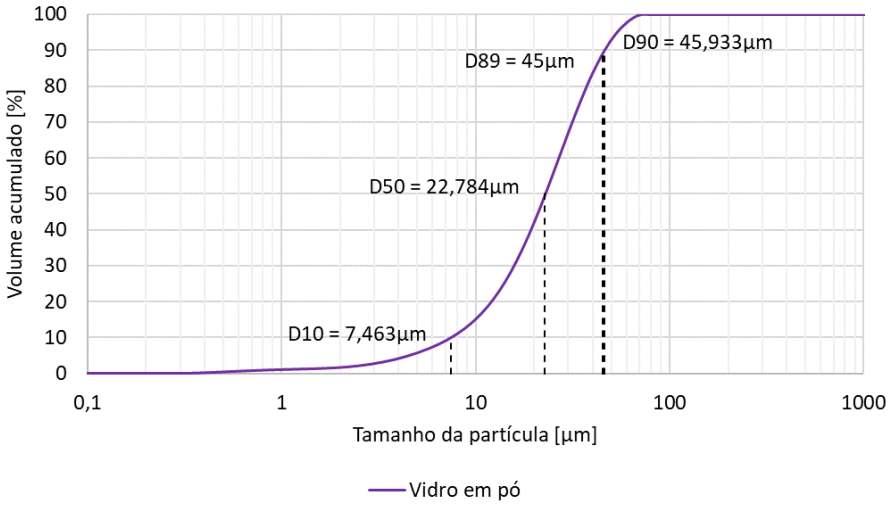


Figura 2 – Distribuição granulométrica do vidro em pó

A Figura 3 mostra a difração de raios X do pó de vidro, onde verifica-se um halo característico de materiais reativos. A composição química do pó de vidro é apresentada no Quadro 2 e sua microscopia em diferentes ampliações é apresentada na Figura 4, onde percebe-se a angularidade das partículas.

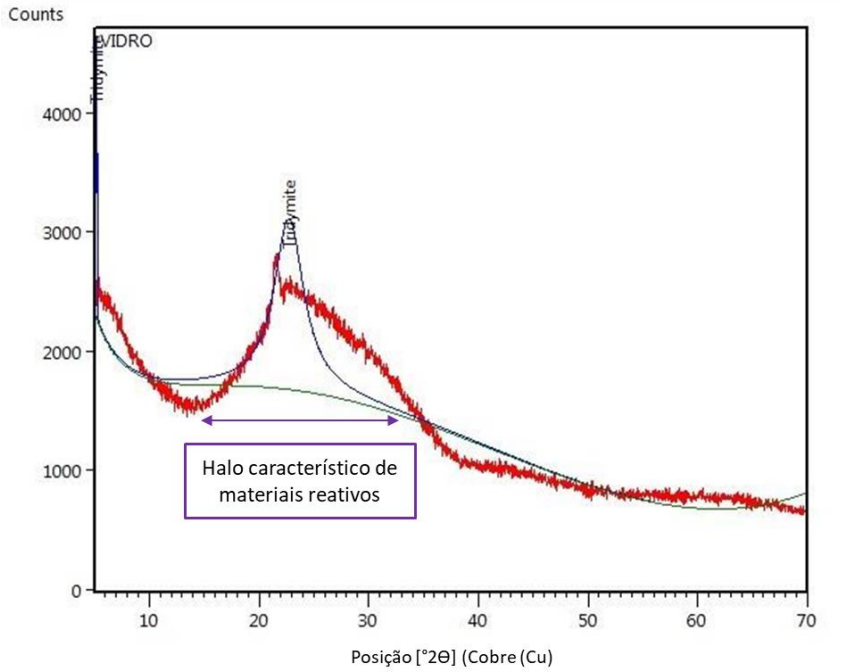


Figura 3 – Difração de raio-X do vidro em pó

Quadro 2 – Composição química do vidro em pó

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
65,65%	0,66%	0,30%	10,53%	4,48%	0,22%	17,95%	0,12%

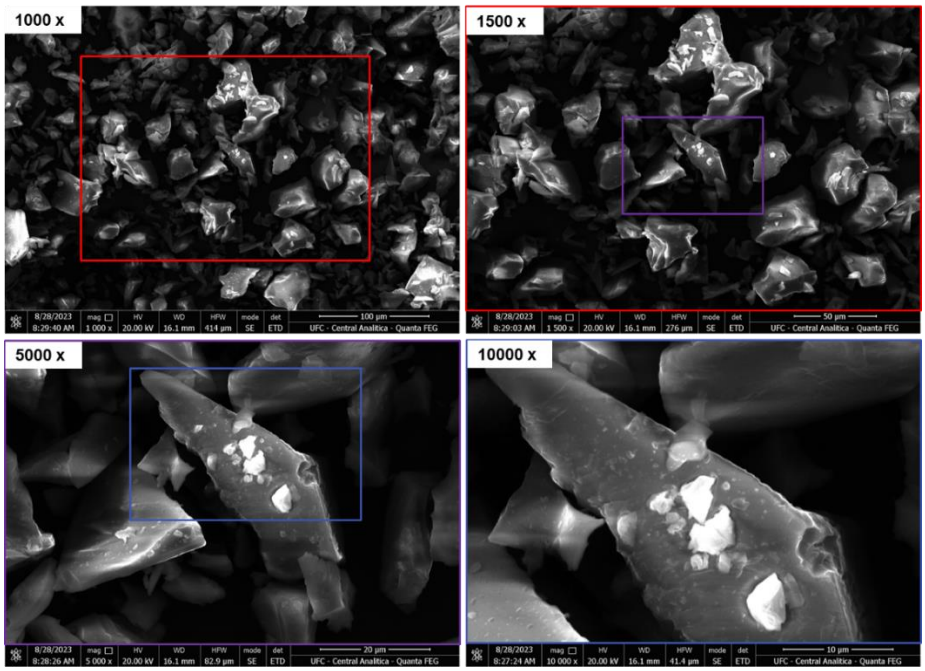


Figura 4 – Microscopia de pó de vidro em diferentes magnificações

Após a mistura, parte do concreto foi separada para o ensaio de abatimento (*slump test*) (ABNT NBR 16889, 2020; ASTM C143/C143M, 2012) e outra parte foi destinada para reometria. A reometria foi realizada no formato de reologia de fluxo em um reômetro planetário PHESO com geometria Attritor (Figura 5). O script do teste de reologia é apresentado na Figura 6 e foi composto por etapas ascendentes e descendentes com as mesmas velocidades de rotação (6, 12, 24, 36, 64, 125, 190 e 250 rpm), cada uma com duração de 8 segundos.

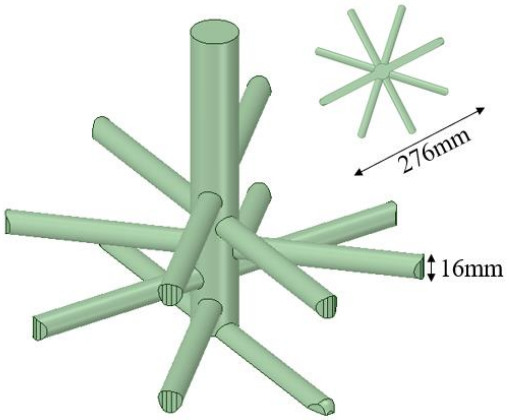


Figura 5 – Geometria *Attritor*

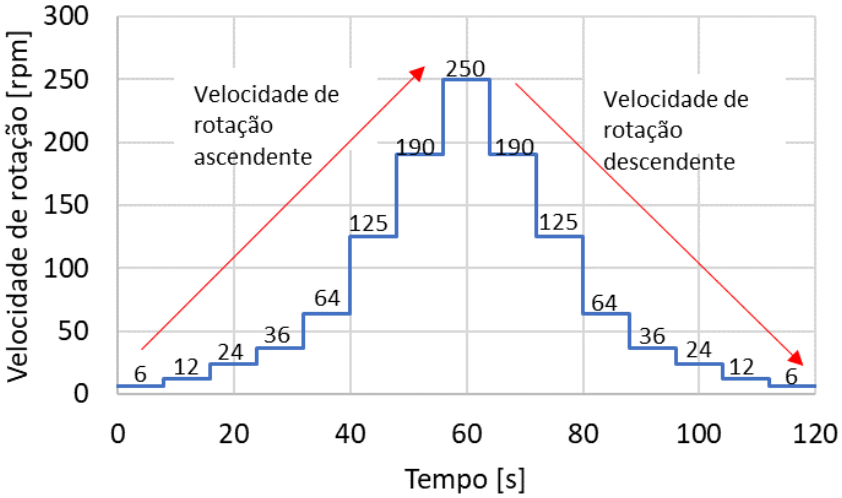


Figura 6 – Procedimento de reometria (teste reológico)

Após o teste de reologia, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm foram moldados utilizando um vibrador para ensaios de resistência à compressão aos 28 dias (ABNT NBR 5739, 2018). Para todas as formulações, cura submersa por 28 dias foi aplicada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 apresenta uma comparação entre os resultados do abatimento (*slump*) das misturas. O abatimento máximo de espalhamento foi observado para G20 com 20,4 cm e o mínimo para G15 com 9,0 cm. Nota-se que, com o aumento da substituição do cimento, o abatimento diminui, exceto para a substituição de 20%. Apesar disso, apenas a mistura G15 pertence a uma classe diferente de concreto. A redução do abatimento com o aumento do teor de substituição pode ser justificado pelo formato

mais angular das partículas de vidro em comparação com o cimento, o que dificulta o fluxo. A grande variação observada para G15 e G20 pode ser atribuída a alguma variável não controlada, como a temperatura ambiente, uma alteração na força aplicada durante o teste de abatimento ou o tempo de mistura.

Aliabdo *et al.* (2016) identificaram um aumento no abatimento do concreto com o aumento do uso de pó de vidro como substituto do cimento, devido à superfície vítrea e à baixa absorção de água do pó de vidro, e uma diminuição do abatimento com o aumento do uso de pó de vidro como aditivo, devido ao aumento do conteúdo de material fino, que aumenta a coesão da mistura de concreto, reduzindo o abatimento. Esse efeito não foi tão evidente neste trabalho porque o teor de água e a porcentagem do peso do cimento do superplastificante foram mantidos constantes. Além disso, as substituições foram feitas em volume.

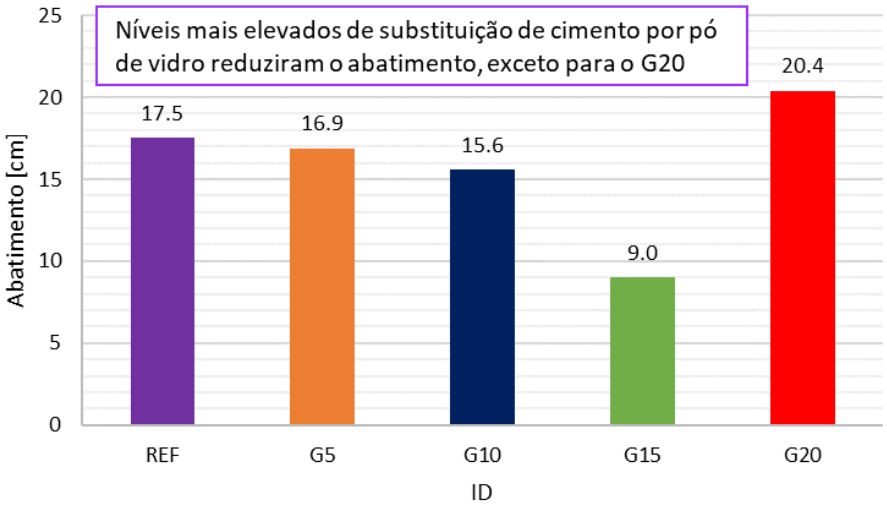


Figura 7 – Comparação dos resultados dos testes de abatimento do tronco de cone

Para melhor compreender as propriedades do concreto fresco, foram realizados testes de reologia. Apesar de não ser possível determinar as tensões de cisalhamento e as taxas de cisalhamento, uma vez que a geometria Attritor não possui equações de transformação matemática, dados de torque e velocidade de rotação podem ser extraídos. A tendência desses parâmetros de ensaio pode ser comparada aos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade aparente. A Figura 8.A mostra uma comparação entre a reologia das misturas durante carregamento e descarregamento, e a Figura 8.B mostra a regressão linear para o descarregamento de todas as misturas. Observa-se que todas as misturas se comportaram como um fluido reopéctico, indicado pelos torques de descarregamento maiores do que os torques de carregamento.

De acordo com a Figura 8.B, o comportamento dos concretos na etapa de descarregamento pode ser simplificado por equações lineares, indicando que eles se comportam como um plástico de Bingham. Também é possível identificar que a substituição do cimento por pó de vidro reduz o torque para todas as misturas, exceto G15, o que é compatível com o resultado menor de abatimento (*slump*).

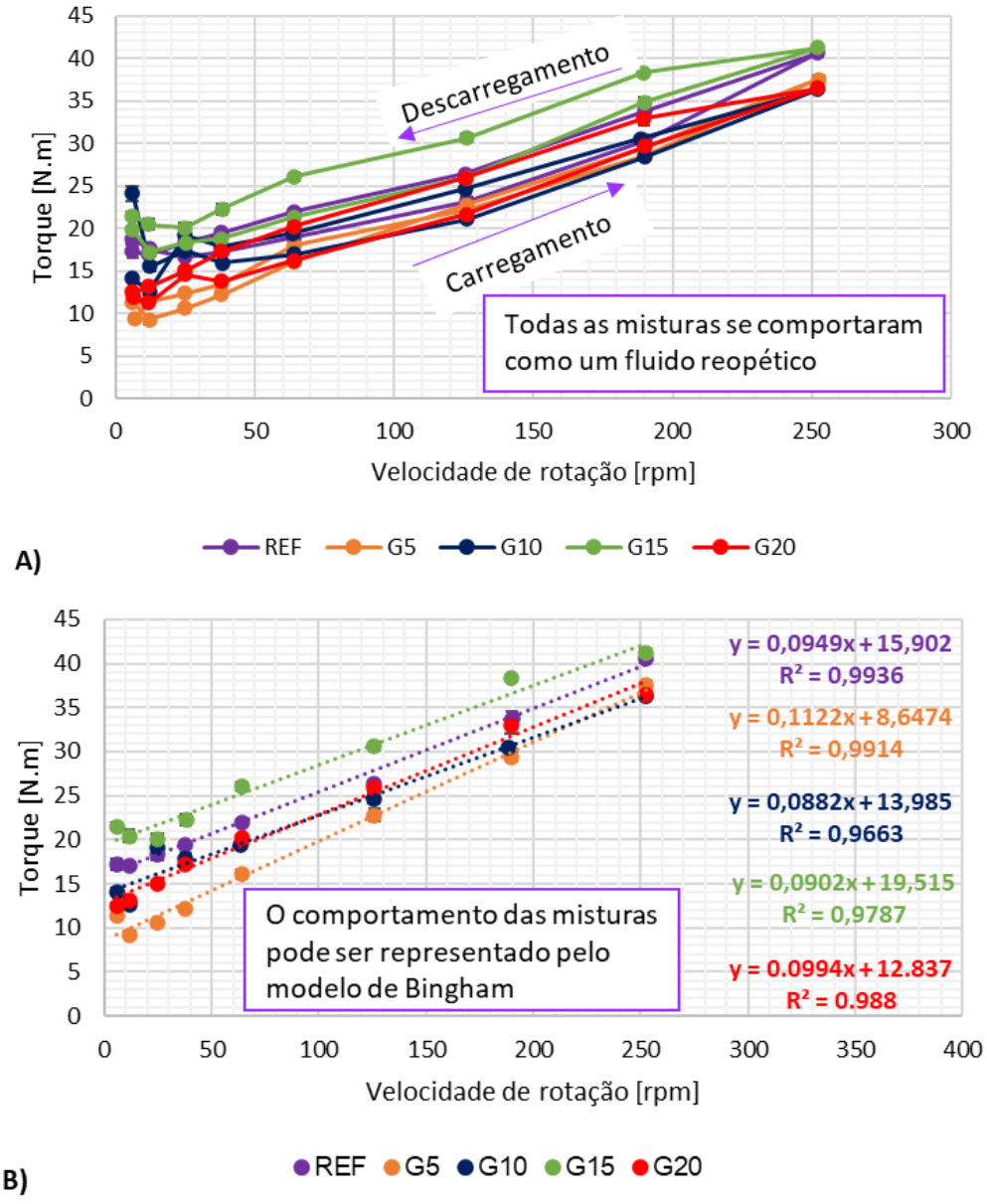


Figura 8 – Reometria: A) Comportamento em rampas de aumento e redução de torque; B) Regressão para rampa de redução de torque

A Figura 9 apresenta uma comparação entre a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias. Verifica-se ums resistência máxima e estatisticamente igual ao concreto de referência para o G5, atingindo o valor médio de 37,82 MPa. Não há diferença significativa na resistência à compressão aos 28 dias dos concretos G10, G15 e G20, o que pode ser observado pelo desvio padrão das amostras. Soliman *et al*. (2016) verificaram um aumento da resistência à compressão quando o pó de vidro foi utilizado como substituto de 10%, 20% e 30% em massa do cimento aos 56 dias e para todos os substitutos testados (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) aos 91 dias e atribuíram-no à pozolanicidade do pó de vidro. Islam *et al.* (2017) constataram que, a partir de 90 dias, a resistência das argamassas e dos concretos com substituições foi maior do que a das amostras sem substituição, exceto para as amostras com 25% de substituição.

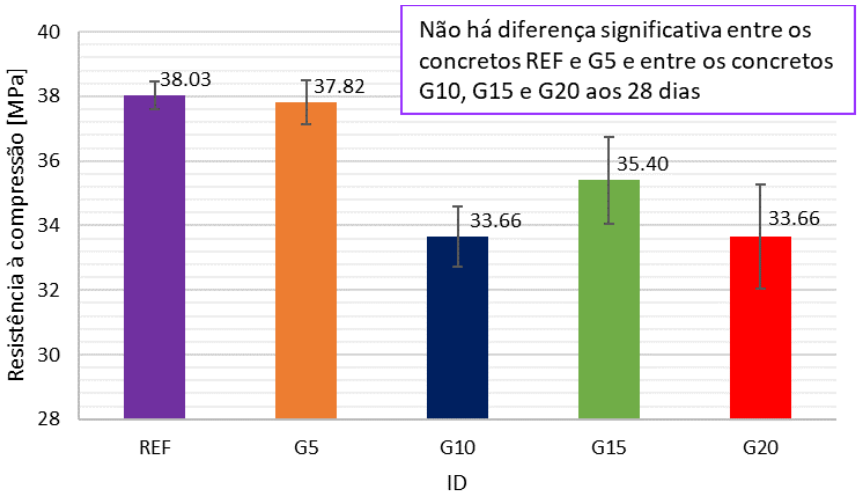


Figura 9 – Comparação das resistências à compressão aos 28 dias

4 CONCLUSÕES

Para alcançar o objetivo de analisar a influência da substituição do cimento por resíduo de vidro nas propriedades reológicas e mecânica do concreto, foram produzidas uma mistura de referência (REF) e quatro misturas com substituições volumétricas de cimento (5%, 10%, 15% e 20%). Uma comparação foi realizada entre a reometria e os resultados do teste de abatimento (*slump*) no estado fresco. No estado endurecido, comparou-se a resistência à compressão entre as misturas.

No estado fresco, foi observado que, no geral, níveis mais elevados de substituição de cimento por pó de vidro reduzem o abatimento. Tem-se ainda que, todas as misturas se comportaram como fluido reopético e que o modelo de Bigham descreveu de forma adequada o comportamento de todos os concretos estudados, de forma que as substituições não alteraram o modelo reológico característico. Para o estado endurecido, notou-se uma diferença não significativa entre os concretos REF e G5 e entre os concretos G10, G15 e G20, com resistência máxima de 37,82 MPa para o concreto com 5% de substituição de vidro.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise da resistência à compressão em idades mais tardias, dada a pozolanicidade tardia do vidro. Sugere-se ainda a realização de estudos sobre a durabilidade desse concreto, com o objetivo de confirmar a sua aplicabilidade em obras de construção civil e/ou infraestrutura.

REFERÊNCIAS

ALIABDO, A. A., et al. (2016). Utilization of Waste Glass Powder in the Production of Cement and Concrete. Construction and Building Materials, vol. 124, p. 866–77. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2012). C143/C143M-12 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO. (2019) Abvidros, 2019. Vidro: o resíduo infinitamente reciclável. - https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020). NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2018). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012). NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro.

ISLAM, GM S.; RAHMAN, M.; KAZI, N. (2017). Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement for Sustainable Concrete Practice. International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 6, no 1, p. 37–44. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.10.005.

MOHAJERANI, A., VAJNA, J., CHEUNG, T. H. H., KURMUS, H., ARULRAJAH, A., & HORPIBULSUK, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review. Construction and Building Materials, 156:443‑467. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005

MUHEDIN, D. A.; RAHEL K. I. (2023). Effect of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement & Sand in Concrete. Case Studies in Construction Materials, vol. 19, p. e02512. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512.

SHAYAN A, XU A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concretes labs. Cement Concrete Research, vol. 36(3), p. 457–468. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012

SHI, C.; WU, Y.; WANG, C.; RIEFLER H. (2005). Characteristics and Pozzolanic Reactivity of Glass Powders. Cement and Concrete Research, vol. 35, no 5, p. 987–93. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015.

TARIQ, S., SCOTT, A. N., MACKECHNIE, J. R., SHAH, V. (2022). Glass powder replacement in self-compacting concrete and its effect on rheological and mechanical properties. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, v. 11(3), p. 240-256. https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1922948

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO INTERNO COM INCORPORAÇÃO DE DIFERENTES RESÍDUOS DE VIDRO

Abcael Ronald Santos Melos[a], Bruna Tayna Macedo Fideles[a]; Kamila Gonçalves Guedes[a]; Antônio Eduardo Bezerra Cabral[a,b]

[a]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, PEC/UFC, Campus do PICI, 60455-760, Fortaleza, abcael.melo@alu.ufc.br

[a,b]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, PEC/UFC, Campus do PICI, 60455-760, Fortaleza, Brasil, eduardo.cabral@ufc.br

RESUMO

A reciclagem de resíduos sólidos, especialmente vidro, tem ganhado destaque devido aos benefícios ambientais e econômicos que oferece. O vidro é 100% reciclável e pode ser reutilizado infinitamente, o que contribui para a redução do consumo de matéria-prima e energia, além de minimizar a emissão de gases e a quantidade de resíduos em aterros sanitários. No entanto, a falta de destinação adequada dificultam a incorporação eficaz desses resíduos. Estudos têm explorado a viabilidade de incorporar resíduos de vidro em materiais de construção, como concretos e argamassas, visando reduzir o consumo de cimento e agregados naturais. Neste contexto, este trabalho visa analisar os efeitos da incorporação de quatro diferentes granulometrias de resíduos de vidro em argamassas para revestimento interno. Utilizou-se o *software* EMMA para determinar a porcentagem ideal de substituição dos materiais e foram realizados ensaios reológicos em reômetro PHESO. As argamassas com incorporação de resíduo de vidro apresentaram menor torque e indicaram possuir menor viscosidade, quando comparadas à argamassa de referência, devido a menor granulometria dos resíduos. Além disso, todas as argamassas apresentaram comportamento pseudoplástico. Conclui-se que, considerando o comportamento no estado fresco, a incorporação de resíduos de vidro é viável e possibilita a melhora na trabalhabilidade da argamassa.

Palavras-chave: Reologia, Argamassa para revestimento, Resíduos de vidro, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A utilização generalizada do vidro conduz inevitavelmente à produção de uma grande quantidade de resíduos de vidro. Por conseguinte, conforme Niu *et al*. (2023), a reciclagem do vidro tornou-se uma nova ideia para resolver o problema da eliminação dos resíduos de vidro. Diversos estudos têm sido realizados sobre a incorporação de resíduos de vidro em concretos e argamassas na construção civil. Segundo Oliveira *et al*. (2015) isto pode reduzir o conteúdo de cimento e agregado natural de argamassas e resultar em benefícios ambientais. Uma vez que ao reduzir o consumo de cimento, reduz-se o consumo de energia vinculado à sua produção, a emissão de CO_2 para a atmosfera e os resíduos despejados em aterros sanitários. Esses estudos têm buscado, em especial, uma porcentagem ideal de susbtituição de modo que não afete as propriedades físicas e mecânicas requeridas para o material.

Conforme Azevedo *et al*. (2017) as propriedades reológicas testadas em argamassas são cada vez mais importantes, devido à necessidade de maior produtividade e eficiência na sua aplicação, evitando problemas de descolamento nos revestimentos. O mesmo estudo avaliou a influência que a incorporação de resíduos de vidro provenientes de uma estação de tratamento de uma indústria desse setor exerce nas propriedades reológicas das argamassas adesivas. Para isso, os autores substituíramu parcialmente o cimento e agregado fino nos teores de 10%, 15% e 20% e realizaram ensaios de fluxo a fim de definir as curvas de carga aplicadas *versus* deslocamento em cada traço. As argamassas colantes analisadas apresentaram características reológicas diferentes, bem como uma capacidade de absorção distinta na carga de compressão imposta pelo equipamento. Por fim, nenhuma das argamassas estudadas apresentou uma carga de compressão superior à da argamassa de referência.

Em outro estudo, realizado por Niu *et al*. (2023), foi investigado o efeito de um resíduo de vidro em pó com diferentes tamanhos médios de partículas (6,63µm, 18,33µm, 30,15µm e 49,38µm) e proporções de substituição (3 %, 6 %, 9 %, 12% e 15%), como materiais cimentícios suplementares, sobre o desempenho da argamassa. As propriedades reológicas das argamassasforam avaliadas utilizando o modelo de Bingham, o modelo de Bingham modificado e o modelo H-B. Os autores identificaram que com o aumento do diâmetro médio das partículas de 6,63µm para 18,33µm, a tensão de escoamento aumentou lentamente, seguida de um acentuado declínio com o aumento do tamanho médio das partículas de 18,33µm para 30,15µm, e finalmente, aumentando ligeiramente com o aumento do tamanho médio das partículas de 30,15µm para 49,38µm.

Dentro desse contexto, o presente trabalho busca analisar os efeitos da incorporação de quatro faixas granulométricas distintas de resíduos de vidro, provenientes da reciclagem de garrafas e para-brisas, nas propriedades reológicas de argamassa para revestimento interno, auxiliando na compreensão da viabilidade de uso do vidro na construção civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os resíduos de vidro utilizados neste estudo são reciclados a partir de garrafas e para-brisas e divididos em quatro tipos e faixas granulométricas, sendo: pó de vidro verde (PV), pó de vidro âmbar (PA), pó de vidro branco (PB) e talco de vidro branco (TB), conforme Figura 1. Vale destacar que a diferenciação por cor foi utilizada para diferenciar os materiais utilizados, não tendo nenhum efeito sobre os resultados obtidos.

a) b) c) d)

Figura 1 – Identificação dos agregados reciclados. a) PV, b) PA, c) PB e d) TB

A cal utilizada foi do tipo hidratada CHI e o cimento utilizado foi o CP II Z 32 RS, classificado conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). As propriedades físicas e químicas do cimento foram disponibilizadas pela fabricante e estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características físicas e químicas do Cimento Portland CP II Z 32 RS

Propriedades químicas		**Result.**
Perda ao fogo		5,51%
Óxido de magnésio – MgO		4,05%
Anidrido sulfúrico – SO_3		2,25%
Resíduo insolúvel		11,41%
Propriedades físicas		**Result.**
Finura 0,075mm (#200)		1,1%
Resistência à compressão	1 dias	24,5MPa
	3 dias	29,5MPa
	7 dias	37,6MPa

Foi realizada a granulometria a lazer dos materiais finos: PA, PB, TB, cal hidratada (CAL) e cimento CP II Z 32 RS (CIM), através dos analisadores CILAS 1090 Líquido (Carbomil Química S/A) e Mastersize 2000 (Malvern Instruments). Os valores de D10, D50 e D90 e a distribuição das partículas está apresentada na Figura 2.

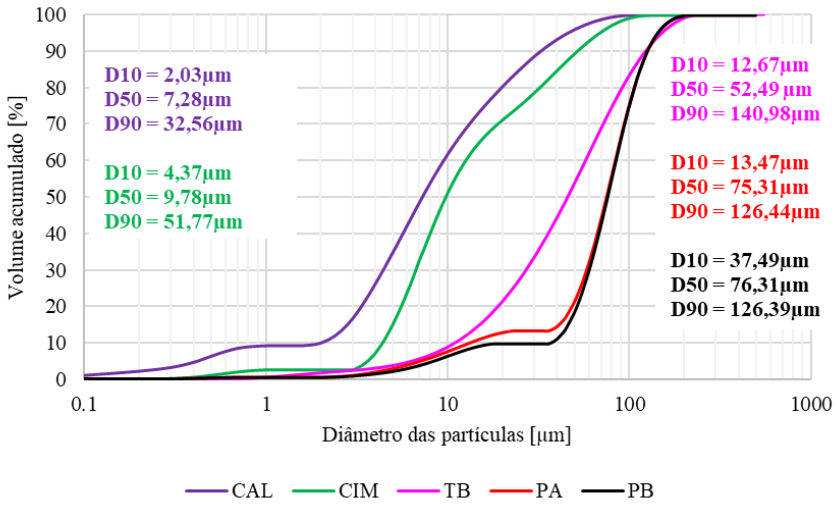


Figura 2 - Granulometria dos materiais finos.

Para a areia natural e o pó de vidro verde foi realizado o peneiramento, conforme estabelece a NBR 17054 (ABNT, 2022) e a Figura 3 apresenta a granulometria obtida, bem como o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) de cada material.

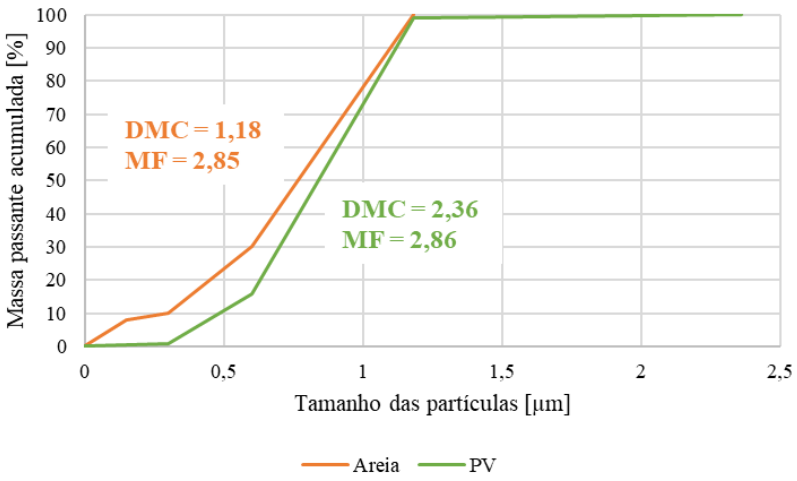


Figura 3 - Granulometria da areia e do pó de vidro verde.

As massas especificas dos materiais estão indicadas no Quadro 2, obtidas conforme as normas NBR NM 23 (ABNT, 2000) e NBR 17054 (ABNT, 2022). A absorção de água da areia natural foi de 0,95%, enquanto os diferentes vidros não apresentaram absorção.

Quadro 2 - Massas especificas dos materiais

Material	Massa Especifica (g/cm³)
Cal	2,81
Pó de vidro branco	2,86
Pó de vidro âmbar	2,72
Talco de vidro branco	2,89
Cimento	2,95
Pó de vidro verde	2,49
Areia natural	2,67

2.2 MÉTODO

O traço de referência foi um traço comercial para revestimento interno, de relação em massa igual a 1:0,8:6. O *software* EMMA foi utilizado para a otimização das misturas, empacotamento das partículas e obtenção da porcentagem ideal de substituição no traço de referência. Para isso, as curvas granulométricas e as massas específicas dos materiais foram inseridas no *software* e utilizou-se o modelo de Andreassen modificado com o parâmetro q = 0,35. A porcentagem ideal de cada material nas misturas está indicada no Quadro 3.

Quadro 3 - Teor volumétrico na mistura de material seco

TRAÇO	CIM (%)	CAL (%)	AREIA (%)	PV (%)	PA (%)	PB (%)	TB (%)
ARG_REF	12%	10%	78%	-	-	-	-
ARG_PV	12%	10%	63%	15%	-	-	-
ARG_PA	11%	10%	61%	-	18%	-	-
ARG_PB	11%	10%	59%	-	-	20%	-
ARG_TB	11,25%	9,50%	78%	-	-	-	1,25%

A consistência foi determinada por meio do ensaio da mesa de consistência (*flow table*), no qual foi obtida a quantidade de água para se obter um espalhamento de 260 ± 5 mm, conforme NBR 13276 (ABNT, 2016), a partir deste, foi possível determinar a relação água/cimento, e as argamassas foram produzidas para a realização do ensaio reológico através do reômetro PHESO com geometria *Attritor* (Figura 4) (Srinivasan, 2014; Carvalho et al., 2024).

Figura 4 - Geometria *Attritor* utilizada durante a reometria.

A Figura 5 apresenta o esquema geral do ensaio de reometria, composto por quatro etapas: 1) Descida da geometria; 2) Mistura da argamassa durante 300s; 3) Ensaio de fluxo da argamassa; 4) Subida da geometria. O ensaio de fluxo foi feito com velocidade de rotação mantidas por 8s em cada nível na ordem crescente e depois decrescente nos seguintes valores médios em rpm: 5, 12, 25, 38, 64, 125, 190, 252. O torque medido para alcançar essas velocidades foi registrado ao longo do ensaio e foi utilizado para identificar o comportamento do material, uma vez que, pela complexidade da geometria, não é possível obter os parâmetros reológicos (tensões e taxas de cisalhamento). Dessa forma, a partir dos resultados de descarregamento, fez-se a minimização do erro quadrado para determinar a equação que melhor descrevesse o comportamento das amostras.

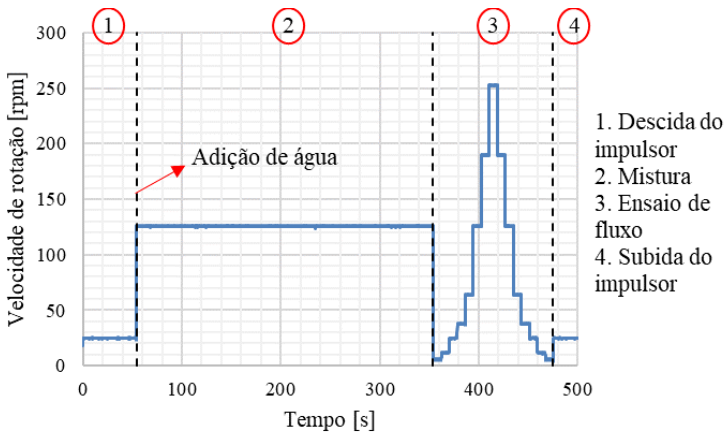


Figura 5 - Variação da velocidade de rotação durante a reometria.

Como parâmetro para o estado endurecido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão, onde foram moldados corpos de prova prismáticos de dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm, conforme estabelecido pela NBR 13279 (ABNT, 2005), para ruptura aos 28 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

O Quadro 4 apresenta a caracterização das argamassas quanto as propriedades no estado fresco.

Quadro 4 - Propriedades das argamassas no estado fresco.

TRAÇO	TEOR DE ÁGUA (%)	RELAÇÃO A/C	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (MM)
ARG_REF	16,94	1,70	255
ARG_PV	17,66	1,70	257
ARG_PA	17,66	1,95	258
ARG_PB	16,94	1,95	259
ARG_TB	16,39	1,75	258

As argamassas com resíduo de pó de vidro âmbar (ARG_PA), pó de vidro branco (ARG_PB) e talco de vidro branco (ARG_TB) apresentaram relação a/c superior à da argamassa de referência (ARG_REF), para obter o espalhamento fixado. Enquanto que o traço com pó de vidro verde (ARG_PV) teve a relação a/c semelhante à referência, devido a granulometria mais grossa em relação aos outros resíduos, e, portanto, menor superfície específica, e a não contribuição do vidro para a absorção de água.

A Figura 6.A representa a curva de Torque *vs*. Tempo para a mistura de todas as argamassas analisadas, a partir dela, percebe-se que a ARG_REF apresentou maior torque durante o processo de mistura, que pode ser justificado pelo alto porcentual volumétrico do agregado miúdo, o qual acaba absorvendo água do sistema. A Figura 6.B apresenta um recorte da Figura 6.A para os primeiros 100 s de mistura, onde é possível identificar que a ARG_PV apresentou maior tempo para o torque parar de subir (ponto de virada) durante a mistura, isso ocorre provavelmente pelo aumento das partículas na argamassa, dificultando a lubrificação do sistema. Por fim, a Figura 6.C apresenta um recorte a partir dos 100s de mistura, da qual é possível observar similaridade entre os resultados obtidos para as diferentes

argamassas após a mistura completa das argamassas, porém com menores valores de torque para as argamassas com substituição. Esses resultados indicam a adequabilidade reológica das argamassas com substituição para uso em revestimento interno.

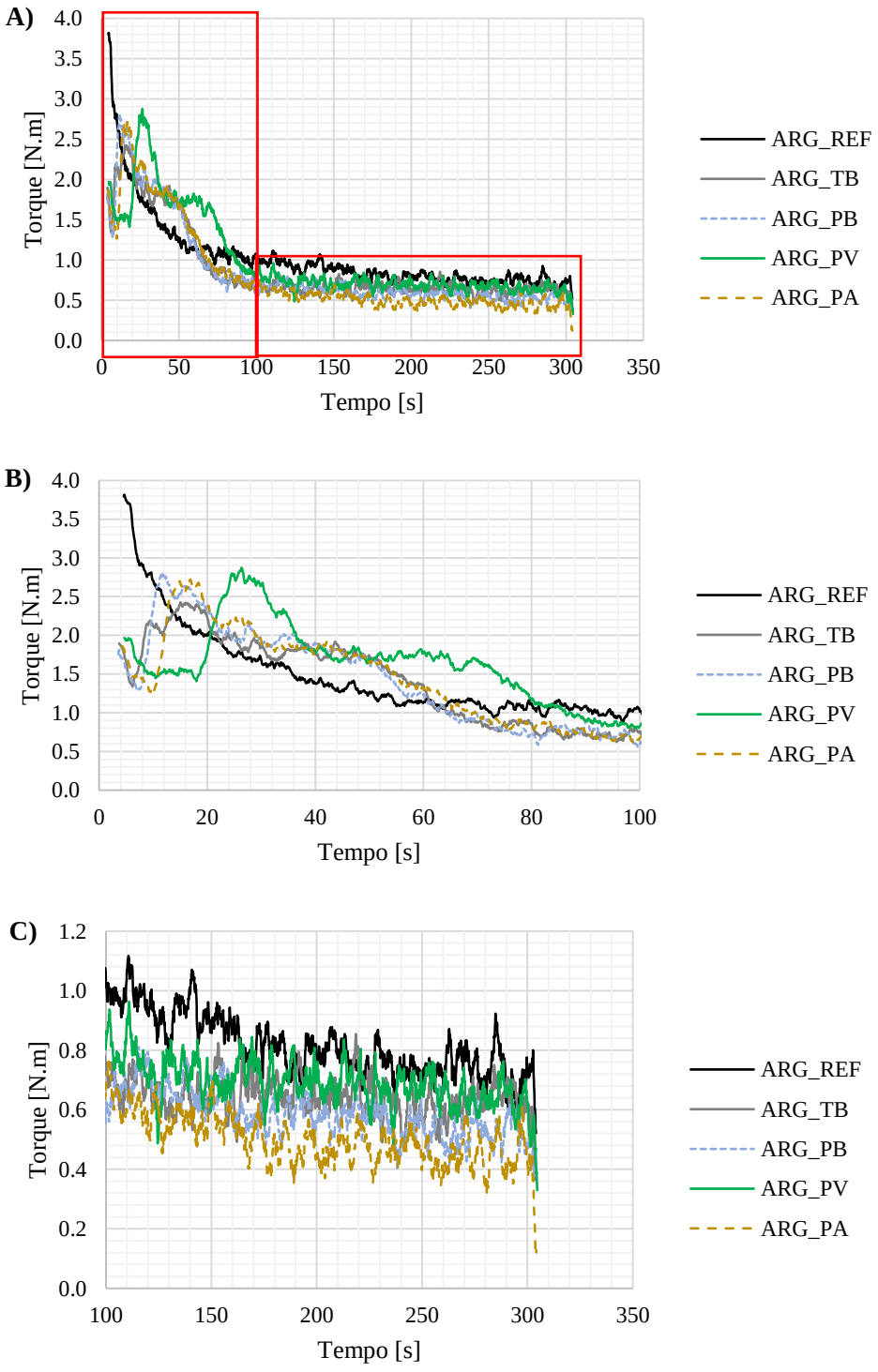


Figura 6 - Curvas de torque *vs*. tempo para a mistura de todas as argamassas analisadas. A) período completo; B) até 100s; C) a partir de 100s.

A Figura 7.A apresenta as curvas de Torque *vs*. Velocidade de rotação do impulsor durante o ensaio de fluxo para todas as argamassas analisadas, nota-se que todas as argamassas apresentaram tixotropia (diferença na medida entre o carregamento e o descarregamento), sem nenhum efeito aparente das substituições realizadas. Dessa forma, apenas o descarregamento foi considerado para analisar o comportamento do material. A Figura 16B apresenta os descarregamentos e, por meio da minimização do erro quadrado, obteve-se as equações apresentadas, porém as equações apresentadas utilizam o torque T e a velocidade de rotação ω e não a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Aqui vale destacar que a relação entre a geometria utilizada e a tensão de cisalhamento é desconhecida, apesar disso, é possível perceber que todas as argamassas se comportaram como fluidos pseudoplásticos, comportamento também observado por Dams *et al* (2024) e Singh *et al* (2023).

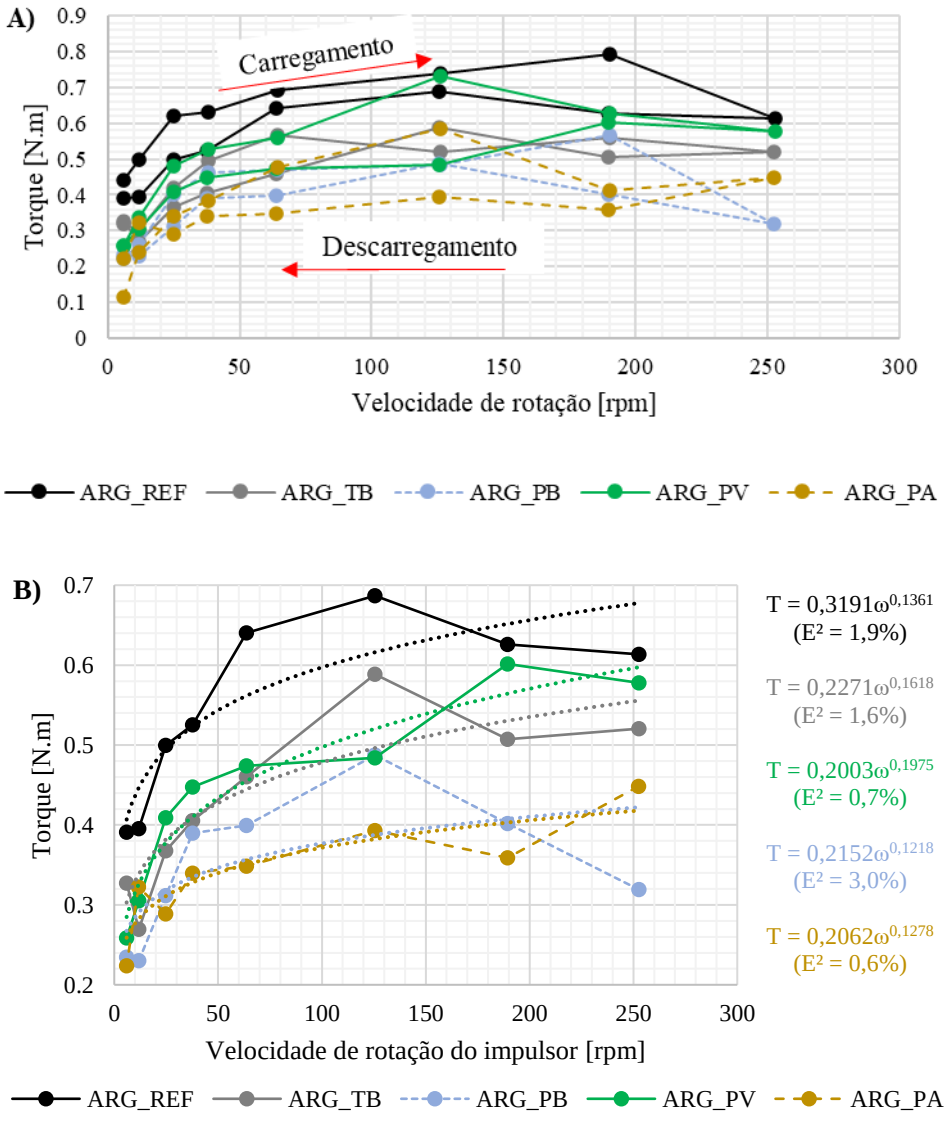


Figura 7 - Curvas de Torque vs. Velocidade de rotação do impulsor durante o ensaio de fluxo para todas as argamassas analisadas. A) carregamento e descarregamento; B) modelo adotado a partir do descarregamento.

A Figura 8.A apresenta as curvas do Indicador de viscosidade aparente *vs*. Velocidade de rotação do impulsor para o descarregamento de todas as argamassas analisadas. A Figura 8.B. destaca o indicador de viscosidade aparente de todas as argamassas analisadas para velocidades de até 50rpm e a Figura 8.C destaca o indicador para velocidades acima de 50rpm. Pelas Figuras 8.B e 8.C observa-se que a ARG_REF apresenta viscosidade aparente maior que as demais argamassas analisadas dentro do intervalo de velocidades analisado, o que é coerente com os resultados de índice de consistência e pode estar relacionado com a granulometria das substituições e a água livre no sistema.

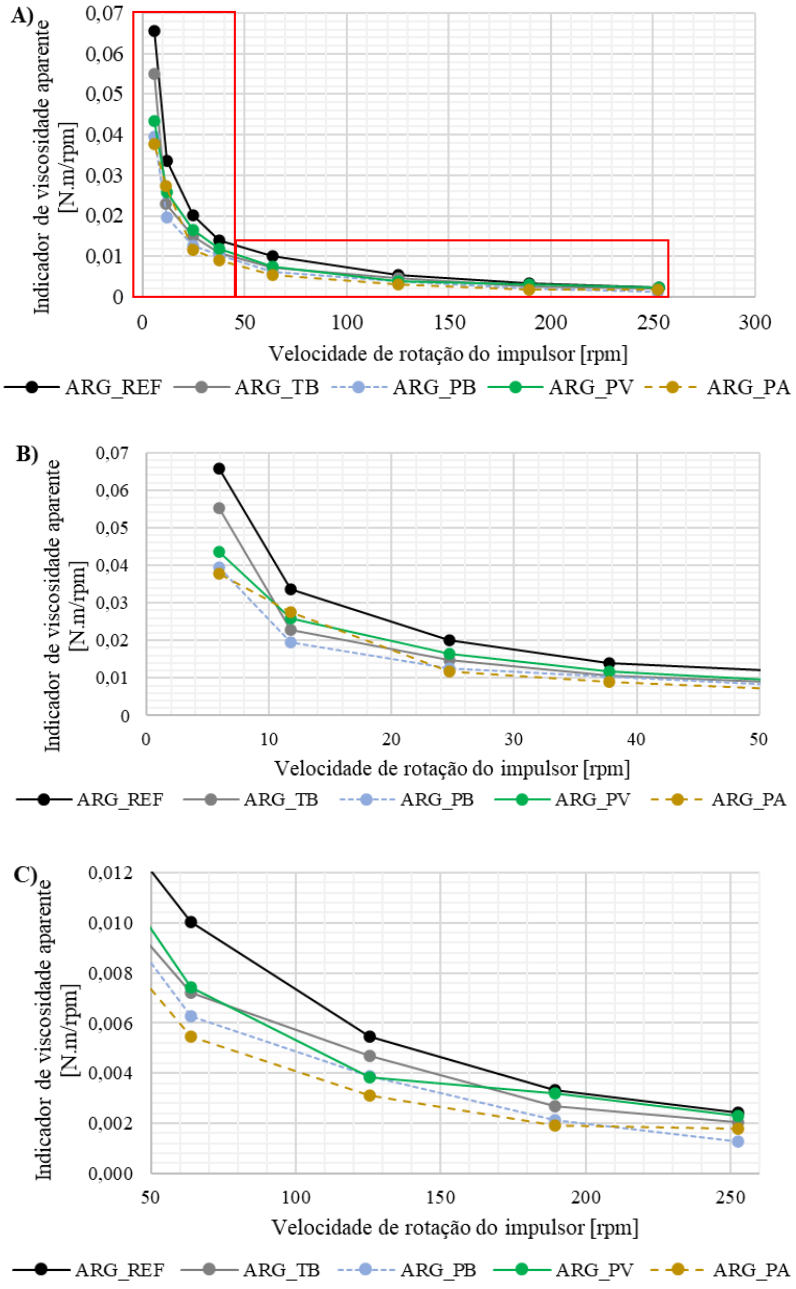


Figura 8 - Curvas do indicador de viscosidade aparente *vs*. velocidade de rotação do impulsor para o descarregamento de todas as argamassas analisadas. A) todas as velocidades; B) até 50rpm; C) a partir de 50rpm.

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Figura 9 apresenta os valores de resistências médias à compressão e à tração na flexão das argamassas para o período de 28 dias de cura. Quanto aos resultados de resistência à compressão, tem-se uma redução da resistência mecânica dos traços com substituições em relação ao traço de referência, pelo aumento da relação água-cimento (a/c). Com valores de resistência mais próximos ao ARG_REF, o traço ARG_PV e ARG_TB, devido a relação a/c próximas. Os traços ARG_PA e ARG_PB foram os traços com menor resistência mecânica devido a maior relação a/c e maior teor de água na mistura, e os traços com maiores teores de substituição do cimento. Cabe destacar ainda, que todos os traços apresentaram um baixo desvio padrão, menor que 0,8. As argamassas com resíduo de vidro obtiveram maior resistência à tração na flexão em comparação com a referência, exceto o traço com talco de vidro.

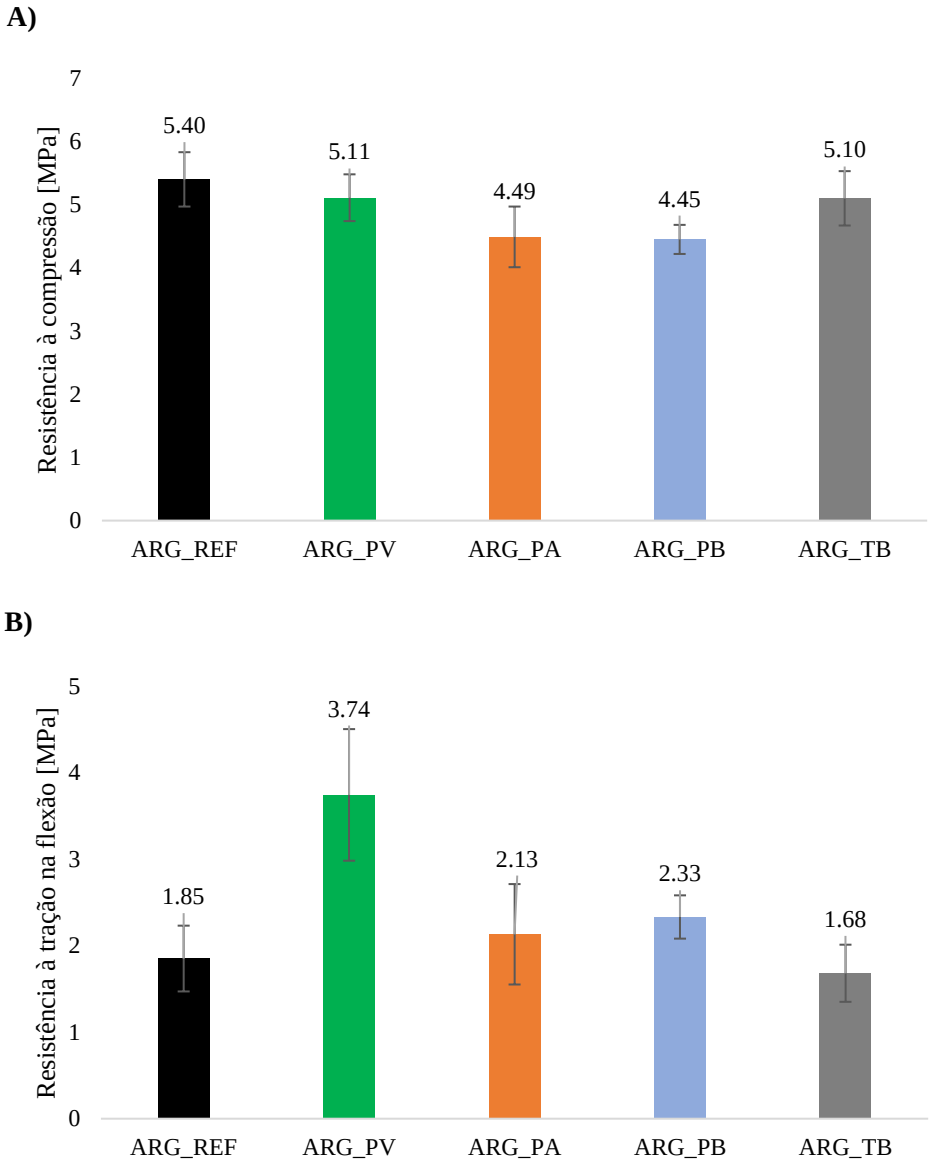


Figura 9 – Resultados médios de resistência. A) Compressão; B) Tração na flexão.

4 CONCLUSÕES

Visando a caracterização reológica de argamassas para revestimento interno com incorporação de resíduos de vidro, cinco argamassas foram produzidas, sendo uma delas de referência e as demais compostas por resíduos de vidro de diferentes granulometrias e colorações. Os resultados encontrados nesse trabalho foram:

- As argamassas com incorporação de resíduos de vidro apresentaram menor torque do que a argamassa de referência;
- Todas as argamassas apresentaram tixotropia sem efeito aparente das substituições realizadas;
- Todas as argamassas apresentaram comportamento pseudoplástico;
- As argamassas com incorporação de resíduos de vidro indicaram possuir menor viscosidade quando comparadas à argamassa de referência;
- A resistência à compressão média nos traços com pó de vidro âmbar e pó de vidro branco apresentou valores mais baixos devido a maior relação água/cimento nesses traços;
- As argamassas com resíduo de vidro obtiveram maior resistência à tração na flexão em comparação com a referência, exceto o traço com talco de vidro.

Conclui-se que, considerando o comportamento no estado fresco e os parâmetros de resistência à compressão e tração na flexão no estado endurecido, que a incorporação de resíduos de vidro é viável e possibilita a melhora na trabalhabilidade da argamassa. Sendo indicado a análise de mais propriedades, principalmente do estado endurecido, para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM23: Cimento portland e outros materiais em pó - determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

DE AZEVEDO, A. R. G., ALEXANDRE, J., ZANELATO, E. B., MARVILA, M. T. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. *Construction and Building Materials*, 148, 359–368. (2017). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208

CARVALHO, I. C., MELO, A. R., MELO, C., BRITO, M. S., CHAVES, A. R., DE ALBUQUERQUE LIMA BABADOPULOS, L. F., & BASTOS, J. B. Evaluation of the effect of rubber waste particles on the rheological and mechanical properties of cementitious materials for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 411, 134377. (2024). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134377

DAMS, B., CHEN, B., KAYA, Y. F., ORR, L., KOCER, B. B., SHEPHERD, P., KOVAC, M., BALL, R. J. Fresh properties and autonomous deposition of pseudoplastic cementitious mortars for aerial additive manufacturing. *IEEE Access*, 1. (2024). https://doi.org/10.1109/access.2024.3373188

NIU, Y., CHENG, C., LUO, C., YANG, P., GUO, W., LIU, Q. Study on rheological property, volumetric deformation, mechanical strength and microstructure of mortar incorporated with waste glass powder (WGP). *Construction and Building Materials.* 408 (2023) 133420. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4514931

OLIVEIRA, R., BRITO, J. de**.,** VEIGA, R. Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 95 75-88. (2015). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.049

SINGH, A., THAKARE, A. A., CHAUDHARY, S. A case study on examining the fresh-state behavior of self-compacting mortar containing waste powders from various sources. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02684. (2023). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02684

SRINIVASAN, MALUR. Assessment of the potential of three attritor-milled and consolidated nanostructured materials for sliding wear resistance applications. *The Journal of CPRI*. Volume 10. 183-190. (2014).

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE AGREGADOS LEVES OBTIDOS COM DIFERENTES ARGILAS E PERCENTUAIS DE RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO

Iago Cavalcanti Pontes[a]; Jose Anselmo da Silva Neto[a]; Liszandra Fernando de Araújo Campos[a]; Marcos Alyssandro Soares dos Anjos[b]; Ricardo Peixoto Suassuna Dutra[a]

[a]UFPB - Universidade Federal da Paraíba, PPCEM - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Tecnologia, Campus I, João Pessoa, Paraíba, Brasil , CEP: 58051-900, e-mail: ricardopsd@gmail.com

[b]IFPB - Instituto Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, Avenida Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, João Pessoa, Paraíba, Brasil, CEP: 58015-435, e-mail: marcos.alyssandro@gmail.com

RESUMO

Agregados leves são materiais usados em diversas aplicações. Como materiais de construção são usados em combinação com outros materiais, para a produção de blocos e concretos leves. Neste trabalho foi utilizado o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) formulado com duas diferentes argilas para obter agregados leves. Pesquisas indicam que o (RPP) tem potencial de expandir ao ser submetido a temperaturas elevadas. Porém, existe uma dificuldade de moldagem dos produtos, uma vez que este resíduo não apresenta plasticidade e coesão. Neste contexto, o presente trabalho estudou a influência da adição de diferentes percentuais do (RPP) em argilas procedentes da região litorânea da Paraíba, Brasil, visando, sobretudo, avaliar as propriedades mecânicas e relacioná-las com a expansividade dos materiais e porosidade dos agregados leves. Os materiais de partida passaram por processos de preparação e corpos-de-prova no formado de prisma retangular foram obtidos por prensagem após adição de água. Em seguida o material conformado foi seco em estufa e submetido à queima em diferentes temperaturas. Resultados indicam que o aumento do teor de resíduo contribuiu para o aumento da expansibilidade e da porosidade e diminuição da resistência à flexão, independente da argila utilizada, e consequente potencial para fabricação de agregados leves.

Palavras-chave: Agregados, Agregados leves, Resíduo, Polimento, Porcelanato.

1 INTRODUÇÃO

Agregados leves são materiais granulares, de origem mineral, de estrutura porosa, divididos em partículas de dimensões variadas, com massa específica inferior a 2000 kg/m³ (BSI, 2002). Segundo a NBR NM 35 (1995), em geral, são considerados como agregados leves aqueles que apresentam massas unitárias inferiores a 1120 kg/m³.

O processo de fabricação de agregado leve possui elevado potencial para incorporação de resíduos (Ayati et al., 2018), tendo em vista que uma série de materiais secundários já foram utilizados juntamente com argilas na sua produção. Assim, a utilização do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) pode ser visto como uma prática vantajosa, em decorrência da larga escala de fabricação do porcelanato convencional. Nesta perspectiva, JACOBY; PELISSER (2015) destacam que durante a etapa de polimento são gerados cerca de 100 g de (RPP) por metro quadrado de porcelanato. Com base na produção de 152 milhões de metros quadrados de porcelanato, em 2023 (Anfacer, 2023), estima-se uma geração anual de 15.200 mil toneladas de (RPP) no Brasil. O (RPP) apresenta potencial de expandir ao ser submetido a temperaturas elevadas, porém, com dificuldade de moldagem dos produtos, em decorrrência de limitações relacionadas à plasticidade e coesão.

Neste contexto, esta pesquisa analisou a influência da adição de diferentes percentuais do (RPP) em argilas de diferentes características, oriundas da região litorânea da Paraíba, Brasil, com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas e relacioná-las com a expansividade dos materiais e porosidade dos agregados leves. Foram utilizadas diferentes formulações, a fim de avaliar o efeito do (RPP) nas propriedades essenciais dos agregados obtidos, bem como a ação das altas temperaturas de queima na expansão e formação de poros causada no (RPP), determinando o seu potencial de ação como precussor de agregado leve inovador.

A fundamentação desta pesquisa experimental se baseia nas contribuições investigativas da incorporação do (RPP) na obtenção do agregado leve para uso como material de construção em combinação com argilas regionais, para a produção de blocos e concretos leves, por exemplo. Ao mesmo tempo, busca-se assegurar uma destinação final para o (RPP), conferindo-lhe um potencial de sustentabilidade econômica-social e reduzido impacto no meio ambiente.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

Os materiais utilizados neste trabalho foram: (a) resíduo do polimento do porcelanato (RPP), cedido por uma empresa fabricante de porcelanatos em João Pessoa- PB, recolhido diretamente do chão de fábrica; (b) argilas regionais do litoral paraibano de diferentes características, sendo uma de queima vermelha (ARG V) que possui teores elevados dos óxidos fundentes (14,3%), além de um considerável teor do óxido fundente Fe_2O_3 (5,7%), e outra de queima branca (ARG B) que possui elevado teor de Al_2O_3 (50,8%).

2.1 PRODUÇÃO DOS AGREGADOS LEVES

Os agregados foram conformados por prensagem, de forma que uma quantidade necessária de 8% de umidade, sendo empregada uma matriz metálica de formato retangular com 20 mm de largura por 60 mm de comprimento, via prensagem uniaxial, através de uma prensa hidráulica. Para isso, foi aplicada pressão de 40 MPa. Após a conformação os corpos cerâmicos foram secos em estufa a 110 °C. Os corpos cerâmicos foram queimados em forno elétrico em 3 temperaturas distintas: 1200, 1220 e 1240 °C. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e um patamar de permanência de 30 minutos após alcançar a temperatura final.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PRODUZIDOS

O estudo dos agregados, fabricados pelo método de conformação por prensagem, envolveu os ensaios de caracterização de índice de inchaço (expansibbilidade), perda de massa, massa específica aparente, absorção de água, resistência à flexão e módulo de deformação.

2.2.1 Índice de inchaço

O índice de inchaço reflete o quanto, percentualmente, o agregado expandiu após passar pela sinterização, sendo obtido através da Equação (1), ressaltando que valores positivos indicam que houve inchaço do agregado, ou seja, aumento do seu volume.

$$II = \frac{V_f - V_i}{V_i} \; x \; 100 \qquad \text{(Equação 1)}$$

II é o Índice de inchaço do agregado (%); V_i = volume inicial médio; e V_f = volume final médio.

2.2.2 Perda de massa

A perda de massa reflete o quanto, percentualmente, o agregado perdeu massa após passar pelo tratamento térmico, sendo calculada com base na medida de massa de cada agregado, na condição seca (após secagem em estufa a 100 °C por 24h) e após sinterização na respectiva temperatura analisada, utilizando balança de precisão de 0,001 g, conforme Equação (2).

$$P_m = \frac{M_d - M_s}{M_d} \; x \; 100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

onde, P_m é perda de massa do agregado (%); M_s é a massa do agregado na condição sinterizada (g); e M_d é a massa do agregado na condição seca (g).

2.2.3 Massa específica aparente

O ensaio de massa específica aparente foi adaptado da NBR 6458 (ABNT, 2017), seguindo todo o procedimento preconizado pela normativa, porém, adaptado para um quantitativo reduzido de amostras e foram obtidas através das Equações (3).

$$P_{ap}(s) = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \; x \; P_w \qquad \text{(Equação 3)}$$

onde, P_{ap} (s) é a massa específica aparente do agregado (g/cm³); M_s é a massa da amostra seca (g); M_{sat} é a massa da amostra saturada, superficialmente seca (g); M_i é a massa da amostra totalmente imersa em água (g); e, P_w é a massa específica da água (g/cm³) à temperatura T (°C) do ensaio.

2.2.4 Absorção de água

O ensaio de absorção de água dos agregados foi adaptado da NBR 6458 (ABNT, 2017), seguindo todo o procedimento preconizado pela normativa, porém, adaptado para um quantitativo reduzido de amostras e foram obtidas através das Equações (4).

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \; x \; 100 \qquad \text{(Equação 4)}$$

onde, A_a é a absorção de água, em porcentagem; M_s é a massa da amostra seca (g); M_{sat} é a massa da amostra saturada (g).

2.2.5 Resistência à flexão

A realização dos ensaios a flexão a três pontos foi estabelecida de acordo com a norma NBR 13818:1997, calculado sua resistência à flexão seguindo a Equação (5):

$$\sigma_m \approx \frac{3\ x\ P\ x\ L}{2\ x\ b\ x\ e^2} \qquad \text{(Equação 5)}$$

σ_m é a resistência à flexão (MPa); P é a força de ruptura (N); L é a distância da barra de apoio (mm); b é a largura do corpo de prova ao longo da ruptura (mm); e é a espessura do corpo de prova (mm).

2.2.6 Módulo de deformação

O módulo de deformação dos agregados produzidos foi estimado a partir da relação proposta pela ACI 213 R-03 (2003) através da Equação (6).

$$Ec = 0{,}008 \times \gamma^2 \qquad \text{(Equação 6)}$$

onde, E_c é o módulo de deformação (MPa) e γ é a massa específica aparente (kg/m³).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DOS AGREGADOS OBTIDOS COM A ARGILA VERMELHA (ARG V) E O RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO (RPP)

3.1.1 Índice de inchaço e perda de massa

A Figura 1 apresenta os resultados comparativos dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados leves produzidos. Observa-se que, em geral, quase todas as composições apresentaram índice de inchaço (II) maior que zero, com progressão da expansão à medida que cresce a quantidade de (RPP) nas temperaturas mais elevadas. A expansão mais significativa foi de 187%, sendo observada na composição (20% ARG V – 80% RPP) quando sinterizada a 1240 °C. Enquanto isso, o menor [II] foi da formulação (100% ARG V), sinterizada a 1200 °C, com -11%.

É de conhecimento industrial que um dos abrasivos mais utilizado na etapa de polimento do porcelanato é composto por carbeto de silício (SiC) e cimento magnesiano (oxicloreto de magnésio). Com isso, a expansibilidade proporcionada nas formuações estudadas neste trabalho, deve-se, possivelmente, a decomposição térmica do SiC em sílica (SiO_2) e dióxido de carbono (CO_2) e a consequente geração de grande quantidade de gases, influenciando nas características microestuturais do agregado.

Observa-se na Figura 1 que o incremento de temperatura de sinterização não alterou significativamente a perda de massa nas composições dos agregados com (ARG V) que, se manteve praticamente constante (oscilando de ±1%). Verifica-se, também, que o incremento do teor de (RPP) diminui a perda de massa nos agregados produzidos a até 1,67%, observada na composição pura de (RPP).

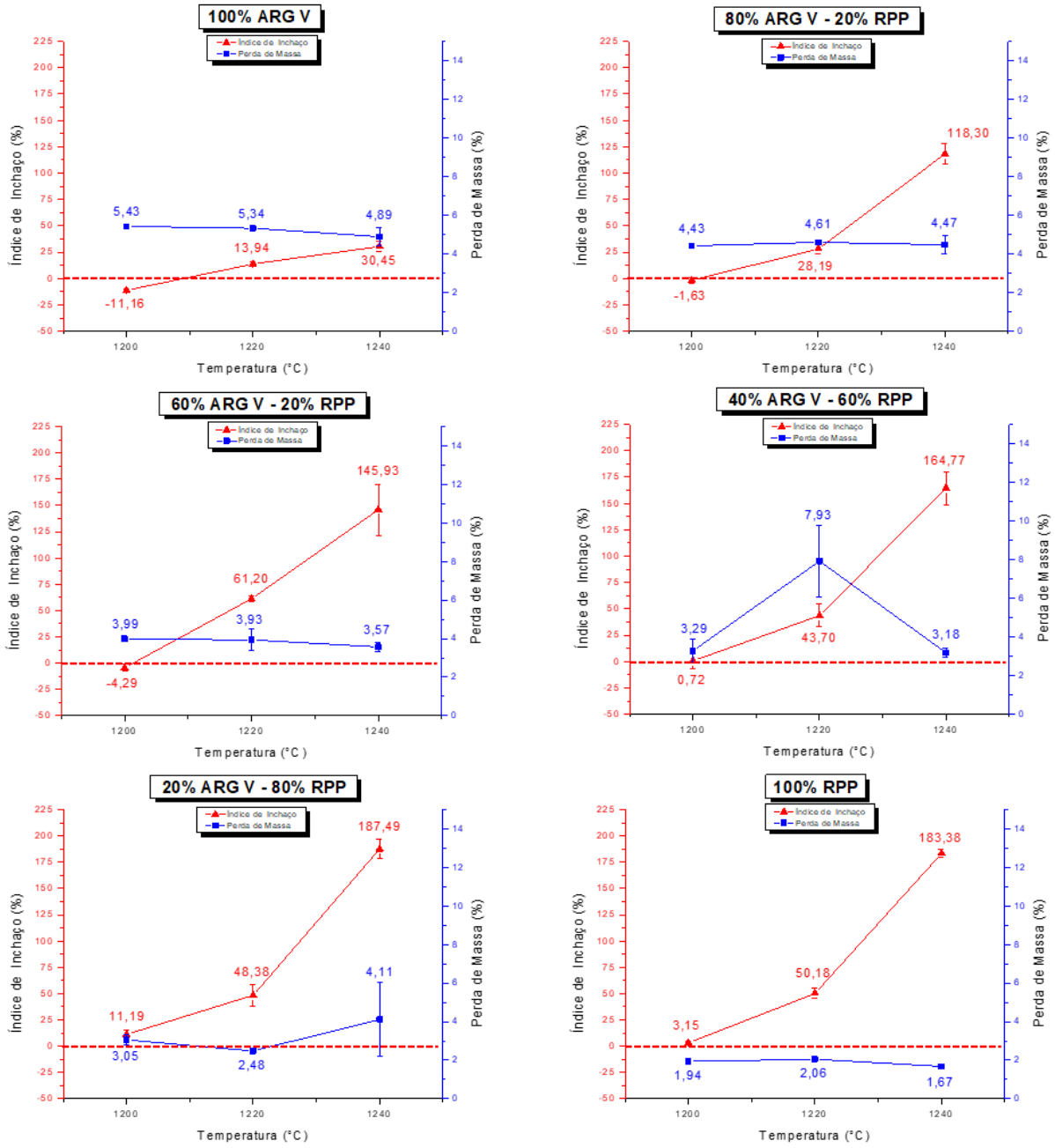


Figura 1 – Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados leves produzidos, nas seis formulações estudadas.

3.1.2 Massa específica aparente e absorção de água

A Figura 2 apresenta os resultados da massa específica aparente e absorção de água dos agregados de acordo com as diferentes composições e temperaturas usadas. De modo geral, os resultados de massa específica aparente variaram de 0,42 a 2,34 g/cm³, correspondentes as formulações puras de (RPP) a 1240 °C e de (ARG V) a 1200 °C, respectivamente. É possível perceber uma significativa variação na densidade, a partir da elevação da temperatura de sinterização, em que o aumento na temperatura de queima promove a redução na massa específica aparente das misturas elaboradas. Estes resultados são compatíveis com a significativa expansão e perda de massa encontrada nas composições, conforme demonstrado na Figura 1.

Com relação a absorção de água, os resultados mais extremos foram encontrados na composição pura de (RPP) a 1200 °C e na mistura (40% ARG V – 60% RPP) a 1220 °C, correspondendo aos respectivos valores de 0,83% e 7,13% (Figura 2). A oscilação na capacidade de absorção de água dos agregados leves pode ser atribuída a mudanças em sua porosidade intergranular. Consequentemente, é possível presumir que outras propriedades básicas dos agregados leves serão afetadas, como por exemplo, a resistência mecânica (Wang et al., 2009).

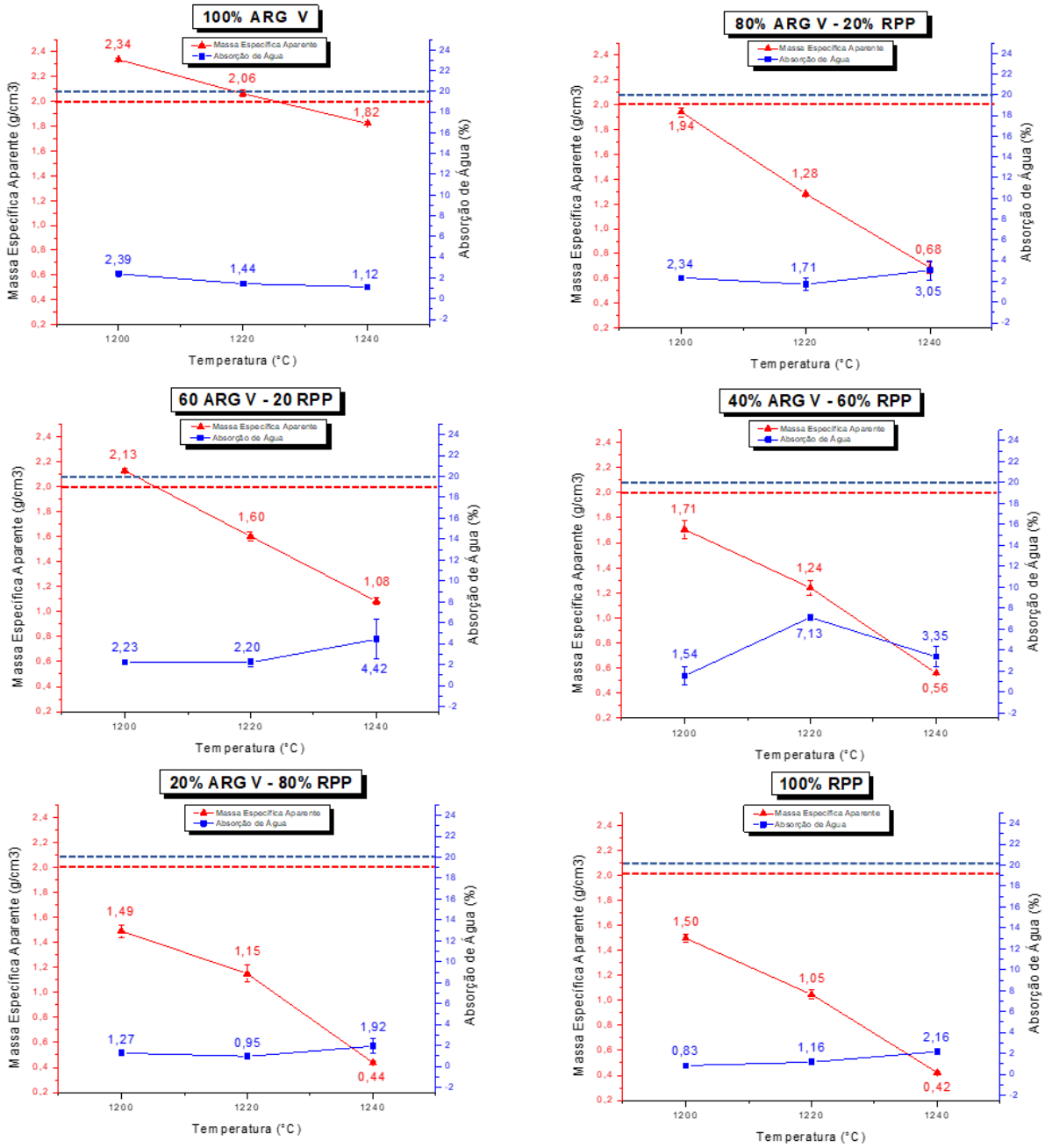


Figura 2 – Resultados dos ensaios de massa específica aparente e absorção de água dos agregados leves produzidos, nas seis formulações estudadas.

3.1.3 Resistência mecânica e módulo de deformação

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à flexão e do módulo de deformação, nas seis formulações estudadas.

A maioria dos agregados produzidos apresentaram índices de resistência mecânica superiores aos encontrados em agregados leves comerciais, comumente utilizados em concretos leves estruturais (Cinexpan, 2024). Os resultados mais expressivos foram de 16,95 e 17,90 MPa, que foram identificados nas formulações (20% ARG V - 80% RPP) e (40% ARG V - 60% RPP) queimadas à 1200 °C.

Diversos fatores podem interferir na resistência mecânica dos agregados leves, além da densidade e absorção de água, pode-se destacar, também, o tamanho e distribuição de poros, a mineralogia e até mesmo o formato da amostra. De forma geral, estes fatores podem ser alterados pela temperatura de sinterização (Lau et al, 2017). Por esse ponto de vista, tornam-se mais compreensíveis os efeitos causados pela elevação da temperatura observados na Figura 3 (a).

A linha de tendência formada pelas composições que contém (ARG V) demonstra que, de forma geral, a adição de (RPP), resultou em ganhos de resistência mecânica. Dessa forma, entende-se que, há formação de mais fase líquida, resultando na redução da porosidade e na formação de um material cada vez mais vítreo e denso. Contudo, em patamares mais elevados de temperatura a resistência mecânica cai significativamente, uma vez que o (RPP) nessas condições, também, favorece a geração de gases, que, por sua vez, são aprisionados pela fase líquida formada, resultando no desenvolvimento de poros isolados, os quais são considerados concentradores de tensão, tornando-o mais frágil. Isto é coerente com os dados de índice de inchaço e perda de massa (Figura 1) e massa específica aparente e absorção de água (Figura 2), apresentados anteriormente.

De acordo com os dados registrados na Figura 3 (b), verifica-se que, com exceção dos agregados compostos com (100% ARG V) e (80% ARG V - 20% RPP), sinterizados a 1200 °C, todos os agregados produzidos deste grupo, na forma de prisma retangular, se apresentam dentro do intervalo de valores de módulo de elasticidade dos agregados leves comercializados (Lytag, Solite, Liapor, Leca, Arlita e Cinexpan), catalogados por Rossignolo & Agnesini (2011), entre 3 e 35 GPa.

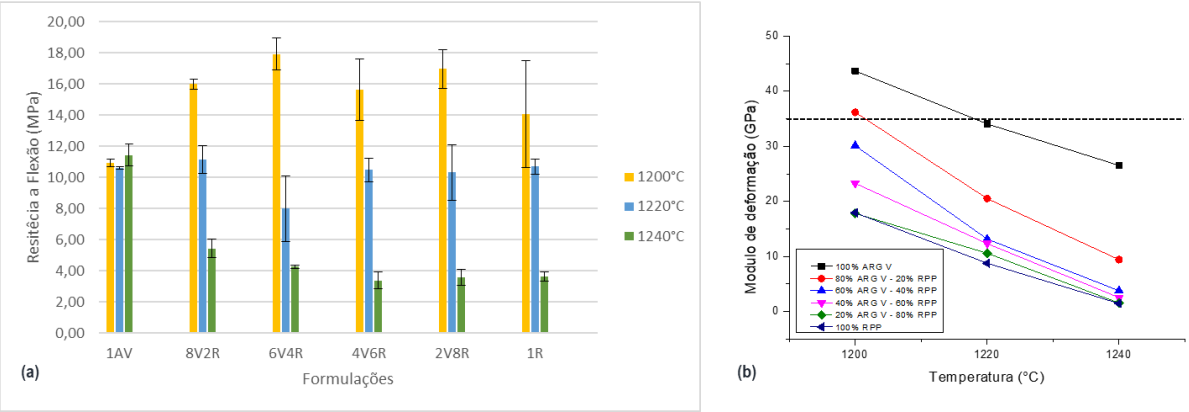


Figura 3 – Resultados dos ensaios dos agregados leves produzidos de (a) resistência à flexão e (b) módulo de deformação, nas seis formulações estudadas.

3.2 ANÁLISE DOS AGREGADOS OBTIDOS COM A ARGILA BRANCA (ARG B) E RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO (RPP)

3.2.1 Índice de inchaço e perda de massa

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados leves produzidos com a (ARGB) e o (RPP). Observa-se que apenas três composições apresentaram índice de inchaço (II) maior que zero, em pelo menos uma das faixas de temperatura analisadas.

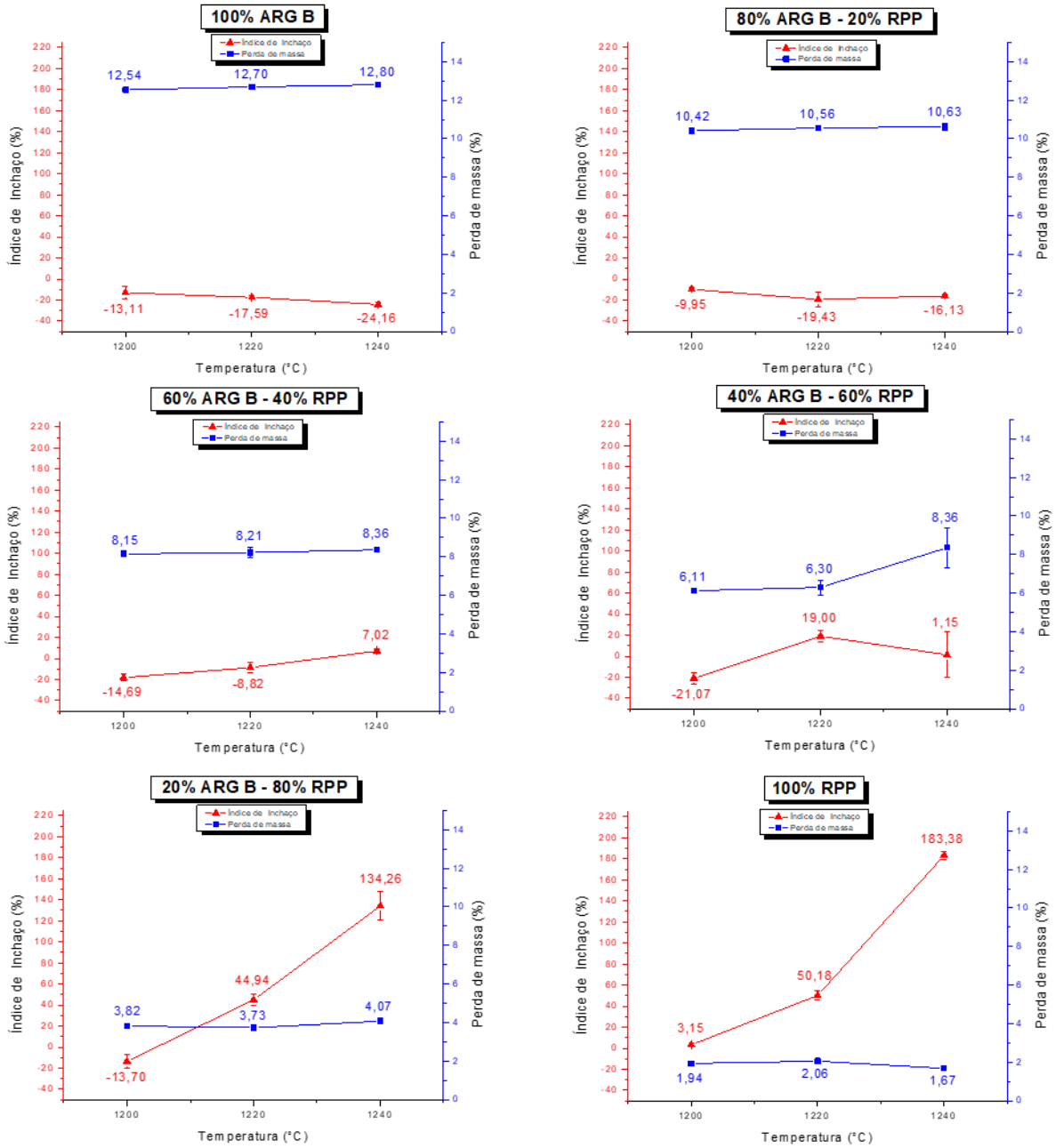


Figura 4 - Resultados dos ensaios de índice de inchaço e perda de massa dos agregados leves produzidos, nas seis formulações estudadas.

Também, só se verifica expansão significativa com uma quantidade muito elevada de (RPP), nas composições com (ARG B) e nas temperaturas de 1220 °C e 1240 °C. Menores teores de (RPP) e a

temperatura de 1200°C não foram suficientes para promover uma expansão relevante do material. A expansão mais significativa foi de 183%, sendo observada na composição (100% RPP), quando sinterizada a 1240 °C. Enquanto isso, a maior contração volumétrica também ficou a cargo da formulação (40% ARG B – 60% RPP), sinterizada a temperatura de 1200 °C, onde o agregado em questão apresentou um [II] de -21 %. Com isso, pode-se concluir que a refratariedade da (ARG B) está prevalescendo sobre a possibilidade de expansibilidade provocada pelo (RPP), diferentemento do observado para a (ARG V), conforme apresentado anteriormente na Figura 1.

Observando a linha de tendência, em geral, o incremento de temperatura de sinterização não alterou significativamente a perda de massa nas composições dos agregados com (ARG B) que, se manteve praticamente constante. Verifica-se, também, que o incremento do teor de (RPP) diminui bastante a perda de massa nos agregados produzidos a até 1,67%, observada na composição pura de (RPP) (Figura 4).

3.2.2 Massa específica aparente e absorção de água

A Figura 5 apresenta os resultados da massa específica aparente e absorção de água dos agregados de acordo com as diferentes composições e temperaturas usadas.

Os resultados de massa específica aparente variaram de 0,42 a 2,12 g/cm³, correspondentes as respectivas formulações puras de (RPP) e de (80% ARG B - 20% RPP) a 1240 °C. É possível perceber que, nas composições com menores teores de (RPP), a massa específica tende a aumentar com o aumento da temperatura. Uma significativa variação na densidade de partículas, nas composições com maiores quantidades de (RPP), só aconteceu a partir de elevadas temperaturas de sinterização, visto que houve uma elevada redução na massa específica aparente da mistura (20% ARG B – 80% RPP) com o aumento da temperatura de queima (Figura 5). Estes resultados são compatíveis com a expansão e perda de massa encontrada nas composições, conforme demonstrado na seção anterior (Figura 4).

Os resultados mais extremos de absorção de água foram encontrados nas composições puras de (RPP) e (ARG B) a 1200°C, correspondendo aos respectivos valores de 0,83% e 19,29% (Figura 5).

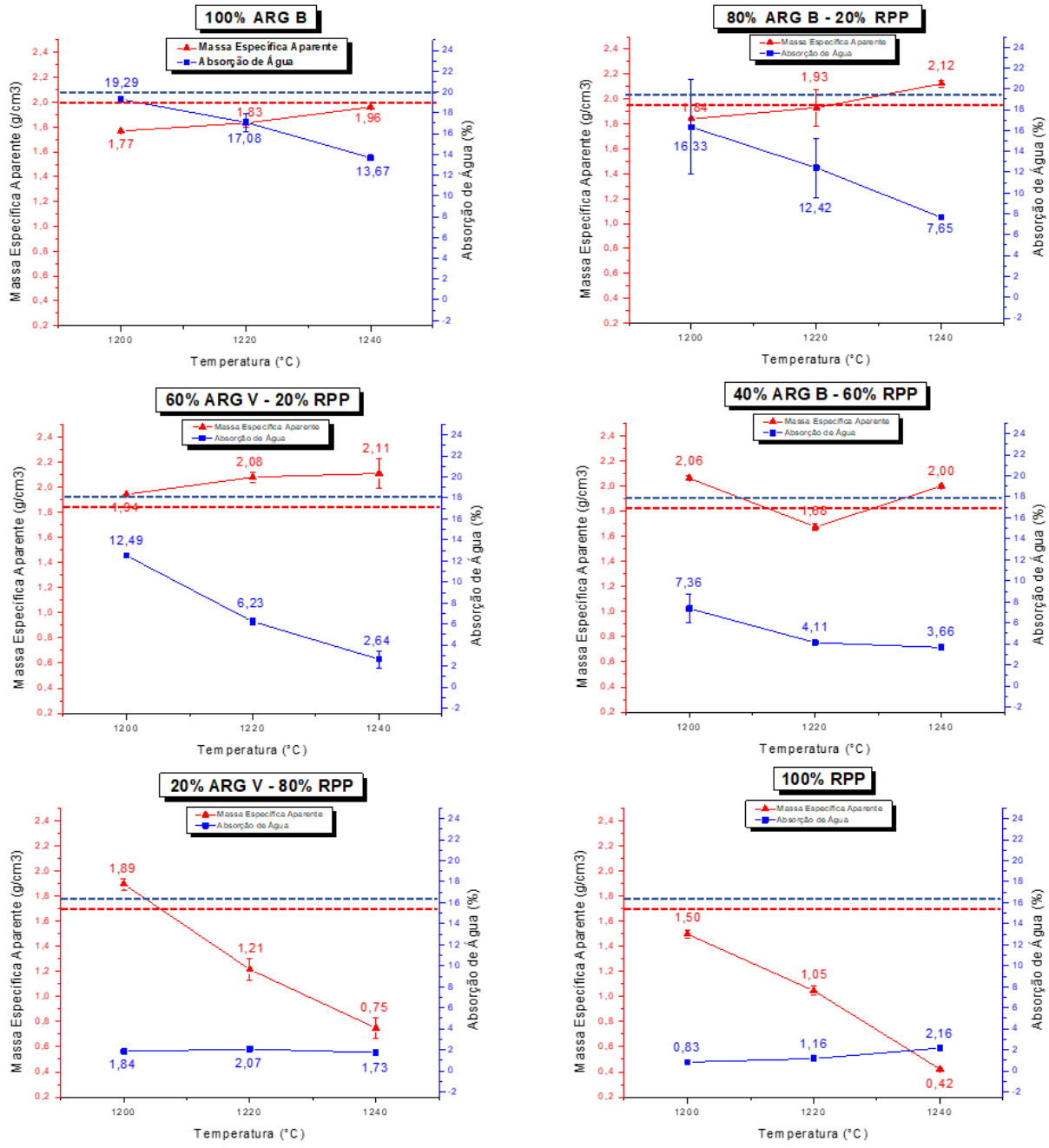


Figura 5 – Resultados dos ensaios de massa específica aparente e absorção de água dos agregados leves produzidos, nas seis formulações estudadas.

3.2.3 Resistência mecânica e módulo de deformação

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à flexão e do módulo de deformação, nas seis formulações estudadas. Observa-se que os resultados mais expressivos foram de 16,95 e 17,90 MPa, que foram identificados nas amostras (20% ARG B - 80% RPP) e (60% ARG B - 40% RPP) queimadas à 1200°C (Figura 6 (a)), apontando que os agregados produzidos apresentaram índices de resistência mecânica superiores aos encontrados em agregados leves comerciais, comumente utilizados em concretos leves estruturais (CINEXPAN, 2024).

A linha de tendência formada pelas composições que contém (ARG B) demonstra que, a adição de (RPP) resultou em ganhos de resistência mecânica inicialmente. O mesmo comporatamento e explicação foi ralato anteiormente para a (ARG V), estando, portanto, coerente com os dados de índice de inchaço e perda de massa (Figura 4) e massa específica aparente e absorção de água (Figura 5).

De acordo com a Figura 6 (b), todos os agregados gerados encontram-se dentro do intervalo de valores de módulo de elasticidade dos agregados comercializados, entre 3 e 35 GPa, a exceção das misturas (80% ARG B - 20% RPP) e (60% ARG B - 40% RPP) sinterizadas a 1240 °C.

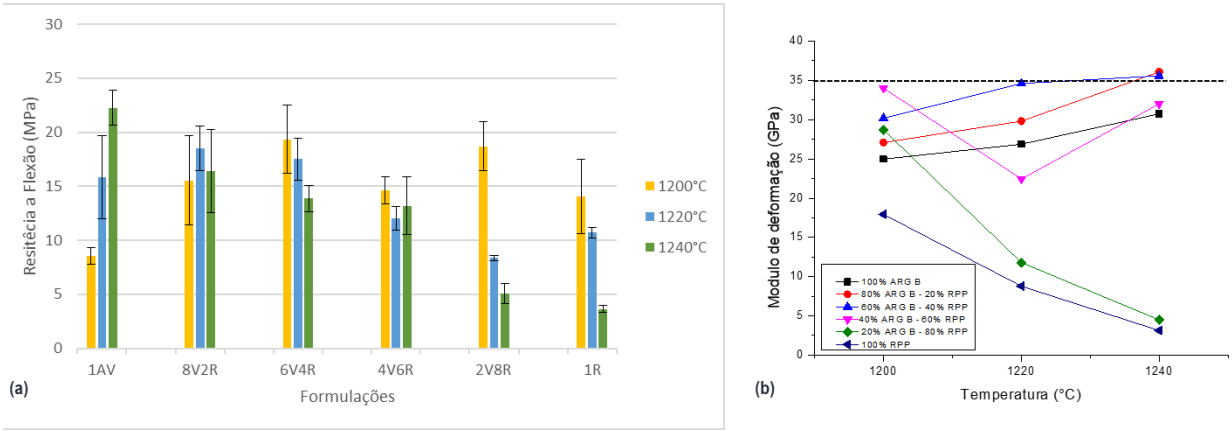


Figura 6 – Resultados dos ensaios dos agregados leves produzidos de (a) resistência à flexão e (b) módulo de deformação, nas seis formulações estudadas.

4 CONCLUSÕES

Com base na presente pesquisa, observa-se que o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) possui potencial significativo para fabricação de agregados leves, visto que sua utilização controlada, associada a argilas regionais, resultou na produção de agregados com propriedades adequadas para as principais aplicações comerciais de agregados leves em obras e serviços de engenharia.

A queima das amostras em temperaturas mais elevadas demonstrou-se bastante aconselhável. A temperatura ideal para sinterização dos agregados leves é fortemente influenciada pelo teor de (RPP) da mistura. Apesar da dificuldade de conformação, as propriedades físicas e mecânicas dos agregados elaborados, com até 100% de (RPP) denotam a obtenção de agregados leves de alta qualidade. Por diversas vezes, os valores de densidade, absorção de água e resistência à flexão foram no mínimo semelhantes aos apresentados por agregados leves comerciais, e apresentaram significativa expansão.

Visualizando o comportamento dos dois grupos de agregados, é possível concluir que, mesmo com o (RPP) agindo em relativa igualdade de ações, liberando gases e provocando a sua expansão, a argila branca, devido às suas características de diferente composição, por ser mais refratária, resistindo melhor a maiores temperaturas, não apresenta niveis de expansão tão elevados quanto os apresentados pelos agregados gerados com a argila vermelha.

Diante do exposto, pode-se concluir que, usando matérias-primas regionais, combinadas com metodologia adequadas para estabelecer proporções ideais entre elas, e diagnosticando temperaturas ótimas de sinterização para a produção de agregados leves, foi possível produzir exemplares com características de densidade de partículas, absorção de água e resistência mecânica,

que atenderam simultaneamente aos requisitos prescritos para essa classificação, demonstrando-se, então, comercialmente interessantes para aplicação em obras e serviços de engenharia.

REFERÊNCIAS

American concrete institute – ACI Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, Part1, 38p., 2003.

Associação nacional dos fabricantes de cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres (Anfacer). Números do setor. 2024. Disponível em: https://www.anfacer.org.br/. Acesso em: 20 mar. 2023.

Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

Ayati, Bamdad; Ferrándiz-Mas, Veronica; Newport, Darryl, Cheeseman, Christopher. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 162, p.124-131, fev. 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018

BSI. BS EN 13055-1: Lightweight aggregates. Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout. 2002.

Cinexpan (Várzea Paulista/SP). Cinexpan – Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda. 2019. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

Jacoby, P. C.; Pelisser, F. Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement. Journal of Cleaner Production, v. 100, p. 84- 88, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096

Rossignolo, J. A, Agnesini, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 42. p. 1531-1568.

Wang, Xingrun et al. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. Waste management, v. 29, n. 4, p. 1330-1335, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.09.006

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ECONOMIA CIRCULAR AZUL – POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO DAS CONCHAS DE BIVALVES NA GERAÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

Fernanda Caroline Magalhães[a,b*]; Poliana Bellei[a]; Eduarda Marques da Costa[c]; Inês Flores-Colen[a]

[a] (CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal);

[b] (CiTUA, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal);

[c] (CEG-IGOT, Universidade de Lisboa – Laboratório TERRA, 1600-276, Lisboa, Portugal)

*correspondente: fernandamagalhaes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A economia global ainda predominantemente adota modelos lineares de produção, baseados no ciclo convencional "fazer, usar e descartar". A Economia Circular, como uma alternativa inovadora, propõe a reintegração de resíduos no ciclo produtivo, buscando minimizar impactes ambientais e a extração excessiva de matérias-primas. Neste contexto, surge a Economia Azul, focada na preservação dos recursos marinhos e no uso de recursos limpos e saudáveis. Este estudo concentra-se na região do Algarve, em Portugal, e explora o papel dos agentes locais na valorização das conchas de bivalves, analisando como essas ações impactam as dimensões ambiental, económica e sociocultural. A investigação abrange a aplicação de um inquérito com os envolvidos no circuito dos bivalves e possíveis interessados em reutilizar as conchas no setor da construção. Alguns conceitos existentes atualmente sobre a Economia Circular Azul, políticas públicas europeias e nacionais são discutidos. Conclui-se, após a recolha e análise dos resultados do inquérito, que as conchas dos bivalves possuem potencial de utilização em outras atividades, como, por exemplo, a da construção. No entanto, existe desconhecimento dessa possibilidade de geração de novos produtos, bem como do seu valor económico, por parte dos entrevistados. Além disso, a falta de ligação entre as partes interessadas dificulta a sua reutilização, reforçando assim a importância do aumento de incentivos financeiros e políticas públicas específicas e fomentem o aparecimento de novas atividades.

Palavras-chave: aquicultura, bivalves, economia circular azul, reutilização de conchas

1 INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) surge a fim de reinventar o sistema atual linear baseando-se na prevenção, redução, reutilização, recuperação e reciclagem dos materiais e energia. O novo modelo é uma transição para energia renovável e materiais, onde há a desassociação da atividade económica do consumo de recursos finitos, resultando em um sistema resiliente benéfico aos negócios, à sociedade e ao meio ambiente (Diário da República, 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Nas últimas décadas, o modelo linear de produção extrai a matéria-prima, produz um bem e em seguida é descartado. Com isso, existe grande geração de resíduos e a diminuição contínua de recursos naturais, tornando esta ação insustentável do ponto de vista económico, ambiental e social. A economia circular sugere uma reinvenção deste modelo, com a reinserção dos resíduos no ciclo produtivo, a fim de minimizar a deposição no meio ambiente e a extração de matéria-prima (Korhonen *et al*., 2018).

A importância da transição para uma economia circular surge a partir da preocupação pelo aumento de densidade populacional que consequentemente aumentará o consumo de materiais extraídos, acarretando mais emissões de gases com efeito estufa (GEE), de poluentes para o ar, geração de resíduos e extração de matéria-prima (Diário da República, 2017).

Posterior à EC, surge o conceito de Crescimento Azul (CA) Ou Economia Azul (EA), outro campo de estudo que engloba atividades económicas que dependem do mar. O termo foi instituído em 1994 por Gunter Pauli, um economista belga, em seu livro "A Economia Azul: 10 anos, 100 inovações, 100 milhões de empregos" (Gunter, 2011), mas o conceito ganhou um grande destaque depois de ser endossado em discussões de líderes na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20) no Rio de Janeiro, Brasil, em 2012 (Clark Howard, 2018). Ainda neste princípio, a Economia Azul no contexto deste trabalho, visa transformar desperdício em riqueza, valorizando os recursos naturais, promovendo uma sociedade mais equitativa e fomentando a economia local (Eikeset *et al*., 2017).

Nesse contexto, surgiu o interesse em abordar esta temática com o objetivo de aproveitar e valorizar os resíduos de conchas de bivalves, explorando as oportunidades inexploradas para o crescimento económico através da Economia Circular Azul (ECA) na região do Algarve. A promoção da circularidade destes resíduos é crucial para alcançar benefícios ambientais, económicos e socioculturais (Magalhães *et al*., 2024), para além da investigação de soluções para estes resíduos, que podem ser aplicadas em vários sectores, incluindo a construção (Bellei *et al*., 2023).

Foram analisadas as principais referências de políticas relacionadas com a Economia Circular Azul a nível internacional, nacional e regional, com especial destaque para o setor da aquicultura. Além disso, foram identificados os principais agentes locais envolvidos na produção e consumo dos bivalves e o papel deles na transformação desses resíduos em novos produtos, alinhando-se aos objetivos da ECA.

2 CASO DE ESTUDO

Dado o considerável desenvolvimento da aquicultura na região do Algarve, é de extrema importância estudar os seus impactes, uma vez que podem influenciar significativamente a paisagem e o território. A atividade piscatória pode provocar alterações na paisagem em diversas escalas. Programas e estratégias a nível nacional e regional estão a procurar soluções para mitigar esses problemas, visando um território centrado na sustentabilidade (CCDR - Alg, 2007; CCDR - Alg., 2020; Comissão Europeia, 2022; República Portuguesa, 2019). Em regiões com uma forte afluência turística, é crucial preservar

o património natural, manter a qualidade do espaço e da paisagem, e garantir a disponibilidade de recursos para o desenvolvimento territorial (CCDR - Alg, 2007).

O Algarve é fortemente movido pelo turismo, estimulando outras atividades como por exemplo o setor da construção civil, o setor imobiliário e o setor hoteleiro (CCDR - Alg., 2015, 2019). A atividade turística resulta em pressões ambientais como emissões atmosféricas, descarga de efluentes, geração de odores e ruídos, implicações para a biodiversidade, uso de energia, uso de água, uso de materiais, uso do solo e da paisagem e produção de resíduos. Destaca-se ainda que um turista pode produzir diariamente duas vezes mais resíduos do que um residente local (Styles *et al*., 2013).

Localizado na zona mais meridional do território continental, o Algarve representa 4% do território nacional e regista uma população residente de 467.495 habitantes, cerca de 4,52% da população portuguesa. A região tem crescido rapidamente na perspetiva económica, visto que é um dos destinos mais importantes do país e da Europa, tornando o turismo o principal gerador da economia local (CCDR - Alg., 2015; INE, 2021).

A atividade de cultivo de moluscos bivalves é amplamente praticada em áreas específicas do Algarve (Ria Formosa e Ria do Alvor), Aveiro (Ria de Aveiro), Lagoa de Óbidos (Foz de Arelho) e nos estuários dos rios Sado e Tejo. Essas regiões são protegidas em certa medida, possuem fundos rasos, compostos por areia ou argila, apresentam temperaturas adequadas, alta salinidade e boa circulação de água (Silva & Batista, 2008).

A pesca, a moluscicultura e a aquicultura têm uma expressão significativa na área da Ria Formosa, uma zona húmida lagunar de elevada produtividade biológica e diversidade ecológica, correspondente ao Parque Natural da Ria Formosa (Figura 1) (CCDR - Alg, 2007). A maioria dos viveiros dedicados à produção de bivalves está localizada na Ria Formosa. O alto volume de produção nesta área deve-se às condições favoráveis ao cultivo, como a temperatura elevada da água. A região Centro ocupa o segundo lugar em termos de volume de vendas, totalizando 4.484 toneladas (DGRM, 2022).

Figura 1 - Mapa geográfico, Ria Formosa, Algarve. Fonte: extraído de CCDR-Alg., 2007.

O consumo de bivalves é uma parte integrante da gastronomia portuguesa e desempenha um papel significativo na indústria nacional. Este facto deve-se não apenas à produção de uma grande variedade de espécies, mas também ao número considerável de pessoas que dependem diretamente deste setor, seja através da apanha ou da comercialização. A prática neste setor gera uma grande quantidade de

resíduos de bivalves, e o lento processo de degradação das conchas aumenta o volume desses resíduos, tornando a sua reutilização ainda mais importante (Azeredo *et al*., 2018).

No que diz respeito à produção aquícola, a Figura 2 destaca o Algarve como a região mais significativa do país, representando cerca de 49% do volume de vendas da produção. Em 2020, essa região gerou um valor total de produção de aproximadamente 157 milhões de euros, equivalente a 6.236 toneladas (DGRM, 2021).

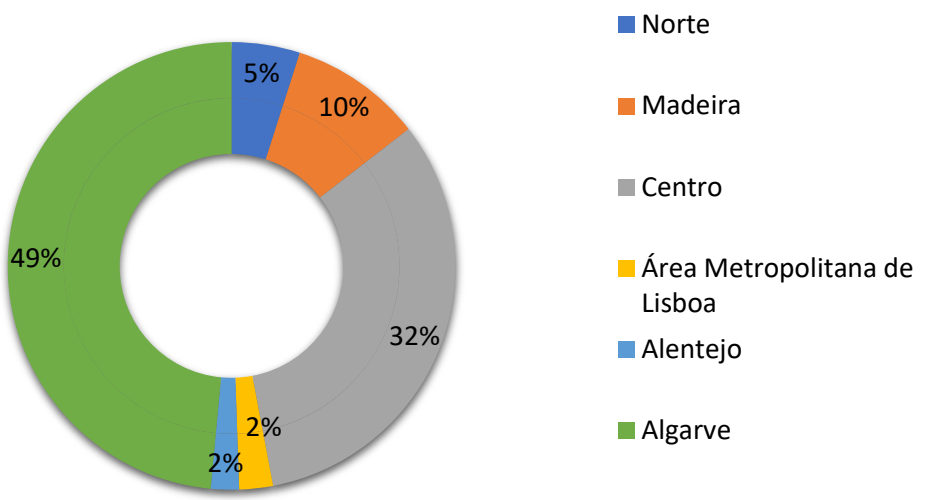


Figura 2 - Distribuição Geográfica da Produção Aquícola em Portugal em 2020. Fonte: elaborado a partir de INE, 2022 (Produção dos estabelecimentos de aquicultura).

3 A IMPORTÂNCIA DAS POLÍTICAS PÚBLICAS NA TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR AZUL

O estudo aborda as políticas públicas em nível europeu, nacional e regional relacionadas à Economia Circular, com ênfase na Economia Circular Azul (Quadro 1). Destaca a importância dessas políticas para implementar ações concretas em prol de uma economia circular. Ao fornecer diretrizes, incentivos e regulamentações, essas políticas públicas são essenciais para criar um ambiente favorável à Economia Circular e promover a transformação necessária para uma economia mais sustentável e resiliente. Além disso, o estudo destaca como essas políticas e programas visam promover o crescimento económico, a coesão social, a sustentabilidade ambiental e o fortalecimento da governança.

Quadro 1 - Planos e Programas enquadrados no contexto de Economia Circular e Economia Circular Azul

União Europeia	Portugal - Nacional	Portugal - Regional
Plano De Ação Da Economia Circular 2015	Plano De Ação Para A Economia Circular Em Portugal	PO Algarve 2014–2020. Diagnóstico E Estratégia
Plano De Ação Da Economia Circular 2020	Plano de Ação para a Circularidade na Construção (PACCO)	PO Algarve 2030 – Estratégia De Desenvolvimento Regional
Pacto Ecológico Europeu	PNPOT	PROT Algarve
	PO Mar 2020	
	Estratégia Nacional Para O Mar 2021-2030	
	PO Mar 2030	

3.1 UNIÃO EUROPEIA

As três políticas apresentadas a nível europeu apresentam regulamentações estabelecidas pela União Europeia (EU) que são desenvolvidas e aplicadas em âmbito supranacional, uma vez que esse bloco representa uma significativa força económica e política, composto por 27 nações. Devido à sua abrangência, as propostas da União Europeia desempenham um papel relevante ao direcionar estratégias e estabelecer diretrizes que abrangem os princípios da economia circular, afetando todos os países pertencentes ao bloco. Essas diretrizes abordam elementos fundamentais para promover a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos dentro do contexto da economia circular.

Em 2015, a Comissão Europeia apresentou o relatório “Fechar o Ciclo – Plano de Ação da UE para a Economia Circular”, estabelecendo um mandato concreto e ambicioso para apoiar a transição para uma economia circular. O plano de ação, que pede a colaboração ativa do Parlamento Europeu, do Conselho e de todas as partes interessadas, representa um avanço significativo ao implementar medidas abrangentes que cobrem desde a conceção dos produtos até à gestão de resíduos e a reutilização de matérias-primas secundárias. Em conexão com a Economia Circular Azul, o plano inclui esforços para prevenir e reduzir significativamente a poluição marinha, propondo uma meta de redução de 30% do lixo marinho até 2020 (Comissão Europeia, 2015).

Após cinco anos, a Comissão Europeia apresenta, em março de 2020, o “Novo Plano de Ação para a Economia Circular para uma Europa mais limpa e competitiva”. Baseado nos mesmos princípios, mas nitidamente mais crítico em relação à importância da Economia Circular e com especial atenção a setores com utilização intensiva de recursos, como o da eletrônica e das TIC (Tecnologias da Informação e Comunicação), os plásticos, os têxteis e a construção. O plano destaca a importância da cadeia de valor dos produtos e os desafios em termos de sustentabilidade que exigem ações urgentes, abrangentes e coordenadas. Em comparação com a versão anterior, o plano atual especifica os setores nos quais é necessário identificar as barreiras para a expansão dos mercados de produtos circulares. Esses setores incluem eletrônica e TIC, baterias e veículos, embalagens, plásticos, têxteis, construção e edifícios, e alimentos, água e nutrientes (Comissão Europeia, 2020).

O Pacto Ecológico Europeu, publicado em 2019 pela Comissão Europeia, é uma resposta aos desafios climáticos e ambientais, lançando uma nova estratégia de crescimento para a UE. Seu objetivo era a transformação da UE em uma sociedade equitativa e próspera, alcançando zero emissões líquidas de

gases de efeito estufa até 2050 e a promoção de um crescimento económico sustentável. No que tange diretamente a economia circular, o pacto idealizou mobilizar a indústria para uma economia circular e limpa, o que envolve promover produtos sustentáveis e reduzir a quantidade de resíduos. O pacto também sugere que quando a produção de resíduos é inevitável, é crucial recuperar o valor económico desses resíduos e minimizar o seu impacte ambiental e nas mudanças climáticas. Isso requer nova legislação, incluindo metas e ações para combater o excesso de embalagens e a geração de resíduos (Comissão Europeia, 2019).

3.2 NACIONAL

As políticas públicas nacionais de Portugal dialogam e seguem os parâmetros europeus e se mostram integradas com os planos regionais. Apesar da autonomia regional, as políticas nacionais são importantes para uma integralização das regiões a fim de criarem uma rede económica eficaz, levando ao desenvolvimento nacional íntegro e igualitário. As políticas nacionais apresentam parâmetros sociais, ambientais, económicos e culturais para que Portugal se torne mais competitivo dentro do cenário europeu, o que é fundamental para o desenvolvimento económico de maneira sustentável em todos os seus âmbitos.

Em 2017, o governo português lançou o Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) e, em abril de 2022, apresentou um relatório abordando as atividades e resultados alcançados no período de 2018 a 2020. O PAEC estabelece compromissos alinhados com importantes iniciativas internacionais, como o Plano de Ação para a Economia Circular da União Europeia, o Acordo de Paris, a Estratégia de Política Industrial da UE e os Objetivos da Agenda de Desenvolvimento Sustentável 2030 das Nações Unidas. Com base nos princípios proposto pelo PAEC, Portugal tem a ambição de avançar para uma economia mais circular até 2050 (APA, 2022).

O Plano de Ação para a Circularidade na Construção (PACCO) tem como objetivo alavancar e apoiar a transição para uma Economia Circular no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) em Portugal, estabelecendo metas a curto, médio e longo prazo, e linhas de orientação estratégicas para comunicação e marketing. O plano promove a transição para um modelo de funcionamento circular, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os objetivos 12 - Produção e Consumo Sustentável, e 13 - Ação Climática, além de outros objetivos como Energias Renováveis e Cidades Sustentáveis. O PACCO segue diretivas europeias como o “Green Deal” e o “Circular Economy Action Plan” e documentos nacionais como o Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) e o Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica (RNC2050). O plano inclui a promoção da reutilização e reciclagem de materiais, como as conchas de bivalves, no setor da construção, visando aumentar a durabilidade e adaptabilidade dos materiais, reduzir resíduos e promover a sustentabilidade. As ações propostas abrangem a reforma do quadro legislativo e regulamentar, desenvolvimento de guias de apoio à transição e criação de estruturas de apoio à gestão de resíduos. O PACCO busca alinhar o setor da construção rumo à neutralidade carbónica, reduzir a depleção de recursos naturais e promover a biodiversidade, contribuindo para um setor da construção mais sustentável e eficiente em Portugal (Fonseca *et al*., 2022).

O Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT) teve a sua primeira revisão em setembro de 2019, revogando o primeiro documento de 2007. O PNPOT desempenha um papel fundamental no sistema de gestão territorial ao definir objetivos, opções estratégicas e o modelo de organização do território nacional. Ele estabelece diretrizes e orientações que servem de referência para outros programas e planos territoriais, além de guiar as estratégias com impacte territorial, além de desempenhar um papel crucial como referencial territorial no enquadramento estratégico e

operacional de várias iniciativas importantes em Portugal. Ele serve como base para o Programa de Valorização do Interior, a Estratégia Nacional de Referência para a Política de Coesão pós 2020 e o Programa Nacional de Investimentos 2030 (República Portuguesa, 2019).

Em novembro de 2015 a Comissão Europeia aprovou o Programa Operacional MAR 2020. O MAR 2020 teve por objetivo implementar em Portugal as medidas de apoio enquadradas no Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos e das Pescas (FEAMP). A estratégia do PO MAR 2020 foi desenvolvida no âmbito da Estratégia Europa 2020, com o objetivo de promover o crescimento do setor das pescas, aquicultura, indústria transformadora e comercialização. Essa estratégia visou alcançar um setor inteligente, por meio do conhecimento e da inovação; sustentável, por meio da utilização eficiente dos recursos e da promoção da biodiversidade; e inclusivo, por meio da criação e diversificação do emprego nas zonas costeiras e da promoção da igualdade de gênero. Além de ter eixos principais direcionados à promoção da sustentabilidade no setor da aquicultura e à eficiência em termos de recursos (Comissão Europeia, 2014).

A Estratégia Nacional para o Mar (ENM 2021-2030), aprovada em maio de 2021, está presente em e relacionada a três dos cinco domínios de intervenção estabelecidos pelo Programa Nacional de Ordenamento do Território (PNPOT). Esses domínios são os seguintes: D1 - Domínio Natural, D3 - Domínio Económico e D5 - Domínio da Governança Territorial. A integração da Estratégia Nacional para o Mar nesses domínios visa abordar de forma abrangente e coerente as questões relacionadas aos recursos naturais marinhos, ao desenvolvimento económico associado ao mar e à adequada governança do território costeiro (ENM 2021-2030, 2021). Com o objetivo de enfrentar o desafio das alterações climáticas, a estratégia foi estruturada em torno de dez objetivos estratégicos específicos para a próxima década (Quadro 2) estabelecidos por meio de uma análise *SWOT* (ENM 2021-2030, 2021).

Quadro 2 - Objetivos estratégicos ENM 2021-2030

OE1 - Combater as alterações climáticas e a poluição e proteger e restaurar os ecossistemas
OE2 - Fomentar o emprego e a economia azul circular e sustentável
OE3 - Descarbonizar a economia e promover as energias renováveis e autonomia energética
OE4 - Apostar na garantia da sustentabilidade e segurança alimentar
OE5 - Facilitar o acesso à água potável
OE6 - Promover a saúde e bem-estar
OE7 - Estimular o conhecimento científico, desenvolvimento tecnológico e inovação azul
OE8 - Incrementar a educação, formação, a cultura e literacia do oceano
OE9 - Incentivar a reindustrialização e capacidade produtiva e digitalizar o oceano
OE10 - Garantir a segurança, soberania, cooperação e governança

O Programa Operacional Mar 2030, elegível a partir de janeiro de 2021, é único programa cofinanciado pelo Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos, das Pescas e Aquicultura (FEAMPA). O Mar 2030 é um dos quatro programas temáticos do Portugal 2030, contribuindo para o objetivo Portugal + Verde e, através de intervenções de base local, para o objetivo Portugal + Próximo. Tendo em conta as prioridades para concretizar os objetivos de proteção ambiental, o PO Mar 2030 propôs ações para mitigar os impactes negativos e contribuir para impactes positivos na natureza, com foco na medição para a conservação e gestão sustentável da biodiversidade marinha. O programa também abrange iniciativas de incentivo à recolha de resíduos marinhos e à remoção de artes de pesca perdidas, a promoção da recolha seletiva de resíduos gerados a bordo ou capturados no mar, a criação de sistemas

específicos de recolha no setor da pesca para promover a economia circular, além de ações de conscientização social e sensibilização da população em relação à poluição marinha e à preservação do mar (Comissão Europeia, 2022).

3.3 REGIONAL

A importância das políticas regionais é sobretudo a efetivação de políticas públicas que atendam as necessidades locais a partir de uma maior participação pública. As políticas regionais apresentam as características e necessidades específicas da região para que a economia desta possa estar integrada a movimentos e organizações ambientais, sociais e culturais a fim de valorizar não só as diversidades e particularidades da população, mas de todo território abordado. As políticas destacam o papel do Algarve no cenário nacional e europeu para uma maior integralização económica dentro do país e da União Europeia a partir dos potenciais únicos dessa região, como por exemplo o turismo baseado em uma economia mais diversa valorizando as possibilidades económicas locais.

O Programa Operacional Regional do Algarve, também conhecido como CRESC Algarve 2014-2020, é um programa de financiamento que teve como objetivo apoiar o desenvolvimento regional do Algarve durante o período de 2014 a 2020. Esse programa estava integrado no Acordo de Parceria Portugal 2020, o qual foi aprovado pela Comissão Europeia. O CRESC Algarve 2014-2020 teve como propósito promover um desenvolvimento equilibrado na região, concentrando esforços para fortalecer a competitividade, resiliência, empreendedorismo e sustentabilidade do Algarve (CCDR - Alg., 2021).

Segundo o Programa Operacional mais recente, em relação ao ponto que se relaciona a economia circular, entre 2013 e 2015, houve uma redução significativa no consumo de energia elétrica nos setores doméstico e público, superando a meta estabelecida. Essa diminuição foi parcialmente resultado do momento económico desfavorável. No entanto, nos dois anos seguintes, mesmo com a retomada da economia, a tendência de redução continuou, embora com um ritmo mais lento de 6%. Portanto, é importante manter os esforços e medidas de conscientização para continuar nesse caminho de redução do consumo de energia elétrica (CCDR - Alg., 2020).

Já o “PO Algarve 2030 – Estratégia De Desenvolvimento Regional” procurou estruturar as linhas de intervenção que foram consideradas prioridades no desenvolvimento das estratégias para o Algarve. A estratégia visa valorizar os recursos e profissionais da região, apoiando escolhas promotoras da competitividade no domínio da especialização consolidada ou complementar, assim como nos desafios das sociedades incluídos nas agendas internacionais (CCDR - Alg., 2020).

Em conformidade com a Agenda Regional para a Economia Circular, a região deve adotar um novo modelo económico baseado na inovação para a desmaterialização, buscando obter maior valor e utilidade dos recursos pelo maior período possível. Para tal, foram identificadas áreas prioritárias e definidos potenciais de circularidade nos setores do turismo, da gestão de resíduos e da pesca. Foi igualmente estabelecido um vasto leque de propostas de ação a serem implementadas de forma integrada e coordenada por vários intervenientes (CCDR - Alg., 2020).

O Plano Regional de Ordenamento do Território do Algarve (PROT), publicado em maio de 2007, é um documento que abrange todas as etapas necessárias para o desenvolvimento completo da região do Algarve, abordando setores ambientais, territoriais, urbanos, turísticos, históricos, de transporte e de equipamentos coletivos. O documento é completo, pois traz a abordagem desde o diagnóstico regional, fornecendo estratégias e normas até a avaliação dessas medidas, ou seja, ele carrega toda a

articulação dos setores, trazendo suas especificidades, necessidades e sua consecutiva monitorização (CCDR - Alg, 2007).

Os objetivos gerais do PROT tencionam recuperar força no setor de fornecimento a procura turística, como a pesca, buscando valorizar o potencial existente. Os objetivos que dialogam com o tema são a qualificação da base económica, ou seja, a mais-valia como resultado do aproveitamento dos recursos naturais como mar e praias. Essas metas têm como finalidade intensificar o turismo internacional criando atividades que mantenham a estrutura de sociedade do conhecimento e inovação, gerando emprego, proteção social e conservação dos recursos naturais (CCDR - Alg, 2007).

4 METODOLOGIA

O estudo foi produzido com o propósito de expor a significativa problemática decorrente da acumulação de cascas de bivalves, o desconhecimento da sociedade acerca do valor desse subproduto e como este resíduo impacta nas dimensões sociocultural, económicas e ambiental.

O inquérito foi estruturado em cinco grupos distintos, com questões formuladas tanto em língua inglesa como em portuguesa. Essas questões abrangem diversas dimensões, nomeadamente sociocultural, económica e ambiental. A distinção de cada dimensão no inquérito permitiu obter uma compreensão mais completa do problema, uma vez que estas dimensões estão interligadas e podem influenciar-se mutuamente. A compreensão das dimensões social, ambiental e económica é fundamental para avaliar o impacte de ações, políticas ou projetos numa comunidade ou na sociedade como um todo. Isso ajuda a determinar se essas ações são benéficas ou prejudiciais em várias áreas.

A Figura 3 ilustra a percentagem de questões em cada dimensão, com maior evidência na dimensão ambiental. Em resumo, a consideração e avaliação das dimensões social, ambiental e económica num inquérito desempenham um papel crucial na promoção de decisões mais responsáveis e equilibradas, contribuindo para alcançar objetivos de sustentabilidade a longo prazo.

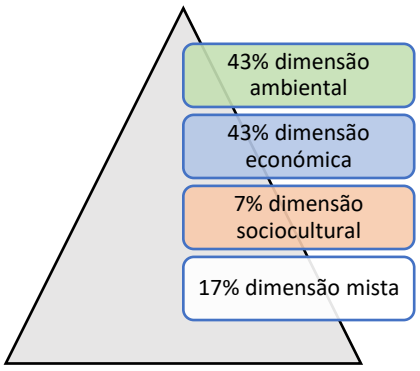


Figura 3 - Percentual por dimensão

O inquérito e as entrevistas foram realizados em Olhão, Faro e na Ilha da Culatra. A investigação abrangeu um total de 85 participantes dos diferentes grupos. Entre esses participantes, houve uma distribuição das respostas da seguinte forma: 15 foram recolhidas por meio de inquéritos digitais (*Google Forms*), 11 foram adquiridas através de aplicação via telefone e 59 foram conduzidos presencialmente.

Os dados adquiridos no inquérito, juntamente com as indicações da importância da promoção da circularidade exploradas nas políticas públicas analisadas, serviram como base para relacionar os

agentes locais e o papel destes na valorização das conchas de bivalves. Esta abordagem analisa como essas ações impactam as dimensões ambiental, económica e sociocultural.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O inquérito foi dividido em cinco grupos principais a fim de obter uma perspetiva das diferentes relações dos agentes com a produção, consumo e descarte das conchas de bivalves. Os grupos identificados como pontos chave para este trabalho foram: a) aquicultores, b) postos de depuração e distribuição, c) associações e cooperativas, d) intermediários, e e) empresas de construção civil e de materiais de construção.

Por meio das entrevistas e inquérito, procurou-se preencher lacunas cruciais de conhecimento relacionadas ao cultivo, consumo e destino dos bivalves, bem como entender de que maneira esses resíduos estão inseridos na sociedade e qual é o papel da sociedade na valorização desses resíduos. Dessa forma, as respostas obtidas puderam ser conectadas às dimensões ambiental, económica e sociocultural, proporcionando uma compreensão mais completa e holística desse cenário.

A partir destes resultados foi possível identificar a ligação e a importância da articulação das perspetivas e também a articulação de todos os grupos entrevistados para interpretação dos resultados e propor soluções viáveis para a problemática dos resíduos apresentados. A partir disso, foi desenvolvida uma estrutura que delineia como cada interveniente pode contribuir para a promoção de um sistema mais circular em relação aos resíduos das cascas de bivalves.

A partir dos cinco grupos principais abordados no inquérito, a análise foi expandida para incluir oito grupos de intervenientes, como produtores, consumidores, restaurantes, autoridades locais, partes interessadas, instituições de investigação, gerações futuras e mercados internacionais, com o objetivo de obter uma visão mais ampla. Esses resultados destacam uma oportunidade de conscientização e educação sobre a importância da gestão sustentável dos recursos marinhos e a promoção de produtos derivados desses materiais.

Cada um dos oito grupos analisados apresentam diferentes oportunidades para explorar o potencial das conchas de bivalves e determinar em que dimensão haverá impacte. O primeiro grupo, os produtores, está mais diretamente ligado ao produto e é responsável pela maior geração de resíduos. A partir do inquérito, foi identificado que de 10 a 30% da produção morre, gerando uma grande quantidade de resíduos antes mesmo de entrar no circuito de comercialização. Dessa forma, é de grande importância que esse grupo tenha conhecimento do descarte correto das conchas, permitindo que elas possam ser transformadas em novos produtos. Além disso, este grupo pode contribuir com práticas mais sustentáveis de pesca que preservem a saúde do ecossistema marinho e garantam a segurança dos produtos. O uso de materiais ecologicamente corretos nesse setor também é uma grande contribuição, incluindo materiais feitos com base nas próprias conchas, como é o caso dos blocos. A prática da aquicultura está enraizada na cultura algarvia, e em prol da preservação da identidade local, é necessário que haja incentivo e participação de jovens nesse setor, além da integração dos produtores na comunidade local, sempre respeitando as práticas tradicionais.

O segundo e o terceiro grupos, os consumidores e os restaurantes, têm grande representatividade, pois, depois dos produtores, são os que mais produzem resíduos. Além de produzirem, podem se responsabilizar por boas práticas que valorizem este produto, como a separação do resíduo de outros alimentos e o descarte correto. Os consumidores podem optar por comer ou comprar bivalves de estabelecimentos comprometidos com a sustentabilidade dos produtos, além de apoiar vendedores locais e contribuir para o desenvolvimento económico da comunidade. Já os restaurantes podem

aderir a programas de reciclagem, aumentando sua responsabilidade ecológica e se destacando entre os outros estabelecimentos. Os restaurantes também podem promover diversas ações de conscientização social, como o combate ao desperdício alimentar e o envolvimento da sociedade em práticas sustentáveis.

O quarto grupo, as autoridades locais, desempenha um papel crucial como formuladores de políticas públicas, tendo uma influência significativa no aumento da circularidade através de apoios e iniciativas que gerem emprego e fortaleçam a economia local. Além de promover políticas e financiamentos que apoiem a transição para uma cultura mais sustentável, as autoridades locais podem regulamentar e fiscalizar práticas para garantir que sejam corretas e eficientes. Elas também podem incentivar a reutilização das conchas de bivalves através de programas específicos, subsídios e campanhas educativas, promovendo assim uma economia circular e sustentável na comunidade.

O quinto grupo, as partes interessadas, é responsável por transformar esse resíduo em novos produtos nos diversos setores que abrangem essa oportunidade. O setor mais diretamente ligado à presente esta investigação é o da construção civil, onde existem estudos que analisam a incorporação de conchas de bivalves em materiais de construção e a possível utilização das conchas para a fabricação de blocos de construção. As partes interessadas podem ser provenientes de iniciativas públicas ou privadas interessadas em adotar um modelo de negócio sustentável. Dessa forma, há a oportunidade de disseminar produtos mais ecológicos e sustentáveis, atraindo clientes mais recetivos a materiais “amigos” ao meio ambiente. Além disso, essa prática pode gerar empresas e postos de trabalho na região, contribuindo para o desenvolvimento económico local.

O sexto grupo, as instituições de investigação, ao qual os autores deste artigo pertencem, é responsável por realizar investigação que busque formas ambientalmente responsáveis de gerir os resíduos provenientes da aquicultura, como as conchas de bivalves. É explorada a possibilidade de transformar as conchas em produtos com valor agregado, como materiais de construção, promovendo inovação no setor ao identificar novas aplicações para esses resíduos. Além disso, as instituições de investigação fornecem formação e capacitação a produtores e empresas locais sobre práticas sustentáveis e oportunidades económicas relacionadas às conchas de bivalves. Também a colaboração entre comunidades locais, empresas, autoridades e outras partes interessadas, maximiza os benefícios socioculturais, económicos e ambientais.

O sétimo grupo, as gerações futuras, representa aqueles que irão herdar os benefícios e desafios das práticas atuais. É essencial que as ações de hoje considerem o impacte a longo prazo, garantindo um meio ambiente sustentável e saudável. Os jovens, mais dispostos a promover mudanças, podem ver o setor como uma oportunidade de carreira, especialmente com ênfase em inovação e práticas sustentáveis. Introduzir programas de educação ambiental nas escolas e comunidades locais ajuda a desenvolver uma consciência ecológica. Além disso, abordar a falta de mão-de-obra jovem e promover o desenvolvimento económico sustentável assegura que as necessidades das gerações futuras sejam atendidas, equilibrando crescimento econômico com preservação de recursos.

O oitavo grupo, os mercados internacionais, pode estar disposto a importar produtos derivados de conchas de bivalves, especialmente se forem sustentáveis e ecológicos. A utilização de conchas como recurso renovável pode atrair mercados mais recetivos às questões ambientais. Produzir materiais de construção sustentáveis e económicos com base em conchas pode aumentar a competitividade internacional. A colaboração com empresas e instituições de outros países pode gerar parcerias internacionais para o desenvolvimento e comercialização desses produtos. Além disso, a conexão cultural autêntica pode ser um diferencial nos mercados internacionais, atraindo consumidores que valorizam a diversidade e a autenticidade.

A ligação entre as dimensões socioculturais, económicas e ambientais é de extrema importância para entender como a circularidade do bioproduto impacta no território do Algarve. Esta interconexão entre dimensões revela a complexidade e a amplitude dos efeitos da economia circular em uma região específica. Compreender a ligação entre elas promove a criação de uma sociedade mais consciente, próspera e sustentável, onde a prosperidade económica é equilibrada com a preservação do meio ambiente e uma cultura de responsabilidade social.

O planeamento urbano representa a interseção de três dimensões essenciais, com a economia circular emergindo como uma solução inclusiva e eficaz. A promoção de uma economia regional robusta não apenas impulsiona a produtividade da própria área, mas também contribui para o crescimento económico nacional de forma mais ampla. A relevância do planeamento urbano está intrinsecamente ligada à superação de desafios e à criação de soluções que fomentem um desenvolvimento que seja regenerativo para o meio ambiente. A união dessas dimensões é fundamental para a conceção de estratégias territoriais que incorporem políticas e mecanismos alinhados com as particularidades da região. O planeamento estratégico emerge como a ferramenta central capaz de abordar questões de sustentabilidade e de prever o desenvolvimento nas esferas económica, sociocultural e ambiental (Gura *et al*., 2023).

6 CONCLUSÕES

A investigação conduzida em Olhão, Faro e na Ilha da Culatra revelou que as conchas de bivalves, que são geradas em grande quantidade durante a produção e consumo de bivalves, têm uma versatilidade surpreendente para a criação de produtos inovadores e sustentáveis. Os dados recolhidos através de inquéritos e entrevistas com diversos grupos de intervenientes mostram que há uma oportunidade clara para transformar esses resíduos em novos produtos que têm valor agregado e utilizam o potencial das conchas de maneira eficiente.

Estimular a cultura territorial é uma maneira de promover o desenvolvimento económico e, ao manter as culturas ativas, é possível preservar o património e valorizar os produtores, priorizando essa herança. Incentivar os pequenos produtores, em particular, contribui para a luta contra a desigualdade social e promove a equidade. Um país que não adota a equidade social como princípio não consegue crescer economicamente, uma vez que todos os estratos da sociedade são igualmente importantes, e investir em todas as partes interessadas é fundamental.

A importância de programas de reciclagem, certificação sustentável e apoio governamental, bem como a promoção de práticas sustentáveis entre consumidores e restaurantes, é evidente. A economia circular promove a criação de empregos, inovação tecnológica e uma gestão mais eficiente de recursos, contribuindo para a sustentabilidade e resiliência económica da região do Algarve, o caso de estudo desta investigação

Em Portugal, a Economia Circular e a Economia Circular Azul têm ganho visibilidade como tópicos importantes no planeamento estratégico do país, impulsionados pelo reconhecimento e apoio da comunidade europeia. Esse destaque é refletido nas políticas públicas nacionais que têm elaborado propostas para melhorar a sustentabilidade. Nota-se que em Portugal, a economia circular já é amplamente discutida nas políticas nacionais e regionais, embora muitas vezes de forma geral. A economia circular é abrangente e inclui diversos setores, com foco principal no Plano de Ação da Economia Circular da União Europeia 2020. Este plano inclui uma variedade de esferas políticas, fluxos de materiais e setores, acompanhado por ações abrangentes para respaldar essa transformação sistémica por meio de inovação e aportes financeiros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), ao EEA Grants pelo projeto *Shellter*, ao CiTUA, ao CERIS, aos inquiridos do Algarve que participaram neste trabalho, à Cooperativa de Viveiristas Ria Formosa pela contribuição e apoio durante o desenvolvimento do trabalho, a Associação de Moradores da Ilha da Culatra e ao projeto BlocOyster que foi premiado pela Coca-Cola em parceria com a LPN-Liga para a Proteção da Natureza.

REFERÊNCIAS

APA. (2022). *Economia circular - Plano de ação para a economia circular (PAEC)*. https://apambiente.pt/apa/economia-circular

Azeredo, F. F., Gonçalves, J. F., Hinzmann, M., & Vaz-Pires, P. (2018). *Manual de boas práticas na ostreicultura em Portugal* (1.ª ed.).

Bellei, P., Torres, I., Solstad, R., & Flores-Colen, I. (2023). Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review. *Buildings*, *13*(6), 1546. https://doi.org/10.3390/buildings13061546

CCDR - Alg. (2007). *Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. Plano Regional de Ordenamento do Território (PROT).*

CCDR - Alg. (2015). *Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. RIS 3 Algarve: Estratégia Regional de Investigação e Inovação para a Especialização Inteligente.*

CCDR - Alg. (2019). *Algarve Economia Circular - Agenda Regional.*

CCDR - Alg. (2020). *Algarve 2030 - Estratégia de Desenvolvimento Regional*.

CCDR - Alg. (2021). *CRESC Algarve 2020 - Programa Operacional Regional do Algarve 2014-2020*. https://algarve2020.pt/resultados/relatorios-de-execucao/

Clark Howard, B. (2018). Blue growth: Stakeholder perspectives. *Marine Policy*, *87*, 375–377. https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2017.11.002

Comissão Europeia. (2014). *PO Mar 2020 - Pograma Operacional do Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos, das Pescas e Aquicultura - Programa para Portugal - MAR2020.*

Comissão Europeia. (2015). *Fechar o Ciclo – Plano de Ação da UE para a economia circular*.

Comissão Europeia. (2019). *Pacto Ecológico Europeu - Pacto Ecológico Europeu: Desenvolver uma economia azul sustentável na União Europeia*.

Comissão Europeia. (2020). *Um Novo Plano De Ação Para A Economia Circular - Para Uma Europa Mais Limpa e Competitiva*.

Comissão Europeia. (2022). *PO Mar 2030 - Pograma Operacional do Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos, das Pescas e Aquicultura - Programa para Portugal - MAR2030.*

DGRM. (2021). *Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos - Estatísticas da Pesca 2021.*

DGRM. (2022). *Direção Geral de Recursos Naturais - Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2021-2030*.

Diário da República. (2017). *Decreto-Lei no190-A/2017. a da República, 1.ª série — N.º 236 — 11 de dezembro de 2017*.

Eikeset, A. M., Mazzarella, A. B., Davíðsdóttir, B., Klinger, D. H., Levin, S. A., Rovenskaya, E., & Stenseth, N. Chr. (2017). What is blue growth? The semantics of "Sustainable Development" of marine environments. *Marine Policy*, *87*, 177–179. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.019

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy - Economic and business rationale for an accelerated transition*.

Fonseca, P., Pedroso, M., Tavares, V., Aguiar Costa, A., Santos, L., & Laranjeira, L. (2022). *Plano de Ação para a Circularidade na Construção (PACCO)*.

Gunter, P. (2011). The Blue Economy "100 innovations inspired by nature that can generate 100 million jobs over a decade and redefine the model of competitiveness by stimulating entrepreneurs to change the business model". *COVER STORY • NGOs – Key Players in Fighting Global Environmental Challenges*. https://www.jef.or.jp/journal/pdf/175th_cover04.pdf

Gura, K. S., Nica, E., Kliestik, T., & Puime-Guillén, F. (2023). Circular economy in territorial planning strategy: Incorporation in cluster activities and economic zones. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103357. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103357

Instituto Nacional de Estatística - Censos 2021, Resultados Preliminares (2021).

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, *143*, 37–46. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041

Magalhães, F. C., Bellei, P., Flores-Colen, I., & da Costa, E. M. (2024). Blue Circular Economy—Reuse and Valorization of Bivalve Shells: The Case of Algarve, Portugal. *Recycling*, *9*(2), 27. https://doi.org/10.3390/recycling9020027

República Portuguesa. (2019). *Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT) - primeira revisão* (Lei nº 99/2019 de 5 de setembro).

Silva, H. A., & Batista, I. (2008). *Produção, salubridade e comercialização de moluscos bivalves em Portugal* (IPIMAR, Vol. 1).

Styles, D., Schonberger, H., & Martos, J. L. G. (2013). *Best environmental management practice in the tourism sector : learning from frontrunners*. https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2788/33972

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE BIOCONCRETO DE BAMBU EM NOVOS BIOCONCRETOS: AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

Lucas Araujo Felicio dos Santos[a]; M'hamed Yassin Rajiv da Gloria[b]; Carina Mariane Stolz[a]; Mayara Amario[a]; Romildo Dias Toledo Filho[b]

[a]Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos s/n, CT, 21941-909, Rio de Janeiro, Brasil, lfelicio@hotmail.com.br; carinastolz@poli.ufrj.br; mayara_amario@poli.ufrj.br

[b]COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos s/n, CT, 21941-909, Rio de Janeiro, Brasil, yassin@numats.coc.ufrj.br; toledo@coc.ufrj.br

RESUMO

A adoção do bioconcreto de bambu na construção emerge como uma alternativa eficaz na redução dos impactos ambientais inerentes à produção do concreto convencional, primariamente pela redução da extração de agregados minerais. Não obstante, essa solução não está isenta de efeitos adversos ao meio ambiente, especialmente quando se considera o descarte do material como entulho ao final de sua vida útil. O objetivo deste estudo centrou-se na avaliação experimental das propriedades físicas e mecânicas do bioconcreto produzido com agregados provenientes da reciclagem de bioconcreto de bambu. O resíduo de bioconcreto passou por etapas de beneficiamento, visando obter agregados reciclados com características adequadas ao uso em novos bioconcretos. Bioconcretos com distintas frações volumétricas de agregados reciclados (40%, 45%, 50% e 60%) foram caracterizados em termos de índice de consistência, massa específica, bem como resistência à compressão aos 8 e 28 dias de cura e à tração na flexão aos 28 dias. Os bioconcretos exibiram adequada trabalhabilidade e resistência mecânica que possibilitam seu uso de maneira análoga aos bioconcretos não reciclados. Este estudo representa um passo significativo na direção da viabilidade ambiental e técnica do bioconcreto com agregados reciclados de bioconcretos de bambu, contribuindo para o avanço da sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Bioconcreto, agregado reciclado de bioconcreto de bambu, bambu, reciclagem, propriedade mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

A cadeia de produção do concreto opera de maneira não sustentável. O alto consumo de energia, a extração de matérias-primas e o uso de água estão entre os principais fatores impactantes na indústria da construção. Assim, a demanda por alternativas que conciliem a redução desses impactos com as exigências técnicas da construção civil é cada vez mais urgente (Bezerra *et al.*, 2023). Uma alternativa é a adoção de bioconcretos, nos quais os bioagregados substituem total ou parcialmente os agregados minerais usuais. Esses materiais trazem diversas vantagens ambientais: os bioagregados são geralmente resíduos disponíveis localmente, reduzindo o consumo de energia na produção em comparação com os agregados convencionais, como por exemplo, o bambu, a casca de arroz e o cânhamo. Além disso, podem oferecer melhorias no desempenho térmico e energético das construções, levando a uma economia de energia durante sua vida útil (Amziane *et al.*, 2017).

O bioconcreto de bambu, que é o foco dessa pesquisa, ganha destaque por conta da grande utilização do bambu como material construtivo. A utilização desse material aparece como uma solução construtiva versátil e já existem construções em todas as escalas utilizando esse material. Os resíduos resultantes da laminação do bambu têm o potencial de serem reintegrados à construção civil como bioagregados, ou seja, agregados de origem vegetal. Essa abordagem oferece várias vantagens. Pesquisas indicam que a inclusão de biomassa na matriz cimentícia pode conferir leveza, melhorar as propriedades acústicas (Amziane *et al.*, 2017). Além disso, o material resultante demonstra durabilidade e resistência a fatores ambientais, como umidade e variações de temperatura (Gutiérrez-Lopez, 2019).

Contudo, embora tenha diversas vantagens do ponto de vista da sustentabilidade, os bioconcretos ainda podem apresentar um impacto atrelado, sobretudo no fim de sua vida útil. Nesse sentido, diversas alternativas para o consumo exacerbado de materiais estão associadas à economia circular, com o intuito de estender sua vida útil e evitar desperdícios. Dessa forma, os materiais podem ser reintegrados na cadeia produtiva por meio da reciclagem, o que adiciona valor e reduz a exploração de recursos naturais, contribuindo para a sustentabilidade (Parlamento Europeu, 2023).

Considerando a predominância do concreto como o material mais utilizado globalmente (Agopyan, 2014), torna-se crucial a pesquisa de alternativas sustentáveis para sua aplicação. O resíduo proveniente do concreto é gerado em larga escala ao término do ciclo de construção, sendo frequentemente considerado como o fim da vida útil dos materiais. No entanto, há um grande potencial para a reciclagem dos resíduos da construção e demolição, especialmente na forma de agregados, uma vez que uma parcela significativa desses materiais é composta por concreto e argamassa (Shi *et al.*, 2016). A adoção da reciclagem de resíduos traz diversas vantagens, incluindo a preservação de áreas ambientais, prolongamento da vida útil de aterros, redução da poluição e do consumo de energia, além da geração de empregos (Ulubeyli; Kazaz; Arslan, 2017).

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar mecanicamente bioconcretos contendo agregados reciclados de bioconcretos de bambu.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão detalhados os métodos experimentais empregados para produzir e caracterizar os agregados reciclados de bioconcreto de bambu, bem como para caracterizar o bioconcreto contendo esses agregados reciclados. As misturas foram realizadas fixando quatro volumes de agregados reciclados de bioconcreto de bambu (Vb), sendo eles 40%, 45%, 50% e 60%. As quatro misturas foram denominadas de BCRB40, BCRB45, BCRB50 e BCRB60, em que BCRB representa

bioconcreto com agregados reciclados de bioconcreto de bambu, e os dois dígitos representam a fração volumétrica de agregados reciclados. As etapas de caracterização do BCRB estão detalhadas na Figura 1. Vale ressaltar que o BCRB60 foi carcterizado apenas em termos densidade e espalhamento, com intuito de determinar as caracteristicas do material para elevado volume de bioagregado.

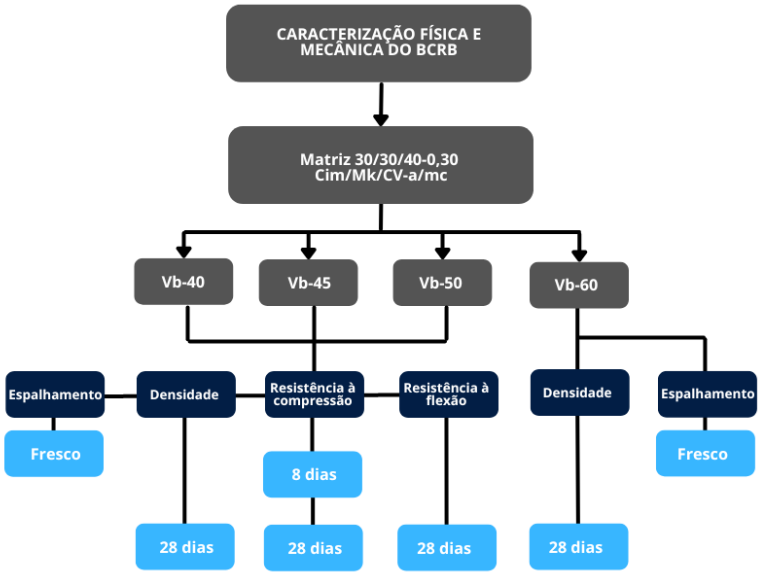


Figura 1 – Fluxograma do programa experimental.

2.1 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

2.1.1 Procedência do resíduo de bioconcreto

Neste estudo, o resíduo de bioconcreto foi obtido no laboratório NUMATS da POLI/COPPE/UFRJ, como parte de uma pesquisa de tese de doutorado focada na durabilidade ao intemperismo natural de bioconcretos de bambu (Andreola, 2021). Os corpos de prova reciclados continham bioagregados de três espécies de bambu diferentes: *Dendrocalamus Asper*, *Phyllostachys aurea* e *Phyllostachys pubescens*.Os bioagregados utilizados no estudo da Andreola eram passantes pela peneira de 4,75 mm. A matriz cimentícia do material era composta por cimento Portland CPV-ARI, metacaulinita e cinza volante, com corpos de prova contendo teores de 30%, 40% e 50% de bioagregados de bambu.Os corpos de prova já possuíam pelo menos 4 anos de idade durante o período de realização da pesquisa atual. Esses bioconcretos apresentavam resistência à compresssão variando entre 8 e 14 MPa após 28 dias.

2.1.2 Britagem

Para obter os agregados reciclados, utilizou-se o britador de mandíbulas Queixada 200, fabricado pela Vegedry. O britador tritura o material e separa o resíduo em duas frações, uma miúda e outra graúda, ambas com dimensões não padronizadas. Para este estudo, utilizou-se a fração miúda do material triturado (Figura 2).

Após a introdução dos corpos de prova no britador (diâmetro 75 mm - altura 150 mm), observou-se que uma única britagem não foi suficiente para obter uma quantidade significativa de agregados reciclados com a granulometria desejada. Portanto, os materiais graúdos foram submetidos a um processo de rebritagem, repetindo-se este procedimento por cinco vezes até alcançar a quantidade necessária da fração fina a ser utilizada no trabalho.

(a) (b)

Figura 2 – Parcela graúda residual (a) e parcela miúda do material britado (b)

2.1.3 Peneiramento

Após a trituração, o material miúdo foi submetido a um processo de peneiramento preliminar pela peneira com abertura de #4,75 mm. Para evitar uma alta proporção de finos, a fração que passou pela peneira com abertura de #1,18 mm não foi utilizada. Essa medida visa reduzir a absorção de água dos agregados durante a produção do bioconcreto, conforme demonstrado anteriormente por Da Gloria (2015). Utilizou-se um peneirador mecânico da marca Manupen com as duas peneiras necessárias para obter as três granulometrias desejadas. Da massa total peneirada (27,25 kg), 13,80 kg passaram pela malha de 1,18 mm (51%), 13,25 kg ficaram retidos na malha de 1,18 mm (49%), e apenas 0,20 kg ficaram retidos na malha de 4,75 mm (0,01%). Vale ressaltar que embora a dimensão da malha maior seja 4,75 mm, as partículas não são esféricas e têm uma dimensão superior à outra. Isso faz com que o lado menor das partículas passe na peneira. Dessa forma, as partículas em questão têm dimensões maiores que a malha de 4,75 mm e, portanto se considera o produto final como um concreto e não uma argamassa.

2.1.4 Homogeneização dos agregados reciclados

Após a seleção, o material de granulometria intermediária passou por um processo de homogeneização utilizando o método da pilha alongada. O método consiste em espalhar o material linearmente, movendo-o em direções opostas alternadamente, até que toda a amostra esteja disposta na pilha. Depois de distribuir completamente o material, a porção que estava na ponta é separada e reincorporada à pilha.

2.1.5 Caracterização do agregado reciclado

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo a NBR 17054 (ABNT, 2022). A distribuição granulométrica pode ser observada na Figura 3.

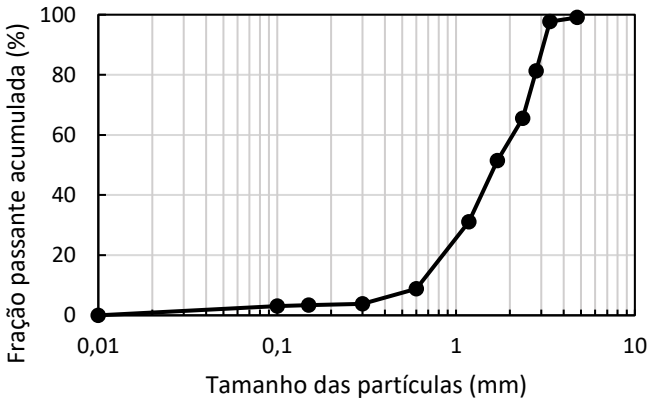


Figura 3 – Curva granulométrica acumulada das partículas de bambu recicladas.

A determinação da massa específica dos agregados reciclados seguiu o procedimento descrito na NBR 16916 (ABNT, 2021) e os resultados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 –

Quadro 1 – Massa específica dos agregados reciclados

Propriedade	Resultado
Massa específica aparente (g/cm³)	0,988
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)	1,372
Massa específica (g/cm³)	1,605

A determinação de absorçaõ de água dos bioagregados reciclados foi feita de acordo com os procedimentos adotados por Da Glória (2020). Para isso, 100 gramas do agregado reciclado foram misturados com 500 gramas de água durante 6 minutos em uma argamassadeira de 5 litros. Assim, o material foi escoado por 5 minutos em uma peneira de abertura #150 µm e pesado. Obteve-se a o resultado de 52% de absorção usando a equação de acordo com o método de Da Glória 2020:

$$A_{comp} = \frac{m_s - m}{m} \times 100$$

Onde:

$A_{comp} =$ água de compensação do bioagregado (%);

$m_s =$ massa de bambu úmida (g) (misturado em água por 6 minutos);

$m =$ massa de bambu seca (g)

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Para elaborar o material em análise, a base cimentícia foi formada por três componentes diferentes: o Cimento Portland CP II F-40 da empresa Holcim, a metacaulinita fornecida pela Metacaulim e a cinza

volante, proveniente da Pozo Fly. A composição química e as densidades desses materiais estão detalhadas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Quadro 2.

Quadro 2 – Composição química e densidade dos materiais cimentícios

Elementos químicos	Cimento	Metacaulinita	Cinza volante
CaO (%)	76,858	0,133	2,29
SiO_2 (%)	12,584	57,615	50,963
Al_2O_3 (%)	-	34,673	34,194
Fe_2O_3 (%)	5,371	3,065	5,333
SO_3 (%)	3,900	1,433	1,593
K_2O (%)	0,517	0,476	3,521
SrO (%)	0,375	0,006	0,024
TiO_2 (%)	0,310	2,014	1,240
MnO (%)	0,084	-	0,046
BaO (%)	-	0,443	0,594
ZrO_2 (%)	-	0,107	0,111
CuO (%)	-	0,015	-
ZnO (%)	-	0,016	0,045
Rb_2O (%)	-	0,005	0,028
Y_2O_3 (%)	-	-	0,012
NbO (%)	-	-	0,006
Densidade (g/cm³)	3,05	2,73	1,92

2.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE BIOCONCRETO DE BAMBU

2.3.1 Dosagem

Para a produção do BCRB a ser investigado neste estudo, foi empregado o método de dosagem desenvolvido por Da Gloria et al. (2020). No procedimento, a água total consistia da água de hidratação (A_{hid}), calculada com base na relação água/materiais cimentícios, e a água de compensação (A_{comp}) cujo valor é o mesmo do que a água de absorção dos bioagregados.determinada.

A matriz utilizada foi composta por 30% de cimento, 30% de metacaulinita e 40% de cinza volante, em massa. Além disso, foram empregadas quatro frações volumétricas de agregado reciclado (40%, 45%, 50% e 60% do volume do bioconcreto). Essas frações volumétricas foram adotadas por se aproximarem aos traços usados no mercado. As quantidades de cada material utilizadas para a produção de 1 m³ de cada mistura estão detalhadas no

Quadro 3. A mistura com 60% de biomassa foi produzida com o objetivo de analisar o limite da trabalhabilidade em altos teores de agregados reciclados. Ademais, a densidade do agregado reciclado foi reduzida para 700 kg/m³ devido à observação da separação e deposição do material mais fino, composto principalmente pela pasta de cimento, no fundo dos recipientes durante a manipulação dos agregados reciclados.

Quadro 3 – Composição das misturas de BCRB (kg/m³).

	Bioagregado	**Cimento**	**Metacaulinita**	**Cinza volante**	**Água total**
BCRB40	280,00	234,76	234,76	313,02	419,49
BCRB45	315,00	215,20	215,20	286,93	414,87
BCRB50	350,00	195,64	195,64	260,85	410,24
BCRB60	420,00	156,51	156,51	208,68	400,99

2.3.2 Produção

Os BCRBs foram preparados para caracterização física e mecânica com quatro frações volumétricas diferentes (40%, 45%, 50% e 60%) e uma relação água/materiais cimentícios (a/mc) fixa de 0,35. As misturas foram feitas em uma argamassadeira de movimento planetário com capacidade de 20 litros, seguindo os procedimentos descritos por Andreola (2017) e Da Gloria et al. (2020).

Foram fabricados um total de 45 corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, distribuídos em 5 amostras para cada teor de agregado reciclado (40%, 45%, 50% e 60%) e para cada período de cura (8 dias e 28 dias), com exceção do CP60, que foi avaliado apenas em termos de densidade. Além disso, foram produzidos 15 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 50 mm x 50 mm x 230 mm, sendo 5 amostras para cada uma das frações de 40%, 45% e 50%. Esses corpos de prova foram designados para o ensaio de flexão de 3 pontos, que será realizado após 28 dias de cura. Após o processo de desmoldagem, as amostras foram submetidas à cura seca.

2.3.3 Espalhamento e consistência do bioconcreto fresco

Os ensaios de espalhamento (*flow tablet test*) foram executados para cada mistura segundo as diretrizes da NBR 13276 (2016), logo após a mistura da argamassa.

2.3.4 Densidade

As densidades de cada mistura foram obtidas após a cura do material por 28 dias. Para este propósito, foram utilizados 4 corpos de prova para cada mistura de compressão uniaxial cujas medidas exatas foram obtidas através de um paquímetro com precisão de 0,1 mm. Com os volumes definidos, os corpos foram pesados em uma balança com precisão de 0,1 g e os valores de densidade calculados através da média dos quatro resultados (um por corpo-de-prova).

2.3.5 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram conduzidos na Máquina de Ensaio Universal do modelo MTS-Bionix 25 kN, com uma taxa de velocidade de 0,3 mm/min. Nesse ensaio, os parâmetros avaliados foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, conforme as normas NBR 5739

(2018) e NBR 8522 (2017), respectivamente. Para a medição da deformação axial, foram empregados dois LVDTs acoplados a um aparato posicionado no centro dos corpos de prova.

2.3.6 Resistência à tração por flexão

As misturas foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos de acordo com as recomendações e dimensões do Model Code (FIB, 2012). Para isso, foram moldados corpos prismáticos com seção transversal de 50 mm x 50 mm e comprimento de 230 mm. A máquina utilizada foi um modelo Shimadzu-100kN, com uma velocidade de 0,1 mm/min. Além disso, um LVDT foi instalado na parte inferior do centro do corpo de prova para medir a variação da flecha, conforme mostrado na. Os corpos de prova foram posicionados sobre dois apoios com um vão de 170 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos das análises de espalhamento e densidade, além dos resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão uniaxial e de resistência à tração por flexão.

3.1 ESPALHAMENTO

Os espalhamentos e seus respectivos valores obtidos através do ensaio de espalhamento estão demonstrados na Figura 4.

(a) (b) (c) (d)

Figura 4 – Espalhamentos das 4 misturas: (a) 40%; (b) 45%; (c) 50% e (d) 60%

Os resultados dos ensaios de espalhamento foram de 282,5 mm; 272,5 mm; 260,0 mm e 270,0 mm para as misturas de 40%, 45%, 50% e 60%, respectivamente. Tais valores foram considerados satisfatórios, uma vez que a mistura com menor espalhamento alcançou um diâmetro médio de 260 mm. Além disso, não foram observadas segregação ou exudação . Os valores de espalhamento mostraram-se inversamente proporcionais ao volume de agregados reciclados, com exceção da mistura com 60%, cujo espalhamento se aproximou da mistura de 45%, provavelmente devido à maior quantidade de água presente na mistura.

3.2 DENSIDADE DO BIOCONCRETO ENDURECIDO

Os resultados médios do ensaio de densidade são apresentados na Figura 5.

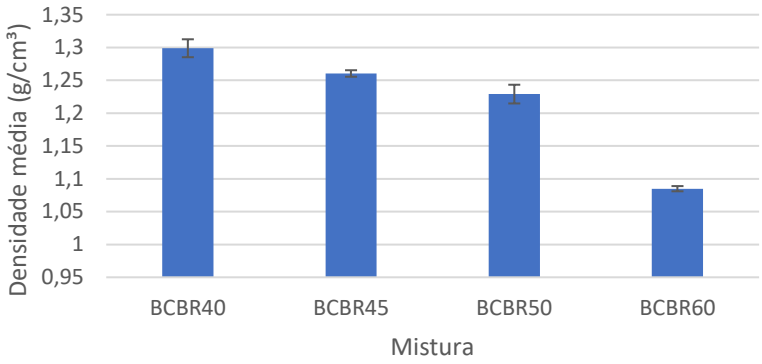


Figura 5 – Resultados de densidade média por volume de agregado reciclado e respectivas barras de erro

Com base nos resultados apresentados, observa-se uma relação linear entre o teor de agregados reciclados e a densidade para as misturas BCRB40, BCRB45 e BCRB50. Tal comportamento era esperado por conta da baixa densidade do bambu. No entanto, a mistura BCRB60 exibiu uma densidade inferior em comparação com essa tendência linear.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

As Figura 6a e 5b apresentam as curvas tensão - deformação dos corpos de prova com 8 e 28 dias para as misturas BCRB40, BCRB45 e BCRB50. Os valores de resistência e de módulo de elasticidade estão listados no Quadro 4.

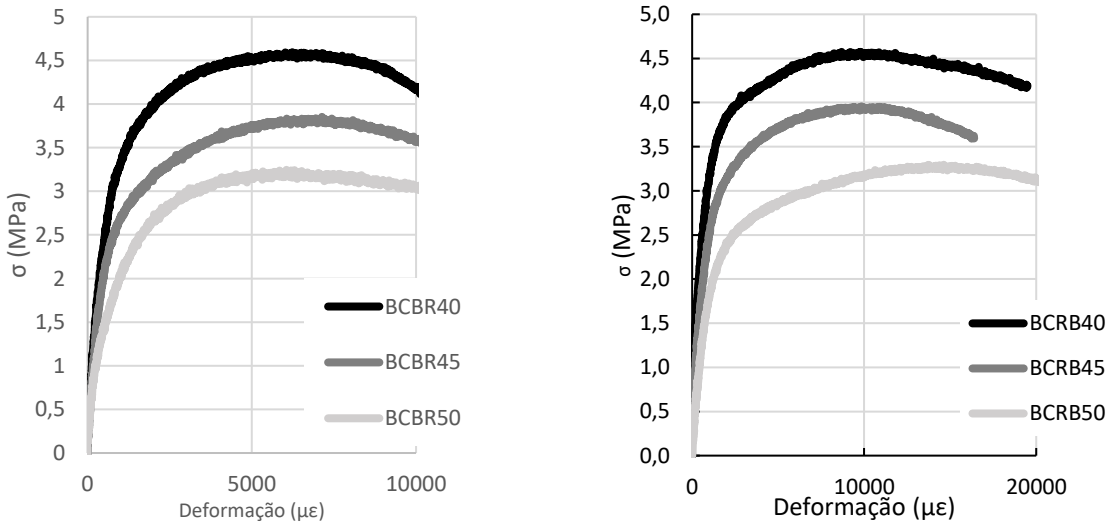


Figura 6 – Curvas típicas de tensão x deformação para o ensaio de compressão com 8 dias de cura (a) e 28 dias de cura (b)

Quadro 4 - Resultados de resistência máxima à compressão e módulo de elasticidade como respectivos coeficientes de variação em porcentagem entre parênteses.

BCRB	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)

Vb-40/8 dias	4,82 (5,71)	3,38 (5,88)
Vb-40/28 dias	4,67 (2,66)	3,27 (11,65)
Vb-45/8 dias	4,11 (5,50)	2,83 (5,39)
Vb-45/28 dias	4,05 (6,55)	2,32 (5,19)
Vb-50/8 dias	3,36 (5,56)	1,80 (3,85)
Vb-50/28 dias	3,75 (4,63)	2,47 (9,54)

Conforme esperado, as misturas com menor teor de agregado reciclado demonstraram maior resistência e módulo de elasticidade. Além disso, o ensaio revelou uma relação inversamente proporcional entre o volume de agregado reciclado e a resistência.

3.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A Figura 7 exibe o gráfico que relaciona a tensão de flexão com a flecha dos BCRB.

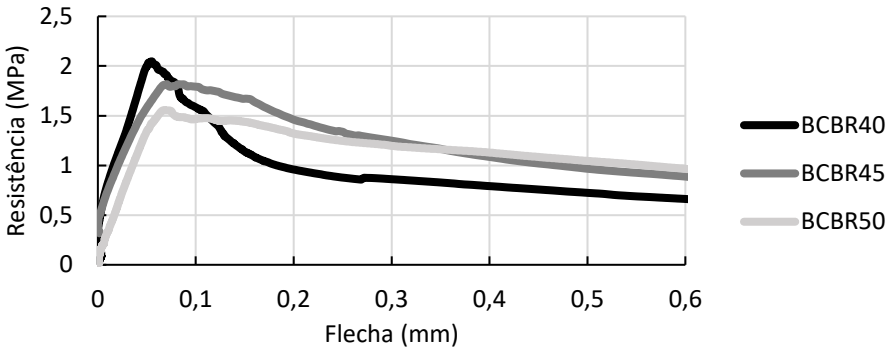


Figura 7 – Curva de tensão por flexão x flecha

Com base nos resultados observados, fica evidente que o teor de agregados reciclados é inversamente proporcional à resistência, conforme esperado, uma vez que a resistência é predominantemente influenciada pela matriz cimentícia. Contudo, na parte pós-pico, observou-se uma redução gradual de tensão com o aumento do teor de agregados reciclados.

Os valores de resistência à tração por flexão (Tmax) e de resistência à tração (fct) e seus respectivos coeficientes de variação são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e seus respectivos coeficientes de variação em porcentagens entre parênteses

	T_{max} (MPa)	f_{ct} (MPa)
BCRB40	2,17 (8,6)	0,94 (8,5)
BCRB45	1,90 (5,3)	0,83 (6,41)
BCRB50	1,28 (9,5)	0,55 (9,7)

4 CONCLUSÕES

O espalhamento do BCRB, mesmo com maiores volumes de agregados reciclados, mostrou-se satisfatória, provavelmente devido à adição adicional de água na mistura. Isso permitiu atingir uma

textura adequada para o adensamento por vibração, dispensando a necessidade de compactação manual.

Embora os resultados de resistência à compressão tenham sido inferiores aos dos bioconcretos não reciclados, ainda foram aceitáveis para aplicações como elementos autoportantes, superando as resistências encontradas em materiais como blocos cerâmicos. Além disso, observou-se um incremento na ductilidade do material conforme aumentava-se o teor de agregados reciclados, evidenciado nos ensaios de compressão e flexão, nos quais misturas com maiores volumes desses agregados apresentaram rupturas menos frágeis.

Sob a ótica da economia circular, a reciclagem do bioconcreto de bambu mostra-se viável tecnicamente, com o BCRB representando um terceiro estágio de vida para os materiais residuais originais.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 13276 - Argamassa armada - Execução de revestimento de paredes e tetos de alvenaria com utilização de argamassa armada - Procedimento. [S.l.]: [s.n.], 2016.

ABNT. NBR 8522 - Concreto - Determinação do Módulo de Elasticidade Estático. [S.l.]: [s.n.], 2017.

ABNT. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. [S.l.]: [s.n.], 2018.

ABNT. NBR 16916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. [S.l.]: [s.n.], 2021.

ABNT. NBR 17054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de Ensaio. [S.l.]: [s.n.], 2022.

AGOPYAN, V. Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta. Globo Ciência, 2014. Disponivel em: http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html. Acesso em: 23 Abril 2023.

AMZIANE, S. *et al.* "Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity". [S.l.]: [s.n.], 2017.

ANDREOLA, V. M. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E AMBIENTAL BIO-CONCRETOS DE BAMBU. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

ANDREOLA, V. M. DURABILIDADE AO INTEMPERISMO NATURAL E AO ATAQUE. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

BEZERRA, C. G. *et al.* Caracterização reológica de pastas ternárias para o desenvolvimento de bioconcretos leves de casca de arroz. Revista Matéria, v.28, 2023.

DA GLORIA, M. Y. R. *et al.* Jornal of Building Engineering, 2020.

FIB. Model Code for Concrete Structures. [S.l.]: [s.n.], 2012.

GLORIA, M. Y. R. D. DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE CONCRETO COM NÚCLEO LEVE E FACES EM LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

GUTIÉRREZ-LOPEZ, E. "Mechanical properties and durability of bamboo-reinforced concrete: A review. Construction and Building Materials, 213, 2019.

PARLAMENTO EUROPEU. Economia circular: definição, importância e benefícios. Parlamento Europeu, 2023. Disponivel em: https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios#:~:text=Desta%20forma%2C%20o%20ciclo%20de,que%20poss%C3%ADvel%20gra%C3%A7as%20%C3%A0%20reciclagem. Acesso em: 15 Julho 2023.

SHI, C. *et al.* "Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review". Journal of Cleaner Production, 112, 2016.

ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A.; ARSLAN, V. “Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues”. Procedia Engineering, 172, 2017.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DO TEOR DE BIOMASSA E DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE BIOCONCRETOS DE BAMBU

Ana Clara Fernandes Zanon de Moraes[a]; Amanda Lorena Dantas de Aguiar[a]; Nathalia Andrade da Silva[a]; Mayara Amario[b]; Romildo Dias Toledo Filho[a]

[a] COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos s/n, CT, 21941-909, Rio de Janeiro, Brasil, anaclara.zanon@poli.ufrj.br; amanda.aguiar@numats.coc.ufrj.br; nathalia.silva@coc.ufrj.br; toledo@coc.ufrj.br

[b] Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos s/n, CT, 21941-909, Rio de Janeiro, Brasil, mayara_amario@poli.ufrj.br

RESUMO

Na busca por conter danos ambientais ocasionados pela indústria da construção civil, houve um aumento nos estudos acerca do uso de partículas vegetais e de materiais cimetícios suplementares no desenvolvimento de materiais de construção. Bioconcretos, com o uso de bambu como agregado miúdo na sua composição, apresentam bom desempenho térmico, mecânico e físico, além de ter um alto potencial de armazenamento de carbono. A depender do teor de biomassa, este material pode ser utilizado para fins estruturais, mas o seu comportamento mecânico quando submetido à temperaturas elevadas é pouco conhecido. Portanto, o objetivo do presente trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de bioconcretos de bambu quando submetidos à ensaios de tração na flexão em três pontos, sob temperatura ambiente e expostos à temperatura de 250 °C. Os bioconcretos foram produzidos com teores de biomassa de 25, 35 e 45%, identificados como BCB25, BCB35 e BCB45, respectivamente, e uma matriz cimentícia composta por cinza volante, metacaulinita e cimento Portland. Os ensaios de tração na flexão foram realizados em corpos de prova de bioconcreto de bambu aos 28 dias de idade. Os resultados de resistência à tração na flexão indicaram uma redução na resistência conforme o aumento do volume de biomassa, variando entre 4,33 MPa e 3,98 MPa à temperatura ambiente. Quando submetidos à temperatura de 250 °C, os BCB25, BCB35 e BCB45 apresentam uma redução na resistência à tração por flexão de 20,7%, 23,5% e 27,6%, respectivamente. Conclui-se que o teor de biomassa e a temperatura afetam diretamente a resistência à tração na flexão mas que o material não perde estabilidade térmica quando submetido à temperatura de 250 °C.

Palavras-chave: Bioconcreto de bambu, Tração na flexão, Biomassa, Temperatura

1 INTRODUÇÃO

No cenário global, o tema da sustentabilidade tem ganhado visibilidade e atenção de agências governamentais e da comunidade científica pelo mundo. A fim de promover a paz e prosperidade, a Organização das Nações Unidades criou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e dentre eles o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis e combate às alterações climáticas. Nesse contexto, o setor da construção civil contribui significativamente para as emissões de CO_2, sendo a produção de cimento responsável por 8% das emissões globais (Lehne e Preston, 2018).

Ainda nos impactos gerados pela indústria da construção civil, a extração de agregados naturais causam danos ao meio ambiente devido às emissões atmosféricas, remoção da camada vegetal e detonações de rochas (Faleschini *et al*., 2016), além da modificação da paisagem local, alteração na calha dos cursos d'água, instabilidade de margens e taludes, turbidez da água e lançamento de efluentes (Vedroni e Carvalho, 2008; Valverde, 2020). Para conter esses danos, pesquisas estão sendo convergidas para a utilização de partículas vegetais como agregados dentro de uma matriz cimentícia para a produção de bioconcretos. Esses materiais possuem bom desempenho térmico, mecânico e físico (Da Gloria *et al*., 2020; Andreola, 2017; Aguiar, 2020).

Além da substituição total dos agregados naturais pelos bio-agregados de origem vegetal, a fim de promover um concreto ainda mais sustentável, estudos propoem a substituição parcial do cimento pelas pozolanas, materiais que reagem com o produto de hidratação do cimento e cujo processo de produção é menos poluente ao meio ambiente (Agopyan e Jhon, 2011). Segundo Da Silva e Isaia (2022), a viabilidade do uso de cinza volante em concreto estrutural se da pelo aumento da resistência à compressão e diminuição das emissões de Gases de Efeito Estufa.

Sob tal prospectiva, o bambu é um material vegetal com grande disponibilidade no território brasileiro e, por suas características mecânicas e seu potencial de sequestro de CO_2, torna-se viável sua utilização no setor da construção civil (Gomes *et al*., 2022a). Aliado ao fato de que, no processo de beneficiamento dos colmos de bambu, cerca de 40% de toda a biomassa vegetal são resíduos que não possuem utilização (Kravchencko *et al*., 2015), esse material pode ser usado como bio-agregado e incorporado na matriz de um bioconcreto.

Por se tratar de um material lignocelulósico, o bambu apresenta uma resistência à temperatura inferior à da matriz de cimento e sua degradação térmica pode afetar as propriedades de um compósito produzido com este material utilizado como bio-agregado. Aguiar (2020) utilizou resíduos de madeira em uma matriz cimentícia em diferentes proporções e observou a redução da condutividade térmica, densidade e resistência à compressão com o aumento do teor da biomassa e da temperatura a que foram expostos os bioconcretos. Gomes *et al*. (2022b) analisaram o comportamento mecânico e a reação ao fogo de um bioconcreto de bambu através do estudo da resistência à compressão uniaxial e observou uma redução da resistência com o aumento da fração volumétrica de resíduos de bambu e que as partículas de bambu não interferiram na taxa de liberação de calor, calor total liberado e calor efetivo de combustão nas proporções estudadas.

O comportamento mecânico de bioconcretos de bambu sob altas temperaturas é um tópico desconhecido na literatura e necessário para melhor caracterização e possível aplicação deste material na indústria da construção. Assim, este artigo tem como objetivo avaliar o comportamento à tração na flexão de bioconcretos de bambu produzidos com 25%, 35% e 45% de bio-agregados de bambu sob temperatura ambiente e submetido a 250 °C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 BIO-AGREGADOS DE BAMBU

Os bio-agregados utilizados na pesquisa foram obtidos por meio de resíduos de bambu provenientes do estado do Rio de Janeiro das seguintes espécies: *Dendrocalamus asper*, *Bambusa Chungii*, *Phyllostachys pubescens*, *Guadua Chacoensi*s e *Phyllostachys aurea*. Para serem empregados como bio-agregados, esses resíduos foram processados em diferentes equipamentos.

Inicialmente, o bambu passou pela primeira trituração em um moinho industrial com dois eixos, produzindo agregados graúdos. Seguiram para um moinho de facas por duas vezes a fim de processar o agregado graúdo e transformá-lo em agregado miúdo, como observado na Figura 1a. Em seguida, ele passou por um peneirador mecânico de malha 4,00 mm e o material retido foi triturado novamente. Ao final do processamento, obteve-se um bio-agregado miúdo, sendo 15% da sua massa total composta por agregado fino (Figura 1b) passante na peneira de 1,18 mm.

Figura 1 - a) Resultado da trituração do bambu e b) Bio-agregado fino

Após seu processamento, os bio-agregados passaram pelo processo de homogeneização pelo método de pilha alongada e em seguida foram submetidos a um pré-tratamento térmico para a retirada dos extrativos hidrossolúveis. Os bio-agregados fizaram imersos em água quente à 80 °C por uma hora e em seguida foram secos ao ar, conforme o método utilizado por Pinto (2019). Os bio-agregados passaram por ensaios de caracterização e apresentaram valor de massa específica aparente de 590 kg/m³, 65% de absorção de água e 14,68% de teor de umidade.

2.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS E ADITVOS

Os materiais cimentícios utilizados para a produção dos bioconcretos foram o Cimento Portland CP V-ARI, cinza volante e metacaulinita. Os valores de massa específica dos materiais cimentícios obtidos foram de 3,09 g/cm³; 1,89 g/cm³ e 2,63 g/cm³, para o cimento, cinza volante e metacaulinita, respectivamente, utilizando o picnômetro à gás hélio da marca *Micromeritics* modelo AccuPyc 1340. O CP V-ARI apresenta uma granulometria mais fina e uma dosagem diferente do calcário e argila, fazendo com que atinja elevadas resistências com maior velocidade, importante para analisar corpos de prova com idades de cura pequena. Utilizou-se a cinza volante e a metacaulinita visto que melhoram na trabalhabilidade do bioconcreto e a diminuiem da exsudação (Azevedo, 2002). A curva de distribuição granulométrica, feito através do peneirador mecânico dos materiais comentícios encontra-se na Figura 2.

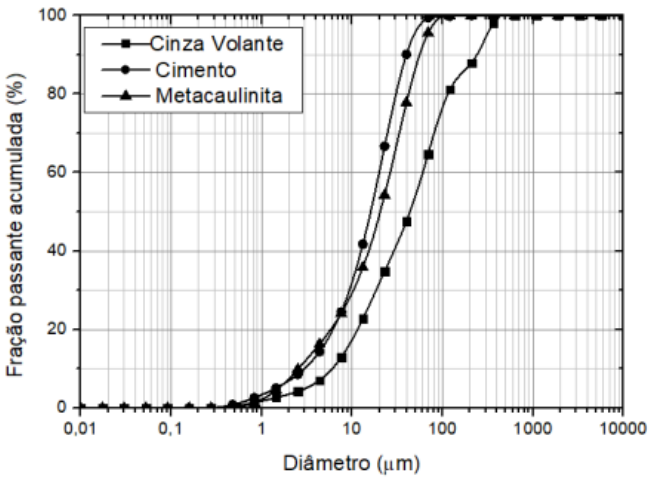


Figura 2 – Curvas granulométricas dos materiais cimentícios

Utilizou-se, ainda, aditivos químicos com o objetivo de melhorar a reologia, acelerar a pega e proporcionar maior trabalhabilidade. O superplasificante Glenium 51 por ter maior capacidade de redução de água e de proporcionar maior consistência e trabalhabilidade proporciona uma grande redução do consumo de água no estado fresco e no estado endurecido melhora a hidratação do cimento. O cloreto de cálcio ($CaCl_2$) é um aditivo com função de reduzir o tempo de início de pega e elevar a resistência do concreto (Mehta e Monteiro, 2014). Já o agente modificador de viscosidade (VMA), proporciona uma maior trabalhabilidade para a mistura.

2.3 PRODUÇÃO DO BIOCONCRETO

Para a produção dos bioconcretos, 100% dos agregados convencionais foram substituídos por bio-agregados de bambu e o volume da mistura foi dividido em biomassa e matriz cimentícia. Foram selecionadas três frações volumétricas distintas de bio-agregados de bambu: 25% (BCB25), 35% (BCB35) e 45% (BCB45), sendo estas substituições feitas em volume total da mistura. Destaca-se o uso de 15% de agregado fino do total da massa em cada mistura. A relação água/materiais cimentícios foi fixada em 0,35 para todas as misturas, de acordo com Gomes *et al.* (2022b). A matriz cimentícia é composta, em massa, por 40% de CPV-ARI, 30% de cinza volante e 30% de metacaulinita.

O teor do cloreto de cálcio foi fixado em 2%, o de VMA foi de 0,2% e o de superplastificante de 0,6% em relação à massa dos materiais cimentícios, como proposto por Gomes *et. al.* (2022b). A Tabela 1 detalha a dosagem das misturas de bioconcreto utilizadas. Devido à elevada taxa de absorção de água do bambu (65%) em condições de mistura, é importante garantir que a água adicionada à mistura seja suficiente para o amassamento, mas que não exceda a demanda do bio-agregado uma vez que essa elevada taxa influencia na trabalhabilidade e no endurecimento do cimento. A água adicional que supre essa necessidade é chama de água de compensação.

Tabela 1 – Consumo de materiais para produção de bioconcretos de bambu (kg/m³)

Bioconcreto	Cimento	Metacaulinita	Cinza Volante	Bambu	Água de compensação	Água de hidratação
BCB25	399,01	299,26	299,26	147,50	95,87	349,13
BCB35	345,81	259,36	259,36	206,50	134,22	302,58
BCB45	292,61	219,46	219,46	265,46	172,58	256,03

As misturas foram produzidas em uma argamassadeira com capacidade de 20 litros e seguiram as etapas da Figura 3.

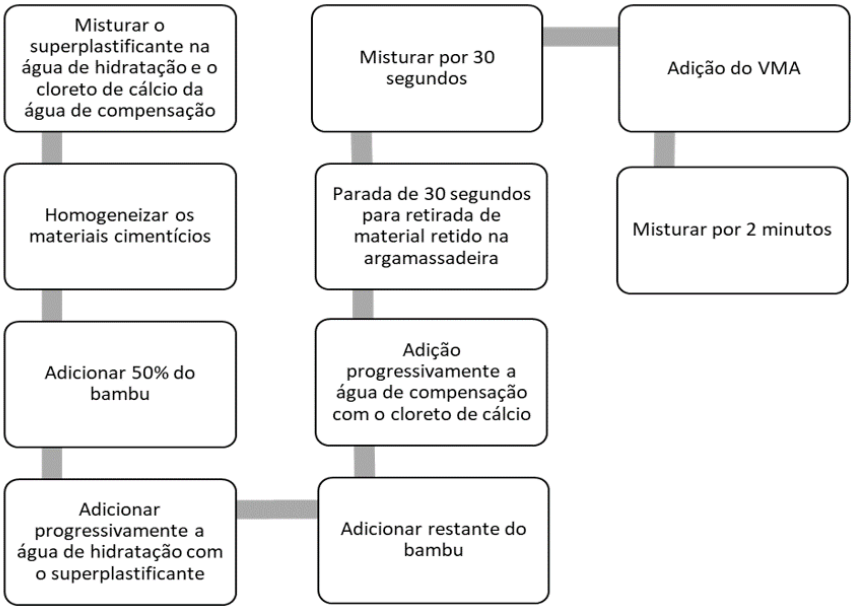


Figura 3 – Processo de produção do bioconcreto de bambu

Após o amassamento da mistura, foi feito o processo de moldagem dos corpos de prova. Os moldes foram previamente lubrificados com óleo mineral e o bioconcreto foi distribuído em 3 camadas e adensado em mesa vibratória (68 Hz) por 10 segundos em cada camada. Os moldes foram mantidos em uma sala com temperatura ambiente e protegidos da perda de umidade por 24 horas. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos em cura seca (T=22±2 °C e RH=55±5%) até atingirem a idade de ensaio de 28 dias.

2.4 ESTABILIDADE TÉRMICA DO BIOCONCRETO DE BAMBU

Para o estudo da influência da temperatura, os corpos de prova, após atingir idade de ensaio foram levadas ao forno tipo mufla à temperatura de estudo (250 °C) com o objetivo de estudar propriedades físicas e mecânicas residuais.

O aquecimento dos corpos de prova deu-se através do forno tipo mufla *Linn Elektro Therm* com capacidade de aquecimento até de 1300 °C. Com base no trabalho de Da Silva (2020), a taxa de aquecimento foi de 2 °C/min com isoterma de 1 hora quando foi atingida a temperatura de estudo.

No presente trabalho foram analisados corpos de prova a temperatura ambiente e submetidos a temperatura de 250 °C. De acordo com Aguiar (2020), a temperatura de 250 °C pode ser considerada crítica quanto à estabilidade térmica do bioconcreto de madeira, uma vez que a biomassa perde muita massa em decomposição térmica a partir desta temperatura. O resfriamento dos bioconcretos ocorreu de forma natural com a mufla fechada. Após o aquecimento das amostras, estas foram submetidas a ensaios de flexão em 3 pontos. Como forma de avaliar a influência da temperatura nas características mecânicas à flexão dos bioconcretos com diferentes frações volumétricas de bambu, foram ensaiados corpos de prova mantidos à temperatura ambiente como referência.

2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO SOB FLEXÃO EM 3 PONTOS

Para avaliar o comportamento do bioconcreto de bambu à tração sob flexão, o BCB foi submetido ao ensaio de flexão em três pontos, seguindo os procedimentos de Da Glória (2020). O ensaio de flexão foi realizado na máquina *Shimadzu AGX 100kN* em corpos de prova de dimensões 230 mm x 50 mm x 50 mm com o vão entre os dois apoios inferiores de 170 mm e a força concentrada foi aplicada no meio do vão. Para induzir a abertura de uma única fissura e ser possível controlar essa abertura, na face inferior e no meio do vão foi produzido um entalhe de largura 2,5 mm e profundidade de 8 mm com o auxílio de uma serra mecânica.

Na base do corpo de prova, na periferia do entalhe, foram coladas chapas metálicas de espessura média de 2 mm e a elas foi acoplado o clip-gage a fim de monitorar a abertura de fissura. Já na face superior da amostra também foi colada uma chapa metálica e posicionado um LVDT para a leitura da deflexão central do BCB durante o ensaio. A Figura 4 apresenta a instrumentação, *set up* e ensaio descrito em andamento.

Com base nas equações do Model Code 2010, têm-se a fórmula da resistência à tração por flexão, dada por:

$$f_{ctm,fl} = \frac{3Fl}{2bh^2} \tag{3.1}$$

Onde:

$f_{ctm,fl}$: resistência à tração por flexão (MP a);

F: carga máxima (N);

l: comprimento do vão (mm);

b: largura da viga (mm); e

h: alura entre o topo do entalhe e o topo da viga (mm).

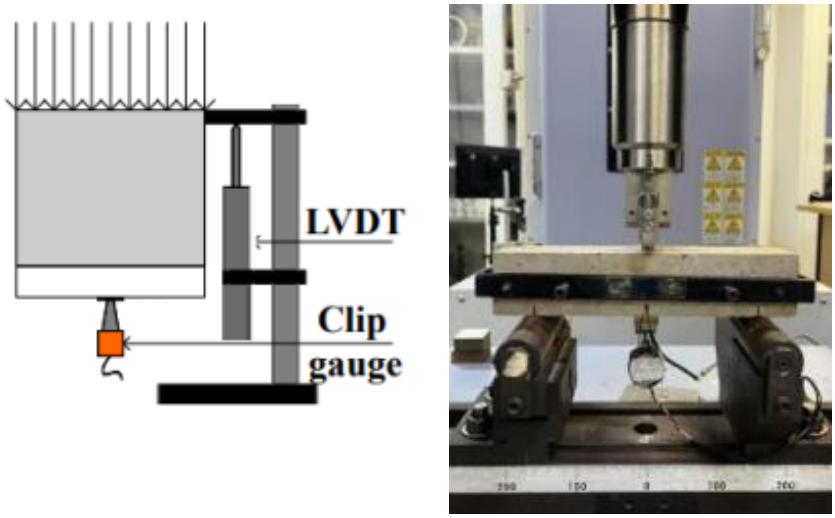


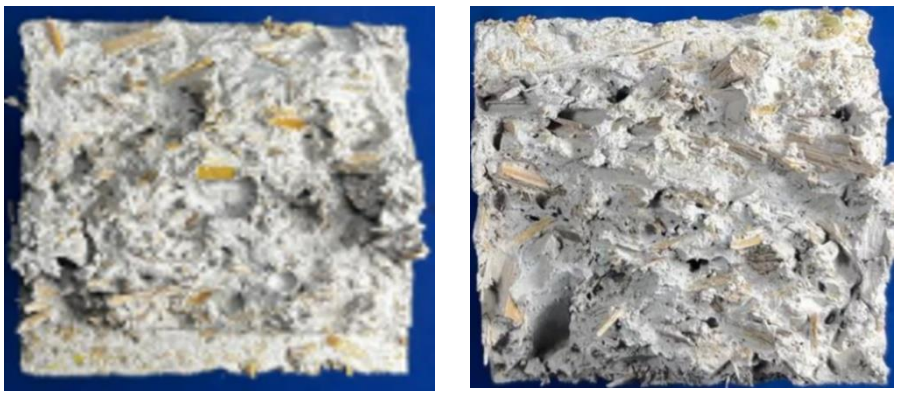
Figura 4 – a) Instrumentação. Adaptado de Da Glória (2020); b) Ensaio na Shimadzu AGX 100kN

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTABILIDADE TÉRMICA

O aumento do teor de biomassa dos bioconcretos é diretamente proporcional a massa total perdida da amostra uma vez que o bambu degrada-se mais rápido e a uma temperatura mais baixa do que a pasta cimentícia (Gomes *et al.*, 2022b). A MTP (massa total perdida) corresponde à diferença na massa antes e depois da passagem pela mufla. Quando o bioconcreto foi exposto a uma temperatura de 250 °C, o BCB25 perdeu cerca de 15,45% de massa, o BCB35 cerca de 14,75% e o BCB45, 14,73%.

No estudo de Aguiar (2020), o bioconcreto de madeira sofreu uma diminuição na massa específica aparente com o aumento da temperatura. Esse fato se intensificou com o aumento da fração volumétrica da mistura. Isso acontece devido a pasta cimentícia trabalha como uma proteção física para o bio-agregado contra as altas temperaturas. A Figura 5 apresenta o interior das amostras de BCB45 nas duas temperaturas analisadas. A temperatura de 250 °C começa a apresentar uma coloração mais escura e maior número de vazios perto das partículas de bambu (Figura 5b) devido a degradação do agregado principalmente nas zonas de transição com a pasta cimentícia, o que provoca redução da resistência mecânica das amostras.



a) b)

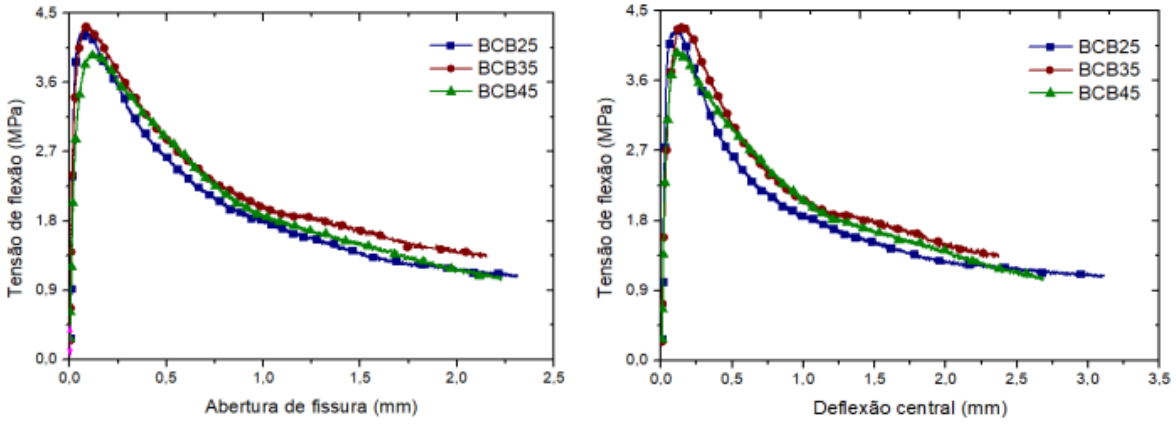
Figura 5Perda de massa do bioconcreto de bambu com o aumento da temperatura a) BCB45 a 22ºC ; b) BMB45 a 250 °C

3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SOB FLEXÃO

As curvas de tensão de flexão x abertura de fissura e tensão de flexão x deflexão central das amostras de bioconcreto com 25%, 35% e 45% de bio-agregado de bambu à temperatura de 22 °C encontram-se na Figura 6. Nota-se o comportamento linear elástico até 62%, 58% e 54% da tensão máxima para os BCB25, BCB35 e BCB45, respectivamente, seguido por um acréscimo de tensão até o pico de forma não linear. Ao atingir a tensão máxima surge uma fissura no entalhe. O comportamento pós pico é marcado por redução da tensão com o aumento das fissuras e da flecha. Os resultados obtidos de resistência à tração por flexão $fctm,fl$, resistência à tração direta $fctm$ e energia de fratura GF referentes à média de quatro corpos de prova para cada mistura e o coeficiente de variação entre parênteses estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos no ensaio de tração sob flexão dos bioconcretos

Bioconcreto	$f_{ctm,fl}\ (MPa)$	$f_{ctm}\ (MPa)$	$G_F\ (N/mm)$
BCB25	4,26 (3,05)	1,68 (9,29)	0,67 (3,71)
BCB35	4,33 (15,34)	1,75 (14,51)	0,83 (12,80)
BCB45	3,98 (7,11)	1,58 (7,66)	0,86 (17,31)



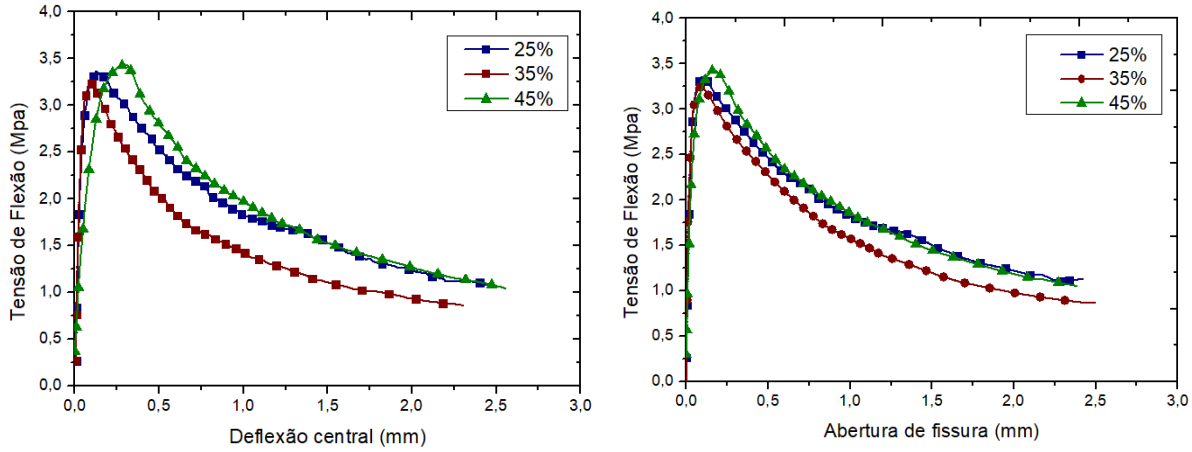
a) b)

Figura 6 – Curvas à temperatura ambiente a) Tensão de flexão x abertura de fissura; b) Tensão de flexão x deflexão central

A partir dos dados da Tabela 2, percebe-se uma diferença inferior a 2% dos resultados dos BCB25 e BCB35 para a resistência à tração na flexão e à flexão pura, visto que estão correlacionadas. O BCB45 apresentou uma diferença de apenas 6,5% e 8,1% na resistência à tração por flexão comparados com o BCB25 e o BCB35, respectivamente. A partir desses resultados, pode-se inferir que o aumento de biomassa não causou prejuízo mecânico sob esforços de flexão para o bioconcreto de bambu. Assim, permite-se aumentar a quantidade de biomassa no compósito, aumentando a capacidade de absorção de energia do material, possibilitando uma maior deformação antes da sua ruptura total, além da redução no consumo do cimento.

Quanto à energia de fratura, o BCB25 apresentou o menor valor entre os compósitos, com uma diferença de 19% e 22%, respectivamente, para o BCB35 e BCB45. Esses resultados indicam uma maior influência dos bio-agregados na capacidade de absorção de energia na formação de uma fissura dentro do compósito. O comportamento do bioconcreto para a energia de fratura é regido pelo bio-agregado. Para a temperatura ambiente (22 °C), o BCB25 apresentou o valor de 0,67 N/mm. Para o BCB35 houve um acréscimo de 24% (0,82 N/mm) e para o BCB45 um acréscimo de 28% (0,86 N/mm). Esses resultados indicam que maiores frações volumétricas de bio-agregado de bambu resultam em maior energia absorvida para a formação de uma fissura. A alta capacidade de absorção de energia dos bioconcretos promovida pelos bio-agregados é uma propriedade típica deste compósito.

Quando submetido a temperatura de 250 °C, o material comportou-se de forma similar àquele em temperatura ambiente, como ilustram as curvas da Figura 7. A Tabela 3 apresenta os valores de resistência à tração por flexão $fctm,fl$, a resistência à tração direta $fctm$ e a energia de fratura (GF). Os valores apresentados representam uma média de quatro corpos-de-prova para cada mistura e entre parênteses são exibidos os valores de coeficiente de variação em porcentagem. Percebe-se uma redução da resistência em relação ao BCB25 de apenas 3,5% e 8,8% para o BCB35 e BCB45, respectivamente. O material mostrou-se capaz de sofrer grande deflexão central e abertura de fissura sem fragmentar-se.



a) b)

Figura 7 – Curvas à 250 °C a) Tensão sob flexão x deflexão central; b) Tensão sob flexão x abertura de fissura

Tabela 4 – Parâmetros obtidos no ensaio de tração sob flexão dos biococnretos submetidos à temperatura de 250 °C

Bioconcreto	$f_{ctm,fl}\ (MPa)$	$f_{ctm}\ (MPa)$	$G_F\ (N/mm)$
BCB25	3,38 (9,22)	1,36 (5,38)	0,35 (11,75)
BCB35	3,26 (12,13)	1,30 (12,76)	0,34 (8,89)
BCB45	3,08 (13,86)	1,53 (8,25)	0,32 (13,28)

Nota-se que o valor da resistência à tração na flexão diminui com o aumento da temperatura. Para o BCB25, percebe-se uma redução de 21% em realação a temperatura de 22 ºC para 250 ºC. Para o BCB35 e BCB45 essa redução foi, respectivamente, de 24% e 28%. De acordo com Aguiar (2020), quando os bioconcretos são submetidos a uma temperatura de 250 ºC, o material apresenta uma alta capacidade de deformação e diminui a massa específica aparente, de forma mais acentuada quando maiores os teores de biomassa vegetal.

O aumento da temperatura também influência diretamente na energia de fratura. O aumento para uma temperatura de 250 ºC ao qual os bioconcretos são expostps mostra uma redução de 48%; 55% e 42% para os BCB25, BCB35 e BCB45, respectivamente.

O bioconcreto comportou-se de forma similar ao bioconcreto de madeira de Aguiar *et al.* (2022). O comportamento do bioconcreto de madeira registrado pela curva de tensão versus deformação demonstrou uma capacidade do material de absorver energia, com uma tensão de pico menor conforme o aumento da fração volumétrica de bio-agregado e com mais energia absorvida na formação de uma fissura conforme maiores os teores de serragem de madeira.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento mecânico de bioconcretos de bambu variando-se a fração volumétrica dos bio-agregados e submetendo-os à temperatura de 250 °C. Baseado nos resultados apresentados as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- Os valores de resistência á tração na flexão para as três frações voluméticas não teve significativa variação, mostrando que o aumento no teor de biomassa até 45% não provoca perda da capacidade mecânica sob esforços de flexão.
- O aumento do volume de bio-agregado resulta em maior energia de fratura do bioconcreto, devido a capacidade de absorção de energia promovida pelo bambu.
- O aumento da temperatura provoca uma redução da capacidade de absorção de energia para qualquer teor volumétrico de biomassa devido a degradação sofrida pelos bio-agregados, entretanto a pasta cimentícia mostrou-se capaz de atuar como obstáculo à degradação térmica do compósito quando submetidos a temperatura de 250 °C, garantindo a estabilidade térmica do bioconcreto até esta temperatura.
- A perda de massa dos biocomcretos se apresenta de forma mais acentuada para a temperatura de 350 ºC devido à degradação térmica do bio-agregado de bambu. A degradação do bio-agregado promoveu vazios nas zonas de interação da pasta cimentícia e bio-agregado causando a diminuição na resistência mecânica do compósito.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. (2011) O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blücher.

AGUIAR, A. L. D. (2020) Estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira. Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro.

AGUIAR, A. L. D. *et al*. (2020) Influência do teor de bio-agregados na resistência à compressão e à tração de bioconcretos de madeira. Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

ANDREOLA, V. M. (2017) Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu. Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. (2002) Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. PhD, Universidade do Minho, Minho.

DA GLORIA, M. Y. R. (2020) Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

DA GLORIA, M. et al. (2020) A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. Journal of Building Engineering.

DA SILVA, S. S.; ISAIA, G. A. (2022) Acv e ccv em concretos com elevados teores de filer calcário. MIX Sustentável, v. 8, n. 3, p. 130-141

DA SILVA, J. B.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. (2020) High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. **Fire Safety Journal**, v. 117, p. 103222.

FALESCHINI, F.; ZANINI, M. A.; PELLEGRINO, C.; PASINATO, S. (2016) Sustainable Management and Supply of Natural and Recycled Aggregates in a Medium-Size Integrated Plant. Waste Management, v. 49, p. 146–155.

GOMES, B.M.C et al. (2022a), Environmental and mechanical performance assessment of bamboo culms and strips for structural use: Evaluation of Phyllostachys pubescens and Dendrocalamus giganteus species, Construction and Building Materials, vol. 353, 129078.

GOMES, B.M.C et al. (2022b) Comportamento mecânico e reação ao fogo do bioconcreto de bambu. Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON

KRAVCHENKO, G. A., FERREIRA, E. M., PASQUALETTO, A. (2015) "Utilização de Resíduos do Processamento de Chapas Laminadas de Bambu para Produção de Chapas Recompostas", v. 19, n. 21, pp. 1499–1507

LEHNE, J., PRESTON, F. (2018) Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete. Chatham House Report, Londres, UK.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (2014) Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON.

PINTO, M. C. (2019) Influência da temperatura e de tratamentos alcalinos na remoção dos extrativos da biomassa de madeira e seus efeitos na hidratação de pastas de cimento e de bioconcreto. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

VALVERDE, F. M. (2020) O novo normal na indústria de agregados. Associação nacional das entidades de produtores de agregados para construção - ANEPAC

VEDRONI, W. J.; CARVALHO, D. (2008) Case study: use of construction and demolition residues in road repair work in Piracicaba-SP. HOLOS Environment, v. 8, n. 2, p. 149–165.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONSTRUÇÃO INCREMENTAL COMO INSTRUMENTO DE ECONOMIA CIRCULAR NA PRODUÇÃO DE COOPERATIVAS DE HABITAÇÃO

Fernanda Paes de Barros Gomide [a], Eloy Fassi Casagrande Junior [b] and Luís Bragança [c]

[a]PPGTE, Postgraduate Program in Technology and Society, Federal University of Technology-Paraná (UTFPR), Curitiba 80230-901, Brazil; fernandapaesdebarros@gmail.com

[b]PPGTE, PPGTE, Postgraduate Program in Technology and Society, Federal University of Technology-Paraná (UTFPR), Curitiba 80230-901, Brazil; fassi@utfpr.edu.br

[c]Department of Civil Engineering, ISISE, ARISE, University of Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; braganca@civil.uminho.pt

RESUMO

A proposta da Economia Circular (EC), que visa minimizar desperdícios e maximizar a utilização de recursos, é crucial no contexto de provisão de habitação de interesse social (HIS). Ao incorporar os princípios da CE nas políticas de HIS, é possível dar passos significativos em direção a um futuro mais sustentável e equitativo. O movimento de cooperativas de habitação apresenta-se como uma solução que está a crescer e a capacitar as comunidades locais para assumirem um papel ativo no desenvolvimento, propriedade e gestão de habitações. Em alguns projetos de cooperativas de habitação, há a oportunidade de usar o processo de construção incremental na habitação oferecendo a flexibilidade de adaptar a construção às mudanças nas circunstâncias e necessidades dos moradores ao longo do tempo. A investigação buscou por meio de uma revisão sistemática de literatura, em bases de dados científicas, estudos de caso de cooperativas de habitação que incorporaram, intencionalmente ou não, a ferramenta de construção incremental em seus fundamentos. Ao final da pesquisa, os documentos selecionados trouxeram possibilidades reais de incorporar princípios de EC nos modelos de cooperativas de habitação apropriando a ferramenta de construção incremental.

PALAVRAS-CHAVE

habitação de interesse social, cooperativas de habitação, economia circular, construção incremental

1. INTRODUÇÃO

A questão da Habitação de Interesse Social (HIS) é uma preocupação premente que as áreas urbanas de todo o mundo enfrentam. Infelizmente, as políticas de HIS não foram capazes de enfrentar eficazmente o desafio do direito à moradia digna. Soma-se a este contexto a crise econômica de 2008 que teve um impacto significativo nas políticas habitacionais, levando a uma crise habitacional global e à necessidade de reorientar a investigação e as políticas habitacionais. O problema é ainda agravado pela questão global dos assentamentos informais que abrigam cerca de um bilhão de pessoas em todo o mundo (Habitat for Humanity GB, 2017). Isto resultou num declínio na qualidade de vida e numa grave degradação ambiental.

Este estudo, baseado em (European Parlament, 2024; Granath Hansson & Lundgren, 2019), define habitação de interesse social como habitação acessível para pessoas de baixa renda, famílias ou pessoas com dificuldades em encontrar habitação própria. Ainda, é gerida pelo governo ou sem fins lucrativos, para aluguel ou acesso à propriedade, com base em valores definidos por regras que regem os projetos. Um projeto de HIS tem a função de utilizar o espaço urbano para promover a

sustentabilidade socioambiental. No entanto, desafios como a inclusão social, o acesso a condições de habitação saudáveis, a melhoria econômica, e a utilização ideal dos recursos naturais devem ser abordados.

A proposta da Economia Circular (EC), que visa minimizar desperdícios e maximizar a utilização de recursos, é crucial no contexto de provisão de HIS. Neste estudo, os autores gostariam de seguir o conceito de Economia Circular definido por (Kirchherr et al., 2017): "uma sistema econômico que substitui o conceito de "fim de vida" pela redução, alternativamente, pela reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção/distribuição e consumo".

Ao incorporar os princípios da CE nas políticas de HIS, é possível dar passos significativos em direção a um futuro mais sustentável e equitativo. Essa parceria pode ser possível tendo como base as análises de (Çetin et al., 2021; Marchesi & Tweed, 2021). Desta maneira seguem os cinco princípios de EC que podem contribuir para soluções mais sustentáveis no setor da HIS:

1. Retrofit e atualizações sustentáveis: melhorar a eficiência dos recursos e a sustentabilidade na renovação a qual envolve considerar fatores como a qualidade dos materiais, a redução de resíduos e o impacto ambiental geral.

2. Equilibrar as necessidades: equilibrar as necessidades dos inquilinos e as restrições orçamentais da habitação exige considerar as preferências dos inquilinos durante a modernização, garantindo o alinhamento com as práticas de sustentabilidade.

3. Integração política: a integração nacional e local garante o alinhamento da HS com objetivos mais amplos de sustentabilidade e promove a eficiência dos recursos.

4. Justiça ambiental e equidade: o combate à poluição é crucial, dando prioridade à saúde pública, ao desenvolvimento econômico e à equidade, especialmente nas comunidades desfavorecidas.

5. Benefícios econômicos e sociais: modelos de negócio circulares, que enfatizam a concepção de materiais, a partilha, a reciclagem e a reutilização, criam empregos, reduzem o impacto ambiental e promovem a sustentabilidade e a equidade.

Para enfrentar o desafio das questões relacionadas à HIS, é essencial envolver a participação dos usuários em todo o processo de tomada de decisão. Este estudo tem como questão problema "como o processo de construção incremental (co-design, co-execução, co-manutenção) nas cooperativas de habitação pode incorporar princípios da Economia Circular?" Assim, o objetivo deste estudo é verificar quais princípios da Economia Circular, aplicados na construção incremental em estudos de caso de cooperativas de habitação, podem colaborar para soluções mais sustentáveis no setor da HIS.

Enfim, o cerne desta pesquisa reside em procurar soluções práticas para enfrentar os desafios da HIS, baseadas na realidade, em vez de confiar em soluções teóricas de cima para baixo. O foco está na aprendizagem ascendente e na aquisição de conhecimento para discernir o que funciona na prática.

2. ESTADO DA ARTE

O movimento de cooperativas de habitação apresenta-se como uma solução que está a crescer e a capacitar as comunidades locais para assumirem um papel ativo no desenvolvimento, propriedade e gestão de habitações. Esta abordagem ajuda a criar comunidades resilientes e acessíveis e garante benefícios a longo prazo. Ainda, operam sob princípios de autoajuda, autorresponsabilidade, democracia, igualdade, equidade e solidariedade (Hölzl & Bernet, 2019).

Cooperativa de habitação é um termo amplo que abrange vários modelos de habitação onde os residentes possuem e administram coletivamente a propriedade. Existem vários modelos de cooperativas de habitação com objetivos diversos. Ganapati (2012) (Ganapati, 2014) as classifica como cooperativas de posse, construção e financiamento. Embora não sejam mutuamente exclusivas, as cooperativas de posse servem a propriedade e gestão coletiva, as cooperativas de construção centram-se no desenvolvimento de terras e na construção de habitação e as cooperativas financeiras emprestam dinheiro aos membros para fins habitacionais. As cooperativas de habitação em todo o mundo assumem três formas principais: arrendamento, capital limitado e valor de mercado. Variam ainda no tipo de edifícios que possuem e gerem, desde edifícios altos a habitações unifamiliares e de locais urbanos a rurais (Sanjinés, 2018). As cooperativas habitacionais utilizam diferentes mecanismos financeiros, dependendo do seu contexto econômico, político e regulamentar específico.

Sendo uma das opções dominantes de fornecimento de habitação de autoajuda, as cooperativas de habitação desempenham um papel fundamental na consecução do objetivo global de fornecer abrigo adequado aos seus membros através de três funções, estas incluem permitir que as famílias reúnam coletivamente os seus recursos para a aquisição e desenvolvimento de terrenos e habitação, facilitando o acesso a recursos financeiros e capacitando os grupos para colaborarem, reduzindo efetivamente os custos de construção fundamentais (Adigeh & Abebe, 2024). Segundo Adiged e Abebe (2024) (Adigeh & Abebe, 2024), este modelo serve como um meio essencial de provisão de habitação para grupos de baixa e média renda, no qual os residentes de zonas urbanas com rendimentos médios e baixos reúnem-se e formam cooperativas, reunindo os seus recursos e mão-de-obra em cooperação com os bancos e o governo local para o fornecimento de terrenos e financiamento de habitação, respetivamente.

Como exemplos, os membros das cooperativas de habitação no Quênia são responsáveis por poupar 30% do desenvolvimento habitacional, incluindo o custo do terreno, e depois, os restantes 70% são cobertos pelo empréstimo com juros mínimos por um longo período do banco (Feather & Meme, 2019). O Zimbabué considera a cooperativa de habitação como a melhor e mais simplista forma de obter habitação urbana, através da qual o governo cumpre a sua responsabilidade de organizar as necessidades habitacionais das populações de baixos e médios rendimentos em cooperativas de habitação e de fornecer terrenos com serviços com supervisão do fornecimento e processo de materiais de construção (Adigeh & Abebe, 2024).

A Espanha entrou em uma nova fase da produção de cooperativas de habitação. O que distingue a fase atual dos século XX na Espanha é que a propriedade permanece na propriedade coletiva e é autogerida, devido a uma mudança fundamental nos seus objetivos e objetivos sociais (Avilla-Royo et al., 2021). A Espanha traz um caso recente de cooperativa de habitação chamada La Borda, em Barcelona, na qual o modelo de concessão de uso baseia-se na propriedade coletiva para separar a propriedade da utilização, de modo a que estes bens comuns sejam protegidos de processos de

mercantilização (Leyva Del Río, 2022). O ativismo social e uma maior participação comunitária na governança urbana e na política habitacional têm sido motores relevantes desta solução habitacional.

As cooperativas de habitação são uma parte importante do mercado imobiliário em muitos países da Europa. Por exemplo, na Polônia, as cooperativas de habitação geriam cerca de 27% do parque habitacional total do país em 2009. Na República Checa e na Suécia, as cooperativas habitacionais representavam cerca de 17% do parque habitacional total. Na Noruega, representavam cerca de 15% do parque habitacional total (Europe Housing, 2012).

No entanto, a cooperativa de habitação não proporciona um modelo unitário e os seus princípios são adaptados a cada contexto específico de regulamentos, quadro financeiro e valores culturais. Em relação ao tamanho das cooperativas de habitação, as organizações maiores têm os seus próprios departamentos técnicos profissionalizados, as cooperativas menores são normalmente organizadas numa base voluntária e contam com o apoio de equipas interdisciplinares externas (Avilla-Royo et al., 2021).

Avilla-Royo et al (2021) (Avilla-Royo et al., 2021) sinalizam algumas barreiras que ainda estão dificultando a viabilização de projetos de cooperativas de habitação. As opções de financiamento são limitadas e a falta de garantias governamentais inviabilizam o processo. Ainda, o apoio político precisa ser coerente a nível local e distrital. Visões mais rigorosa na interpretação da conformidade regulamentar distrital acaba por afastar a possibilidade de projetos com o mínimo de qualidade encarecendo assim o custo do empreendimento.

Em alguns projetos de cooperativas de habitação, há a oportunidade de usar o processo de construção incremental o qual envolve o comitê da cooperativa já na fase de design. Seguem tomando decisões sobre o processo de construção incremental nas fases seguintes de execução e manutenção, tanto das habitações quanto dos espaços de convivência comuns. Assim, as decisões de co-design referem-se a questões arquitetônicos e sociais (Brysch, S. L. et al., 2023).

A construção incremental é uma prática evidente, particularmente no Sul Global, onde as famílias de baixos rendimentos frequentemente se envolvem em habitações de autoajuda (Bredenoord, 2016). Esta abordagem, é vista como uma solução sustentável e fortalecedora para o problema da habitação, no entanto, também é influenciado por sistemas e fluxos urbanos e regionais maiores (Van Noorloos et al., 2020), e a sua implementação pode ser limitada por políticas e práticas habitacionais convencionais (Marinovic, 2021).

Dentro deste contexto, apresenta-se o conceito de construção incremental. Este pode ser definido como um processo gradual pelo qual os componentes de um projeto embrião são anexados ou melhorados pelos proprietários dependendo das disponibilidades de financiamento, tempo, mão de obra ou materiais e funcionalidade. Segundo (Bredenoord & van Lindert, 2010), há nisto um catalisador para engajar as pessoas e para promover negócios locais de famílias e comunidades pobres.

Marinovich (2021) (Marinovic, 2021) sustenta a hipótese de que os esforços das famílias para completar a casa inacabada cultivam o sentimento de pertencimento ao lugar. O autor usa o termo ‘unfinished house’ quando analisa que esta condição não acabada da casa, que a princípio parece desvalorizar o projeto, acaba por gerar um comprometimento entre os moradores em investir na ampliação e melhoramento das casas. Ainda, a construção incremental na habitação oferece a

flexibilidade de adaptar a construção às mudanças nas circunstâncias e necessidades dos moradores ao longo do tempo.

Essa abordagem permite que os indivíduos adquiram habilidades práticas, habilidades de resolução de problemas e uma compreensão mais profunda do processo de construção. Este solução pode ser um catalisador para engajar as pessoas (desenvolvimento social) e para promover negócios locais (desenvolvimento econômico) de famílias e comunidades pobres (Bredenoord, 2022).

A construção incremental para que garanta a segurança, qualidade e atenda aos parâmetros legais do contexto deve estar embasada na proposta da arquitetura incremental. A arquitetura incremental traz a proposta de autogestão e/ou autoconstrução pelos próprios moradores das ampliações e reformas, mas sobre projetos de casas embrionárias, desenhadas com o propósito da construção incremental. Não se trata de um conceito novo, já foi idealizado na metade do século passado. Entretanto, considerando um contexto atual de urgência por inclusão social, otimização da infraestrutura e dos serviços urbanos e satisfação dos moradores com suas moradias, a construção incremental volta a ser discutida como uma possível solução sustentável para o problema da HIS no planeta.

3. METODOLOGIA

A primeira parte da pesquisa diz respeito à uma revisão bibliográfica sobre o tema na qual não somente a literatura branca como também a cinza foram acessadas.

Na sequência, a investigação buscou por meio de uma revisão de literatura, em bases de dados científicas, estudos de caso de cooperativas de habitação que incorporaram, intencionalmente ou não, a ferramenta de construção incremental em seus fundamentos.

Para isto, uma busca nas bases Scopus e Web of Science usou dos termos em inglês “cooperative housing” e “housing cooperative”. O filtro aplicado nas bases de dados foi “todos os tipos de documentos”. Somente documentos na língua inglesa e Open Access foram considerados. Outro critério de exclusão foram os documentos antes de 2000.

Desta busca, foram apresentados 195 documentos. Deste total, foram excluídos os duplicados e adicionados documentos citados nos documentos já selecionados, partindo então para 134 documentos selecionados. Uma análise minuciosa a cada um dos documentos identificou quais estudos de Cooperativas de habitação continham também a construção incremental como ferramenta. Restaram assim seis documentos que foram organizados em uma Matriz de Resultados para que pudessem ser melhor analisados (Ver Quadro 1). Nesta Matriz de Resultados, os autores organizaram os documentos em linhas e, em colunas, os cinco princípios de economia circular que se relacionam com habitação de interesse social.

Por fim, procurando responder à questão problema deste estudo, os autores extraíram dos seis documentos finais princípios da EC que foram aplicados no processo de construção incremental em estudos de caso de cooperativas de habitação.

4. RESULTADOS

Apesar de partir de uma seleção de 195 documentos científicos de cooperativas de habitação, somente seis documentos apresentaram casos de cooperativas de habitação que fizeram uso da ferramenta construção incremental (Ver quadro 1). Os demais casos de fato discutiram bastante a participação dos usuários no design e planejamento, entretanto, não inseriram o processo de construção

incremental no empreendimento. Também foram acessados documentos que analisaram casos de construção incremental, mas não em modelos de cooperativas de habitação.

Os autores destes seis documentos (Avilla-Royo et al., 2021; Bredenoord, 2016; S. Brysch, 2018; Brysch, S. L. et al., 2023; Cabré & Andrés, 2018; Rodríguez & Zapata, 2023) são reconhecidos como referências nos estudos relacionados aos temas aqui discutidos.

No Quadro 1, é possível verificar que mais de um documento abordou o caso de La Borda, em Barcelona, Espanha. Ainda há outros casos na Espanha como também na Argentina e na Nicarágua.

É possível verificar no Quadro 1 que nem todos os cinco princípios de EC tiveram práticas identificadas em todos os seis documentos. Entretanto, todos os documentos trouxeram dados que estavam sendo procurados com esta metodologia, o que possibilitou uma análise dos resultados.

Quadro 1 - Matriz de Resultados (continua)

Estudo de caso de Cooperativas de Habitação		**QP - Como o processo de Construção Incremental, nos casos de Cooperativas de Habitação, incorporou princípios da Economia Circular?**				
Título	**Fonte**	**1.Retrofit e atualizações sustentáveis: Melhorar a eficiência dos recursos e a sustentabilidade na renovação a qual envolve considerar fatores como a qualidade dos materiais, a redução de resíduos e o impacto ambiental geral.**	**2.Equilibrar as necessidades: Equilibrar as necessidades dos inquilinos e as restrições orçamentais da habitação exige considerar as preferências dos inquilinos durante a modernização, garantindo o alinhamento com as práticas de sustentabilidade.**	**3.Integração política: A integração nacional e local garante o alinhamento da HIS com objetivos mais amplos de sustentabilidade e promove a eficiência dos recursos.**	**4.Justiça ambiental e equidade: O combate à poluição é crucial, dando prioridade à saúde pública, ao desenvolvimento econômico e à equidade, especialmente nas comunidades desfavorecidas.**	**5.Benefícios económicos e sociais: Modelos de negócio circulares, que enfatizam a concepção de materiais, a partilha, a reciclagem e a reutilização, criam empregos, reduzem o impacto ambiental e promovem a sustentabilidade e a equidade.**
La Borda: a case study on the implementation of cooperative housing in Catalonia	Cabré e Andrés, 2018	Recuperação de um antigo bairro industrial subutilizado e arruinado.		Acesso à terra através de um direito de superfície a um preço acessível e deu a segurança de posse aos moradores podendo investir a longo prazo nas suas moradias.		Utiliza o espírito empreendedor e o capital social da comunidade para fazer avançar o projeto e cultivar um sentimento de pertença e de responsabilidade comum entre os seus membros.
The building as a home: Housing cooperatives in Barcelona	Avilla-Royo, Jacoby & Bilbao, 2021	A cessão de um edifício para reforma pela cooperativa habitacional; sistema construtivo inovador.	Acordadas entre os moradores, as plantas da "unidade básica" foram pensadas para permitir variações em dois sentidos: adicionar e personalizar.	Uso de parcerias público-privada, com subsídios publicos e dando segurança de posse aos moradores que podem investir a longo prazo em suas moradias.	Incentivando a interação social em todas as fases da vida e ressocializando o trabalho doméstico. Oferecer segurança pessoal através de redes sociais de apoio.	

Quadro 1 - Matriz de Resultados (conclusão)

Título	Fonte	1.Retrofit e atualizações sustentáveis: Melhorar a eficiência dos recursos e a sustentabilidade na renovação a qual envolve considerar fatores como a qualidade dos materiais, a redução de resíduos e o impacto ambiental geral.	2.Equilibrar as necessidades: Equilibrar as necessidades dos inquilinos e as restrições orçamentais da habitação exige considerar as preferências dos inquilinos durante a modernização, garantindo o alinhamento com as práticas de sustentabilidade.	3.Integração política: A integração nacional e local garante o alinhamento da HIS com objetivos mais amplos de sustentabilidade e promove a eficiência dos recursos.	4.Justiça ambiental e equidade: O combate à poluição é crucial, dando prioridade à saúde pública, ao desenvolvimento econômico e à equidade, especialmente nas comunidades desfavorecidas.	5.Benefícios económicos e sociais: Modelos de negócio circulares, que enfatizam a concepção de materiais, a partilha, a reciclagem e a reutilização, criam empregos, reduzem o impacto ambiental e promovem a sustentabilidade e a equidade.
Community-led housing: Between 'right to the city', 'actually existing neoliberalism' and post-pandemic cities	Rodríguez & Zapata, 2024				Elevado grau de feminização. Majoritariamente mulheres nos cargos de gestão e administração e comissões.	Apoio mútuo e voluntário, dias de solidariedade como estratégia para poupar dinheiro; contratando e criando cooperativas de trabalho e assinaram contratos com pequenas construtoras ou familiares; promoveram a integração do grupo, desenvolveram ou despertaram competências e estimularam a criação de novos empregos.
Designing and building housing together: the spanish case of La Borda	Brysch, 2018		Diversidade de rendas familiares, possibilita investimentos variados e em prazos variados.			
The process of value setting through co-design: the case of La Borda, Barcelona	Brysch, Garcia i Mateu & Czischke, 2023.	Considerar produto e processo indissociáveis de um todo.	Co-design e auto-organização (design baseado nas necessidades, tarefas em espécie); flexibilidade espacial; redefinição dos padrões mínimos de habitação pelos próprios residentes (unidades privadas menores, menos equipadas e inacabadas se combinadas com espaços coletivos.		Autogestão prevaleceu no final sob a condição de que a igualdade de gênero fosse garantida	Participação dos moradores em envolvimento ativo em atividades ou projetos de construção física; enfatiza a aprendizagem através da experiência direta; indivíduos adquiram habilidades práticas, de resolução de problemas e uma compreensão mais profunda do processo de construção; geralmente envolvem o uso de ferramentas, materiais e técnicas para construir ou criar algo tangível.
Sustainable Housing and Building Materials for Low-income Households	Bredenoord, 2015		Tradições de construção locais combinadas com novas tecnologias e de baixo custo.	Assistência técnica fornecida a essas famílias pelo governo local, ONGs e parcerias.		Produtores e vendedores de materiais de construção locais.

5. ANÁLISE E DISCUSSÕES

Com os resultados apresentados no capítulo 3, segue o caminho para responder à questão problema desta pesquisa: QP - Como o processo de construção incremental, nos casos de cooperativas de habitação, incorporou princípios da economia circular?

Os seis documentos analisados no Quadro 1 contribuíram com material para enriquecer esta pesquisa. Assim sendo, foi possível alinhar práticas identificadas nos documentos com os cinco princípios de EC para a HIS.

Conforme a organização da matriz de Resultados (Quadro 1), segue a análise dos resultados e as discussões derivadas disto.

1- Para alcançar uma renovação sustentável, é crucial priorizar fatores como qualidade dos materiais, redução de resíduos e impacto ambiental. A revitalização de antigos bairros industriais subutilizados e em ruínas com a participação dos comitês das cooperativas de habitação e a possibilidade de uma construção incremental pôde dar nova vida à área. Ainda, abertura ao uso de sistemas construtivos inovadores e ecológicos, no projeto básico e também nas suas ampliações e reformas, mostrou-se uma solução que teve aderência dos moradores. A visão de que o produto e o processo como um todo inseparável para alcançar retrofits e atualizações sustentáveis trouxe uma abordagem holística que melhorou a eficiência dos recursos, reduziu o desperdício e preparou o caminho na comunidade para um futuro mais sustentável.

2- É crucial encontrar um equilíbrio entre as necessidades dos moradores e as restrições orçamentárias. Ao projetar a "unidade base" para ser personalizada, fazendo investimentos variados ao longo de diferentes prazos, incentivando o co-design e a auto-organização, e combinando tradições de construção locais com tecnologias novas e de baixo custo, mostrou-se uma solução que promove a sustentabilidade e a rentabilidade enquanto atende às necessidades dos moradores.

   Os testemunhos indicam que as abordagens práticas de construção podem, de fato, contribuir para aumentar a acessibilidade, entretanto devem ser organizadas coletivamente e o tempo gasto não seja considerado um fardo cansativo (S. L. Brysch & Czischke, 2022).

   Os resultados apontam também para uma redefinição dos padrões mínimos de qualidade, numa combinação de fatores que incluem a) a redução da superfície e infraestruturas nos espaços privados, b) a aceitação de espaços ou superfícies inacabadas, c) o questionamento de algumas normas de construção, e d) a valorização conceitos como sustentabilidade e alta eficiência energética. A aceitação de unidades menores, menos instalações e espaços ou superfícies inacabados também pode resultar de um alto nível de participação dos residentes (S. L. Brysch & Czischke, 2022).

   Os resultados mostraram que a redefinição dos padrões mínimos de habitação pelos próprios moradores definem o seu próprio conjunto de padrões socialmente aceitáveis.

3- A integração de políticas envolve o alinhamento dos sistemas nacionais e locais com objetivos mais amplos de sustentabilidade, o que promove a eficiência dos recursos. Exemplos desta prática mostraram alternativas ao prejuízo que as lacunas que existem entre poderes

nacionais e locais. Os moradores puderam ter acesso à terra através de um direito de superfície a um preço acessível, o que lhes dá segurança de posse e a capacidade de investir mais nas suas casas. As parcerias público-privadas, juntamente com os subsídios públicos, também proporcionam segurança de posse aos moradores e possibilitaram investir nas casas a longo prazo. Garantir assistência técnica às famílias ao longo do processo incremental depende de um arranjo a longo prazo do governo local, das organizações do terceiro setor, das parcerias, assim como dos comitês das cooperativas de habitação com o foco em garantir qualidade e segurança.

O papel do governo como facilitador e protetor é fundamental para o sucesso das iniciativas habitacionais. O seu apoio incondicional e a sua abertura a novas realidades, como normas técnicas adaptadas, padrões de exigências burocráticas aliviados, modelos de propriedade acessíveis, entre outras práticas, estabelecem os governos locais e nacionais como principais intervenientes no processo.

4- A justiça e a equidade ambientais são cruciais no combate à poluição e na priorização da saúde pública, do desenvolvimento econômico e da equidade, especialmente nas comunidades desfavorecidas. Os estudos detectaram que incentivar a interação social em todas as fases da vida e ressocializar o trabalho doméstico é crucial para promover a autonomia e apropriação do espaço. Os casos de estudos mostraram que assim é possível proporcionar segurança pessoal através de redes de apoio social. Uma vez que os cargos e comissões de gestão e administração mostraram ser maioritariamente ocupados por mulheres, trouxe às comunidades um elevado grau de feminização. Sobressai-se aqui o caso no qual a autogestão prevaleceu, mas apenas sob a condição de que a igualdade de gênero fosse garantida.

5- Para alcançar um desenvolvimento sustentável e equitativo, os modelos de negócios circulares são fundamentais. Esses modelos priorizam o design, o compartilhamento, a reciclagem e a reutilização de materiais, resultando na criação de recursos, na redução do impacto ambiental e na contribuição para a economia circular. Os estudos mostraram que o apoio mútuo, o envolvimento ativo nas atividades de construção e a criação de cooperativas de trabalho foram essenciais para promover um sentimento de pertença e de responsabilidade partilhada entre os membros da comunidade. No que diz respeito à participação física na construção, esta experiência possibilitou o desenvolvimento de habilidades práticas de resolução de problemas e uma compreensão mais profunda do processo de construção. Mesmo nos casos nos quais os moradores contrataram os serviços, a troca de experiências criou uma capacitação que trouxe autonomia para os moradores e para a localidade. Além disso, a utilização de materiais de construção de origem local foi fundamental para apoiar as economias locais contribuindo assim para reduzir as emissões dos transportes. Os produtores e vendedores locais de materiais de construção desempenham um papel vital na promoção do desenvolvimento sustentável. É crucial reconhecer a importância destas abordagens e implementá-las nas comunidades para construir um futuro mais equitativo e sustentável. Ao promover o envolvimento comunitário, a aprendizagem prática e a eficiência dos recursos, é possível criar um mundo melhor para as gerações futuras.

Ao menos nos países envolvidos nos seis documentos analisados, houve uma mudança significativa na concepção das políticas e programas habitacionais existentes, particularmente no que diz respeito a "o que" deve ser alcançado por uma política habitacional. Os governos estão a prestar mais atenção

aos processos informais de construção de habitação, embora ainda esteja pendente a incorporação do apoio à construção incremental de habitação. Este é um desafio significativo, que envolve acrescentar aos programas habitacionais tradicionais soluções baseadas na poupança das famílias, nos subsídios do lado da procura e no desenvolvimento dos mercados de financiamento habitacional. É necessário fornecer às famílias serviços que elas não conseguem obter por si próprias, como acesso a lotes adequados para uso residencial e assistência técnica para as tarefas mais complexas envolvidas na construção incremental de casas (Greene & Rojas, 2008).

6. CONCLUSÕES

Retomando o objetivo deste estudo que foi verificar quais princípios da Economia Circular, aplicados na construção incremental em estudos de caso de cooperativas de habitação, os resultados apontaram conclusões relevantes. Os casos estudados de cooperativas de habitação com o uso da ferramenta de construção incremental proporcionou a incorporação dos cinco princípios da EC nas HIS.

Com a análise e as discussões alinhadas, os documentos selecionados por meio da RSL trouxeram possibilidades reais de incorporar princípios de EC nos modelos de cooperativas de habitação apropriando a ferramenta de construção incremental.

Pode-se citar algumas práticas utilizadas nos casos de estudo que estão relacionadas a princípios da EC como: uso de sistemas construtivos inovadores e ecológicos; retrofits; co-design; redefinição dos padrões mínimos de qualidade, tamanho, funcionalidade; garantia de segurança de posse; possibilidade de investimento a longo prazo; promover a autonomia e as economias locais, entre outras.

As políticas públicas de habitação de interesse social devem considerar estudos como este, que propõem práticas para enfrentar o desafio habitacional com base nos princípios de EC. Em especial, devem ser destacados modelos como as cooperativas de habitação, que valorizam a coparticipação dos usuários em todas as fases do projeto, oferecendo autonomia para que, junto à sociedade, encontrem soluções mais assertivas e viáveis de acordo com cada contexto.

Esta pesquisa é parte de um estudo mais completo sobre o tema e pôde-se verificar que a produção de análises científicas e publicadas envolvendo a construção incremental como parte do modelo de cooperativas de habitação ainda é mínimo. Os autores esperam que esta pesquisa seja motivadora para que haja mais interesse em estudar o tema.

Salienta-se que a pesquisa aqui proposta tem seu foco definido no processo de construção incremental, o que não exclui que futuros estudos se debrucem sobre os princípios de EC relacionados há outros aspectos do empreendimento, assim como projeto, arranjos financeiros, regulamentações, manutenção, infraestrutura, entre outros tão relevantes quanto para serem estudados e aprimorados no busca de uma construção habitacional de moradias sociais com uma menor pegada ecológica e maior acessibilidade.

Partindo da necessidade por soluções de HIS no mundo que sejam mais eficientes, mais acessíveis e com menor impacto ambiental, a pesquisa mostrou que através de práticas que incorporem princípios de EC isso é possível. Retomar o modelo de cooperativas de habitação do século passado e adaptá-lo aos contextos atuais, incorporando a ferramenta da construção incremental, promete contribuir para a solução da moradia digna no mundo e em consonância com os princípios da economia circular.

Referências

Adigeh, D. T., & Abebe, B. G. (2024). Land acquisition policy and practice for cooperative housing scheme in Bahir Dar, Ethiopia: Toward affordable housing solutions. *Frontiers in Sustainable Cities*, *5*, 1234620. https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1234620

Avilla-Royo, R., Jacoby, S., & Bilbao, I. (2021). The Building as a Home: Housing Cooperatives in Barcelona. *Buildings*, *11*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/buildings11040137

Bredenoord, J. (2016). Sustainable Housing and Building Materials for Low-income Households. *Journal of Architectural Engineering Technology*, *05*(01). https://doi.org/10.4172/21689717.1000158

Bredenoord, J. (2022). *Housing and planning in urbanizing countries*. https://bredenoordhousingresearch.com/

Bredenoord, J., & van Lindert, P. (2010). Pro-poor housing policies: Rethinking the potential of assisted self-help housing. *Habitat International*, *34*(3), 278–287. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2009.12.001

Brysch, S. (2018). Designing and building housing together_The Spanish case of La Borda.pdf. *ENHR Conference Paper*. https://www.academia.edu/38091942/Designing_and_building_housing_together_The_Spanish_case_of_La_Borda_pdf

Brysch, S. L., & Czischke, D. (2022). Affordability through design: The role of building costs in collaborative housing. *Housing Studies*, *37*(10), 1800–1820. https://doi.org/10.1080/02673037.2021.2009778

Brysch, S. L., Garcia i Mateu, A., & Czischke, D. (2023). *The process of value setting through co-design: The case of La Borda, Barcelona*. https://doi.org/10.1080/15710882.2023.2277724

Cabré, E., & Andrés, A. (2018). La Borda: A case study on the implementation of cooperative housing in Catalonia. *International Journal of Housing Policy*, *18*(3), 412–432. https://doi.org/10.1080/19491247.2017.1331591

Çetin, S., Gruis, V., & Straub, A. (2021). Towards Circular Social Housing: An Exploration of Practices, Barriers, and Enablers. *Sustainability*, *13*(4), 2100. https://doi.org/10.3390/su13042100

Europe Housing. (2012). *Cooperative housing | Housing Europe*. https://www.housingeurope.eu/event-183/cooperative-housing

European Parlament. (2024). Social Housing in the EU. *FRDB*. https://www.frdb.org/pubblicazioni/social-housing-in-the-eu/

Feather, C., & Meme, C. K. (2019). Strengthening housing finance in emerging markets: The savings and credit cooperative organisation (SACCO) model in Kenya. *Housing Studies*, *34*(9), 1485–1520. https://doi.org/10.1080/02673037.2019.1584663

Ganapati, S. (2014). Housing Cooperatives in the Developing World. In *Affordable Housing in the Urban Global South*. Routledge.

Granath Hansson, A., & Lundgren, B. (2019). Defining Social Housing: A Discussion on the Suitable Criteria. *Housing, Theory and Society*, *36*(2), 149–166.

https://doi.org/10.1080/14036096.2018.1459826

Greene, M., & Rojas, E. (2008). Incremental construction: A strategy to facilitate access to housing. *Environment and Urbanization*, *20*(1), 89–108. https://doi.org/10.1177/0956247808089150

Habitat for Humanity GB. (2017). Habitat for Humanity GB. *The World's Largest Slums: Dharavi, Kibera, Khayelitsha and Neza*. https://www.habitatforhumanity.org.uk/blog/2017/12/the-worlds-largest-slums-dharavi-kibera-khayelitsha-neza/

Hölzl, C., & Bernet, T. (2019). *Cooperative Housing in Germany* (pp. 38–43).

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, *127*, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Leyva Del Río, S. (2022). Conceptualising the commons as a relational triad: Lessons from the grant of use cooperative housing model in Barcelona. *Geoforum*, *136*, 112–121. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.09.007

Marchesi, M., & Tweed, C. (2021). Social innovation for a circular economy in social housing. *Sustainable Cities and Society*, *71*, 102925. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102925

Marinovic, G. I. (2021). Belonging to Place: Interpretative Phenomenological Analysis of Incremental Housing. *ACE: Architecture, City and Environment*, *16*(46). https://doi.org/10.5821/ace.16.46.9706

Rodríguez, M. C., & Zapata, M. C. (2023). Community-led housing: Between 'right to the city', 'actually existing neoliberalism' and post-pandemic cities. *Urban Studies*, *60*(5), 829–846. https://doi.org/10.1177/00420980221129527

Sanjinés, D. (2018, February 19). *The Role of Cooperatives in the Provision of Affordable Housing: An introductory overview | Espazium*. https://www.espazium.ch/it/attualita/role-cooperatives-provision-affordable-housing-introductory-overview

Van Noorloos, F., Cirolia, L. R., Friendly, A., Jukur, S., Schramm, S., Steel, G., & Valenzuela, L. (2020). Incremental housing as a node for intersecting flows of city-making: Rethinking the housing shortage in the global South. *Environment and Urbanization*, *32*(1), 37–54. https://doi.org/10.1177/0956247819887679

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA SOLUÇÃO DAP COMO TRATAMENTO PARA MELHORIA DA ABSORÇÃO EM AGREGADOS DA CONCRETO RECICLADO

Rossana Villa - Serna[a]; Víctor Galvis[a]; Cristina Valencia - Aguirre[a]; Ronaldo Tabares - Mira[a]; Esteban Camilo Correa-Gómez[a]; Santiago Usme - Guarín[a]; Diana Gómez - Cano[a]; Daniela González - Betancur[a]; Yhan Paul Arias[a]

[a] Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Medellín Colombia, sicc_med@unal.edu.co

RESUMO

As investigações associadas à utilização de agregados de concreto reciclados têm demonstrado que é possível melhorar o desempenho físico e mecânico quando estes são submetidos a tratamentos que permitem densificar a pasta de cimento aderida às partículas de agregado e reduzir a sua porosidade. Nesta pesquisa, uma solução de Fosfato Diamônio é utilizada na concentração de 0.5mol/L como tratamento de melhoria em agregados de concreto reciclado e a eficiência para selar os poros é avaliada por medidas de absorção usando uma técnica de balanço de luz halógena, da mesma forma que é determinado o número de vezes que uma solução aquosa de DAP pode ser utilizada, permitindo identificar a eficiência da circularidade dos processos. Os resultados demonstram que este tratamento melhora o desempenho mecânico de argamassas com quantidades baixas de material cimentante.

Palavras-chave: Fosfato de hidrogénio e diamónio (DAP), Agregado fino de betão reciclado (ARC finos), Economia circular, Agregado reciclado tratado.

1 INTRODUÇÃO

A nível mundial, o concreto é considerado o material mais utilizado no setor da construção, de acordo com Rui Jun Wang (Wang et al., 2020). Como afirmado por Chen Zhang (He et al., 2023), no processo de urbanização e industrialização das últimas décadas, um grande número de edifícios antigos está sendo demolido após o término de sua vida útil, gerando bilhões de toneladas de resíduos de construção; por exemplo, os resíduos de construção acumulados na China ultrapassaram 20 bilhões de toneladas em 2018. Devido ao seu alto volume, a geração de resíduos de concreto constitui uma questão técnica e ambiental que sugere reciclagem e reutilização. Atualmente, são evidenciados processos e estudos de trituração e moagem de resíduos de construção provenientes do uso de concreto, alcançando, por meio dessa transformação, a redução de tamanho para se converter em agregados reciclados de concreto ARC.

Algumas pesquisas, como a de (Mendoza et al., sem data) com sua pesquisa "Proposta de uso de agregado grosso reciclado como material sustentável para concreto", concentram-se em obter agregados grossos, enquanto outras, como a de (Bucio-Toledo & Flores-Sandoval, 2022), em seu artigo intitulado: "Agregados finos de concreto reciclado e sua influência no concreto não estrutural", conseguem reduzir os tamanhos até obter agregados finos semelhantes a areias. Em ambos os casos, o processo de cominuição induz fissuras nas partículas, e parte do cimento fica aderido à superfície delas, aumentando os valores de absorção, o que limita seu uso na fabricação de novos concretos (Le & Bui, 2020).

Para melhorar o desempenho dos ARC, foram identificados, de acordo com a literatura (Gómez-Cano et al., 2023; Mistri et al., 2020; Wang et al., 2020), dois tipos de mecanismos: fortalecimento da pasta aderida às partículas trituradas ou enfraquecimento da pasta. Em ambos os casos, busca-se reduzir a absorção, evidenciando melhor desempenho nas misturas ao utilizar menor quantidade de água. A escolha do tipo de tratamento depende da granulometria do ARC, sendo recomendado que para os ARC finos seja empregado um tratamento que fortaleça a microestrutura da pasta cimentícia aderida à sua superfície (Gómez-Cano et al., 2023).

Para este estudo, foram utilizados ARC finos, provenientes de cilindros de controle de qualidade dos concretos, e um tratamento de fortalecimento à base de fosfato diamônico (DAP). A escolha do DAP como tratamento de melhoria dos ARC finos deve-se ao fácil acesso ao material por seu uso na indústria agropecuária como fertilizante de solos. O tratamento consiste em imergir o ARC fino em uma solução de DAP com uma concentração de 0.5 mol/L, que na presença de $Ca(OH)_2$ existente na pasta cimentícia aderida ao ARC fino, gera fosfatos de cálcio, os quais selam os poros do ARC fino, reduzindo seus níveis de absorção (Gómez-Cano et al., 2023). Demonstrou-se em uma pesquisa anterior a eficácia deste tratamento na redução dos níveis de absorção, alcançando percentagens de diminuição da ordem de 32%. No entanto, nos estudos anteriores, não foi evidenciada a eficiência da solução para continuar tratando ARC finos, o que representa uma necessidade para identificar o uso ideal da solução de DAP e a reutilização da mesma.

O objetivo deste estudo é determinar a quantidade de vezes que uma mesma solução de DAP 0.5 mol/L pode ser reutilizada para tratar continuamente o ARC fino, mantendo a capacidade de reduzir a porcentagem de absorção. A eficiência da solução de 0.5 mol/L foi validada pela determinação da porcentagem de absorção dos ARC finos tratados e não tratados, para isso, foi utilizada a técnica de Balança de Luz Halógena (TBLH); essa técnica é fundamentada na aplicação de luz halógena sobre uma amostra de agregado, enquanto a perda de massa da amostra é medida ao longo do tempo. Essa técnica termogravimétrica permite identificar as diferentes taxas de evaporação da água nas partículas

e estimar a água retida como absorção nas partículas. O cálculo da porcentagem de absorção é realizado com um software projetado para esse fim (Arias et al., 2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIALES

2.1.1 AGREGADOS FINOS

Os agregados reciclados de concreto ARC (figura 1) foram obtidos através da trituração de cilindros de controlo de qualidade, concebidos para resistências f'c de 45 MPa. O material triturado foi peneirado e normalizado de acordo com o limite inferior da curva granulométrica de acordo com a norma ASTM C33 (equivalente à norma europeia EN 12620), figura 2. Este procedimento foi efetuado para obter proporções adequadas das diferentes granulometrias e para classificar o material como um ARC fino.

Figura 1 - Agregado de concreto Reciclado

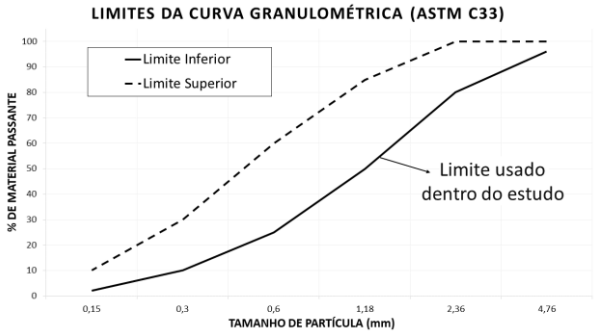


Figura 2 - Limites da curva de granulometria ASTM C33

Quadro 1 - Características do ARC fino

Matérias-primas	f'c *(fcd)*	Módulo de finura
Cilindros de betão	45 MPa	3.37

2.1.2 DIAMONIO DE FOSFATO (DAP)

O DAP utilizado apresenta-se sob a forma de grânulos (figura 3), com uma composição que inclui 18% de azoto amoniacal e 46% de fósforo solúvel em água. Para utilização como solução (figura 4), foi preparado com uma concentração de 0.5 moles de DAP por litro de água.

Figura 3 - Fosfato de hidrogénio-diamónio

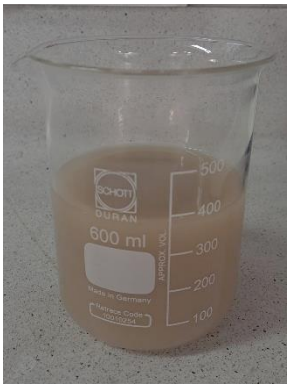


Figura 4 - Solução de DAP

Quadro 2 - Composição das DAP

Material	**Composição (massa)**	
	Nitrogénio amoniacal	*Fosfato*
Hidrogeno fosfato de diamónio (DAP) $((NH_4)_2\ HPO_4)$	18%	46%

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 TRATAMENTO DE ACTUALIZAÇÃO DO ARC FINO

Foram utilizados recipientes de polipropileno para armazenar, com uma relação de massa de 1:1, 200 g de ARC fina e solução de DAP 0.5 molar. A imersão dos ARC finos foi feita por 7 dias, ao final deste período, a solução foi separada dos ARC finos, em seguida os agregados foram lavados para remoção dos resíduos do tratamento. Para avaliar a eficiência do tratamento durante o período de 7 dias, foram utilizadas amostras em triplicado.

Finalmente, cada réplica foi colocada numa estufa de convecção a 80°C ± 5°C durante 24h ± 1h. A solução separada foi utilizada para mais 9 ciclos, em cada ciclo foi efectuada uma restituição da perda de solução devido à absorção nos ARC finos tratados. A figura 5 mostra todas as etapas do processo.

A técnica TBLH foi utilizada para determinar a percentagem de absorção dos ARC finos tratados de cada ciclo. Previamente, cada amostra foi imersa em água durante 24 horas para garantir a condição de saturação exigida pela técnica TBLH.

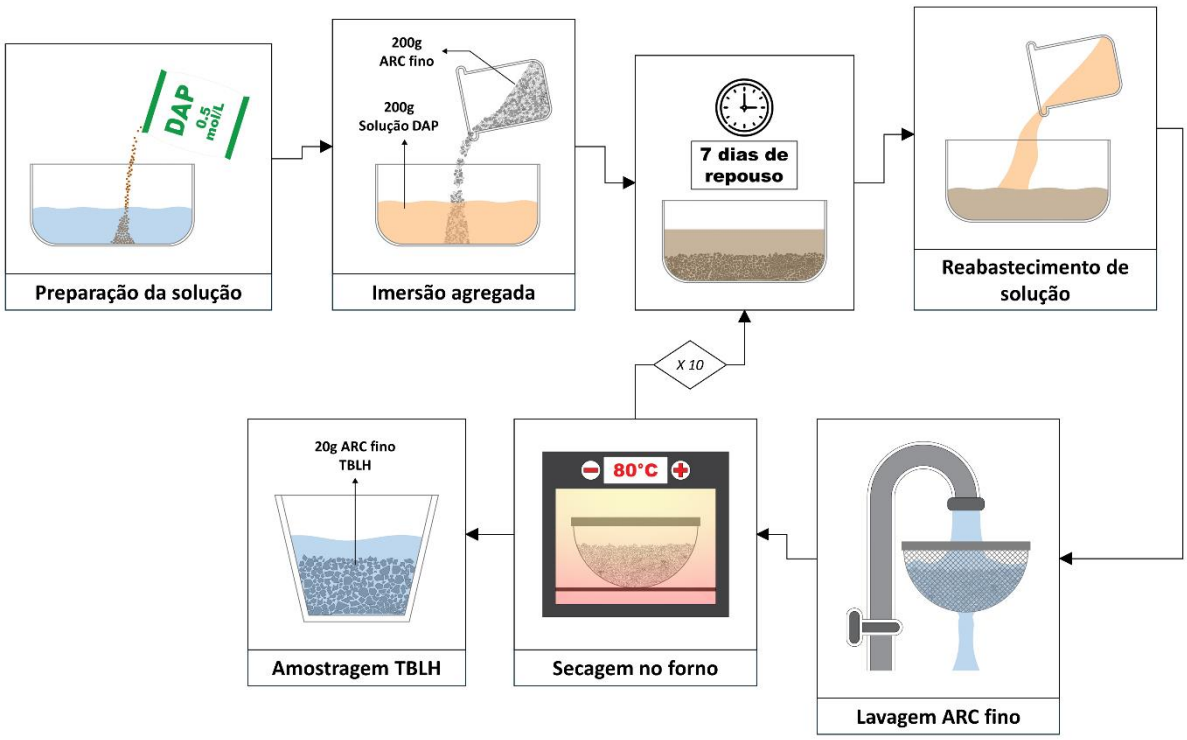


Figura 5 - Gráfico do processo de imersão

2.2.2 DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE ABSORÇÃO

A técnica TBLH acoplada ao software "Absorption Innovation" foi utilizada para identificar a percentagem de absorção de cada uma das amostras de ARC fina tratada, para isso, utilizou-se uma massa de 20g ± 1g de ARC fina tratada seca e imersa em água por um período de 24h ± 2h. Uma vez decorrido o tempo estabelecido, retirou-se o excesso de água e cada amostra foi submetida a uma análise termogravimétrica numa balança de halogéneo (referência Precisa XM 60HR)ver figura 6, este aquecimento com uma fonte de luz de halogéneo atinge 85°C ± 1°C, Este aquecimento com fonte de luz de halogéneo atinge 85°C ± 1°C, levando a amostra ao estado saturado de superfície seca (SSS), o que é determinante para a interpretação dos dados no software "Absorption Innovation", que determina, através de alterações no declive, os pontos de inflexão que correspondem à mudança da amostra do estado saturado para SSS. Uma vez que os métodos de absorção para agregados naturais são regidos por normas internacionais (ASTM C138/C138M). Para os ARC finos não existe um método normalizado para determinar a percentagem de absorção de um agregado de concreto reciclado, pelo que neste trabalho de investigação é utilizada a técnica termogravimétrica de luz halogénea (TBLH) para medir a percentagem de absorção; esta técnica baseia-se na aplicação de luz halogénea sobre uma amostra de agregado, enquanto se mede a perda de massa da amostra em função do tempo, esta medição é realizada com um software programado e concebido para o efeito (Arias et al., 2016)

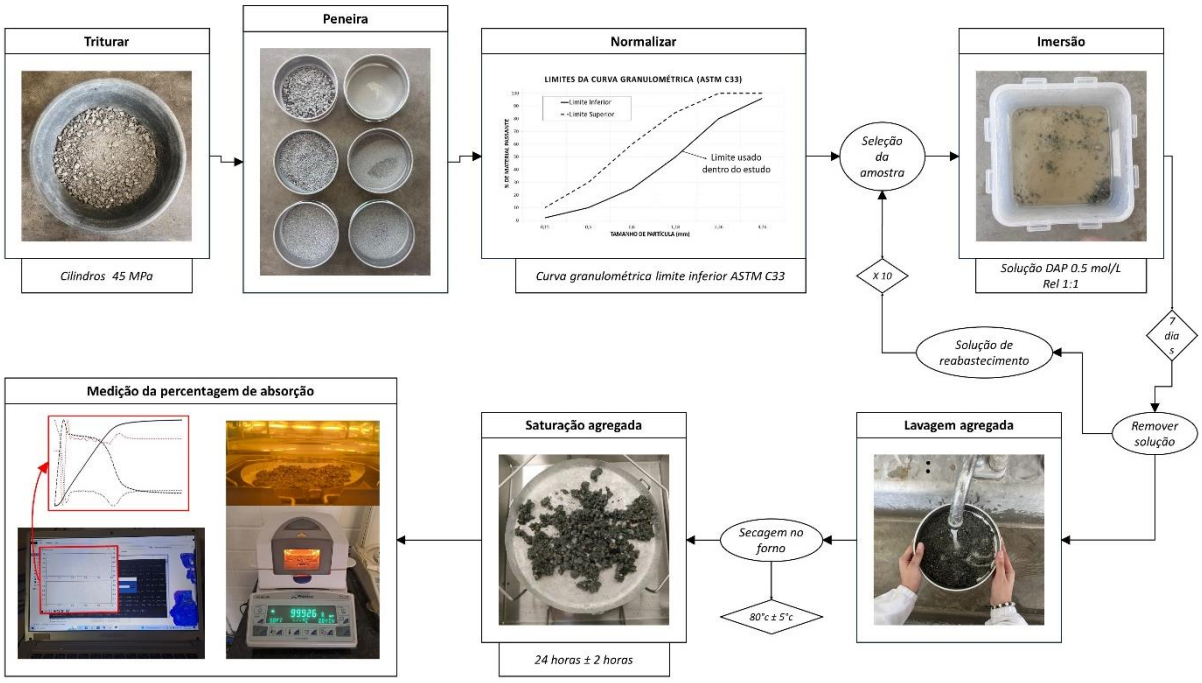


Figura 6 - Fluxograma de desempenho da solução

2.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os argamassas fabricados em uma proporção de 1:2, utilizados para moldar cubos de 50 mm x 50 mm de acordo com a norma ASTM C 305, mostraram uma resistência similar. Durante o estudo, foram realizadas essas misturas de argamassa correspondentes aos ciclos de imersão e os resultados da resistência à compressão foram avaliados após 28 dias. Apesar dos ciclos de reutilização e da perda da concentração original no tratamento com DAP, não foi registrada uma diferença significativa (figura 8) na resistência à compressão das argamassas fabricadas em uma proporção de 1:2. Esse comportamento pode ser atribuído à alta proporção de material cimentante na mistura, que desempenha um papel crucial na resistência final da argamassa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são relatados no Quadro 3. Além disso, a média dos resultados de absorção do ARC fino por ciclo de imersão é ilustrada na figura 7.

Quadro 3 - Taxas de absorção de ARC finos de acordo com o número de imersões

Imersão	Réplica	Nomenclatura	Absorção	Desvio
0	1	Zero-100-R1	3.82	0.03
	2	Zero-100-R2	3.82	
	3	Zero-100-R3	3.87	
1	1	Primeiro-100-R1	2.93	0.15
	2	Primeiro-100-R2	3.08	
	3	Primeiro-100-R3	3.24	
2	1	Segundo-100-R1	3.19	0.74
	2	Segundo-100-R2	3.95	
	3	Segundo-100-R3	2.47	
3	1	Terceiro-100-R1	2.79	0.21
	2	Terceiro-100-R2	3.17	
	3	Terceiro-100-R3	3.14	
4	1	Quarto-100-R1	3.15	0.45
	2	Quarto-100-R2	4.03	
	3	Quarto-100-R3	3.74	
5	1	Quinto-100-R1	3.91	0.48
	2	Quinto-100-R2	2.99	
	3	Quinto-100-R3	3.19	
6	1	Sexto-100-R1	3.14	0.30
	2	Sexto-100-R2	3.36	
	3	Sexto-100-R3	2.78	
7	1	Sétimo-100-R1	4.15	0.52
	2	Sétimo-100-R2	3.73	
	3	Sétimo-100-R3	3.11	
8	1	Oitavo-100-R1	3.84	0.33
	2	Oitavo-100-R2	3.37	
	3	Oitavo-100-R3	4.01	
9	1	Nono-100-R1	3.73	0.42
	2	Nono-100-R2	4.51	
	3	Nono-100-R3	3.85	
10	1	Décimo-100-R1	3.54	0.06
	2	Décimo-100-R2	3.58	
	3	Décimo-100-R3	3.46	

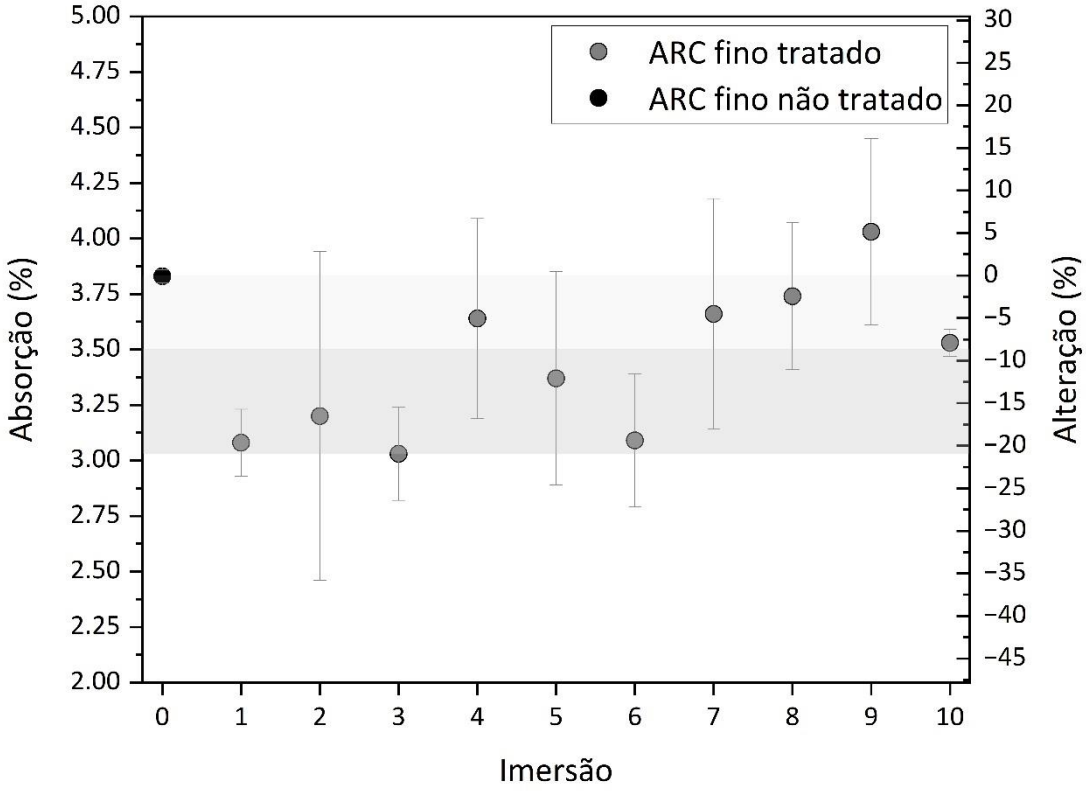


Figura 7 - Absorção de ARC fino por ciclo de imersão

A circularidade do processo reflecte-se na reutilização da solução de DAP, os dados indicam que a solução de tratamento pode ser utilizada três vezes de forma eficiente, a dispersão dos dados indica a variabilidade dos resultados obtidos em cada ciclo de tratamento com a solução de DAP. Neste contexto, uma dispersão aceitável dos valores sugere que o processo de tratamento é consistente e eficaz, os resultados parciais permanecem dentro de um intervalo adequado para um tratamento correto dos ARC finos, levado para um contexto industrial é viável uma vez que não gera excesso de resíduos e águas residuais durante a lavagem dos resíduos.

No entanto, é fundamental ter em conta que uma dispersão excessiva dos dados pode indicar incoerências ou problemas no processo de tratamento. Por exemplo, variações significativas nas percentagens de absorção podem sugerir que certas amostras não receberam tratamento adequado ou que houve erros no procedimento. Neste sentido, é necessária uma análise cuidadosa da dispersão dos dados para garantir a qualidade e a coerência dos resultados obtidos durante o estudo.

Entre os diferentes ciclos de imersão avaliados, até o sexto ciclo demonstrou ser eficiente. Até esse ponto, é demonstrada a possibilidade de reutilizar a solução de forma eficaz, reduzindo em até 20.9% a absorção dos RCA finos, o que representa 210 kg a menos de água em argamassas com RCA finos tratados, em comparação a uma tonelada métrica de água utilizada em argamassas com RCA não tratados, em relação à imersão zero. Isso implica uma redução no consumo desse recurso vital ao longo do processo industrial.

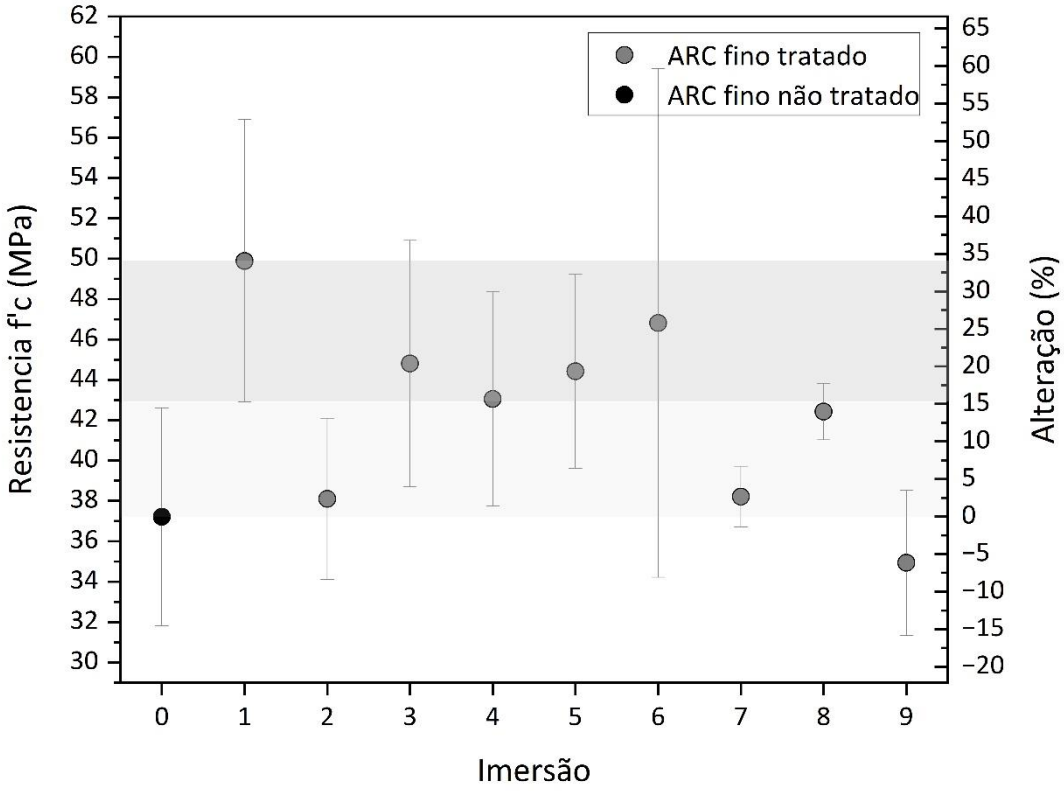


Figura 8 – Resistência mecânica

Na figura 8, fica evidente um melhor desempenho mecânico para os argamassas com RCA tratados com DAP, o que pode ser validado ao comparar a resistência mecânica (37.21 MPa) das argamassas feitas com RCA não tratados. O melhor desempenho mecânico foi apresentado com a primeira imersão, alcançando melhorias na ordem de 34.1%, essa tendência se manteve até a sexta imersão, onde se obteve uma alta variabilidade de acordo com o desvio padrão. Embora para a segunda imersão haja uma melhoria de 2.4%, seu valor médio (38.10 MPa) não está de acordo com a tendência apresentada nas 6 primeiras imersões, o que implica na necessidade de validar novamente esse resultado.

De modo geral, ao comparar as figuras 7 e 8, observa-se que as resistências mecânicas aumentaram de maneira inversamente proporcional ao percentual de absorção. Isso se explica pela menor demanda de água necessária para a elaboração de argamassas com RCA tratados com solução de DAP, o que permite utilizar uma menor quantidade de água, mantendo a relação a/c.

4. CONCLUSÕES

- Até o sexto ciclo de reutilização, a eficiência da solução de DAP é alcançada, evidenciando-se uma redução da absorção do RCA fino em 20.9% em comparação ao RCA não tratado.
- Os seis primeiros ciclos de imersão demonstram a capacidade de reutilizar a solução, o que permite diminuir os custos associados ao tratamento e preservar o rendimento e desempenho desse processo em um ambiente industrial. Essa validação apoia a viabilidade econômica e técnica do uso contínuo da solução de DAP para melhorar os RCA finos.

- A técnica de Balanço Termogravimétrico de Luz Halógena (TBLH) mostrou-se uma ferramenta eficiente e precisa para determinar o percentual de absorção do RCA fino. Além disso, em comparação com a norma ASTM C128, essa técnica requer menos tempo de execução e uma menor quantidade de agregados finos, otimizando recursos e reduzindo custos.
- • Há uma redução do consumo de água de 12.19% a 20.9% dentro das primeiras 6 imersões, o que garante um menor uso de água para a elaboração de misturas em obras de construção. Essa diminuição é mais pronunciada em misturas com proporções mais altas de agregado em relação ao material cimentício.
- Os argamassas de alta resistência fabricados com uma proporção de 1:2 demonstraram um desempenho ótimo em termos de resistência mecânica. Isso se deve ao fato de que a alta quantidade de material cimentício minimiza o efeito do RCA tratado sobre a resistência mecânica da argamassa. Consequentemente, as argamassas com essa proporção mantêm propriedades mecânicas ideais para uma argamassa de uso estrutural, demonstrando que o tratamento do agregado nos diferentes ciclos de imersão não compromete a eficácia da argamassa em aplicações que exigem alta resistência mecânica.

5. REFERÊNCIAS

Arias, Y. P., Payá, J., & Ochoa, J. C. (2016). Halogen light thermogravimetric technique for determining the retained water in fine aggregates used for concrete mixing design. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *123*(1), 127–134. https://doi.org/10.1007/s10973-015-4902-8

Bucio-Toledo, R. M., & Flores-Sandoval, D. A. (2022). Agregados finos de concreto reciclado y su influencia en concreto no estructural. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *10*(Especial7), 66–75. https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial7.9851

Gómez-Cano, D., Arias-Jaramillo, Y. P., Bernal-Correa, R., & Tobón, J. I. (2023). Carbonation Behavior of Mortar Made from Treated Recycled Aggregates: Influence of Diammonium Phosphate. *Materials*, *16*(3). https://doi.org/10.3390/ma16030980

He, H., Zhang, C., Yang, J., Li, M., Fu, W., Senetakis, K., Zhang, D., & Liu, S. (2023). Characterization of recycled concrete aggregate (RCA) particles for geotechnical engineering applications: Particle strength and interparticle contact behavior. *Construction and Building Materials*, *407*, 133532. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133532

Le, H. B., & Bui, Q. B. (2020). Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. Em *Construction and Building Materials* (Vol. 257). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522

Mendoza, A., Correa, M., & Pág, J. (sem data). *«PROPUESTA DE USO DEL AGREGADO GRUESO RECICLADO COMO UN MATERIAL SOSTENIBLE PARA EL CONCRETO, TRUJILLO-2021»*.

Mistri, A., Bhattacharyya, S. K., Dhami, N., Mukherjee, A., & Barai, S. V. (2020). A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, *233*, 117894. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117894

Wang, R., Yu, N., & Li, Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, *242*, 118164. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118164

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PAREDES VERDES PARA REUTILIZAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZENTAS

Marta Rodrigues Vitor[a], Ana Galvão[b], Cristina Matos Silva[b]

[a]IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, martarodriguesv@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ana.galvao@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A escassez de recursos hídricos emergiu como um desafio global de extrema importância, procurando-se desenvolver soluções sustentáveis e inovadoras na gestão de água. Assim, surgiu um foco na reutilização de águas cinzentas (AC) e na integração de Soluções Baseadas na Natureza em cidades, tal como Paredes Verdes (PVs).

Neste estudo foi avaliada a viabilidade de uma PV para o tratamento e reutilização de AC, instalada numa fachada do Instituto Superior Técnico, Lisboa, e alimentada por AC sintéticas e reais.

Foi selecionado como meio de enchimento uma mistura de fibra de coco e perlite e como vegetação as espécies *Hedera hélix, Fatsia japónica, Felicia amelloides e Hebe variegata*. O sistema foi alimentado 8h/dia, 3x ao dia ao longo de 4 meses (Novembro a Março). Foi avaliada a adaptabilidade da vegetação, medidos parâmetros de qualidade da água e, realizados balanços de massa diários para estimar a eficiência de remoção de matéria orgânica.

No geral, a eficiência de remoção de poluentes foi elevada, com uma remoção de 85% em CQO, 99.7% em SST e 92.5% em NH_4^+-N. Estes valores foram comparados com um módulo instalado na mesma parede sem existência de vegetação e os resultados foram consistentemente superiores na presença de plantas.

Palavras-chave: Parede verde, Águas cinzentas, Reutilização, Tratamento, Soluções Baseadas na Natureza

1 INTRODUÇÃO

A água sempre foi reconhecida como sendo a fonte da vida, sustentando e desenvolvendo comunidades ao longo da história da civilização humana. A escassez de recursos hídricos cresce agora diante de nós, estimando-se que meio bilião de pessoas enfrente este problema anualmente (Mekonnen e Hoekstra 2016).

Os efeitos da escassez de água são agora sentidos em todo o mundo, colocando pressão sobre ecossistemas, sociedades e economias. Para combater este desafio surge então a necessidade de desenvolver estratégias eficazes de gestão de água e procurar soluções inovadoras e fontes alternativas de forma a garantir a disponibilidade sustentável de recursos hídricos para as gerações futuras.

Diversas soluções têm então sido sugeridas, entre as quais o investimento em planos de tratamento e reutilização de águas residuais (AR), transformando este recurso outrora descartado, numa potencial fonte de água para diversos fins, como irrigação, processos industriais e até mesmo para uso potável. As AR provém de 3 fontes: domésticas, industriais e águas pluviais, sendo que as AR domésticas podem ainda divididas em 2 grupos: as águas cinzentas e as águas negras. As AC são também subdivididas de acordo com o seu nível de concentração de matéria orgânica, AC “low-load” que excluem águas da cozinha e lavandaria e AC “high-load” que incluem estas últimas.

Mundialmente, as AC representam 65% da produção total de águas residuais domésticas (Vuppaladadiyam et al. 2018) provenientes de pias de cozinha, lavatórios, chuveiros, banheiras e máquinas de lavar roupa e louça. Devido ao seu menor nível de contaminantes comparativamente a águas negras e facilidade de tratamento, as AC apresentam-se como uma melhor aposta para futura reutilização (Ghaly et al. 2021).

Simultaneamente, outras soluções têm vindo a ser sugeridas. Foram traçadas pela Comissão Europeia diversas diretrizes para a integração de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) em cidades, com o objetivo de abordar desafios sociais, fazendo uma gestão eficiente de recursos e proporcionando simultaneamente benefícios económicos, sociais e ambientais. Estas soluções consistem em técnicas que tentam simular processos naturais em cenários urbanos, como é o caso dos sistemas de tratamento com plantas, entre os quais se destacam as paredes verdes (PVs).

A aplicação de PVs oferece inúmeras vantagens para além de acrescentar valor estético aos ambientes urbanos. Estudos recentes provaram a melhoria da eficiência térmica dos edifícios com recurso a PVs, reduzindo a necessidade de consumo elétrico para aclimatização e, ajudaram na diminuição de temperatura nas zonas envolventes (Palermo e Turco 2020). Também provaram uma redução nas taxas de escoamento de águas (Addo-Bankas et al. 2021), na mitigação da poluição sonora e na melhoria do bem-estar mental dos utilizadores. Em relação a tratamento de águas, estes sistemas demonstraram ser eficientes na remoção de diversos poluentes presentes nas águas, o que as torna uma boa alternativa aos tratamentos convencionais.

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade de uma PV modular, instalada na fachada externa de um edifício educacional do Instituto Superior Técnico (Lisboa, Portugal), para o tratamento e reutilização de AC e, cuja fonte consistiu numa mistura de AC sintéticas e AC reais provenientes de uma casa de banho existente no edifício. Para tal, alguns objetivos intermédios foram delineados, tais como a avaliação da adaptabilidade da vegetação ao cenário experimental, a medição de parâmetros de qualidade da água (pH, Temperatura, SST, CQO, OD, ORP, NH_4^+-N e NO_3-N) e a realização de balanços de massa diários para estimar a eficiência de remoção de matéria orgânica.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PAREDE VERDE

2.1.1 Sistema de suporte e irrigação

O sistema de suporte utilizado na construção da PV em estudo foi uma combinação de módulos concebidos para agricultura vertical pela empresa Minigarden, LDA. No total foram colocados 100 potes com a distribuição apresentada na Figura 1.

Figura 1- Distribuição por módulos.

Cada módulo era composto por 3x10 potes, com exceção da linha 7 com apenas 1x10 potes. As denominações escolhidas para os módulos foram "α", " β", " γ" e "δ", como se observa na Figura 1.

Cada nível horizontal continha aberturas na base para possibilitar a drenagem entre níveis, tendo a base do módulo também uma abertura para a introdução de tubos de saída de água conectados a baldes de recolha no exterior, demonstrado na Figura 2. Cada pote foi separado verticalmente por placas de PVC coladas com silicone para que a drenagem se efetuasse apenas na vertical.

Figura 2- Tubagem e baldes de recolha exteriores.

O sistema de irrigação era composto por 2 secções, uma de AC e outra de água da rede. A secção de AC foi construída através de uma ligação a uma casa de banho masculina existente no primeiro andar do edifício, controlada por uma válvula elétrica. Esta ligação recolhia apenas as águas provenientes dos lavatórios e dos serviços de limpeza. A água recolhida era armazenada num reservatório de 80L e seguidamente bombeada por uma bomba peristáltica a 45 impulsos/min, o que permitia um caudal de 1.3L/h por linha com uma carga hidráulica de 0.052m/h e um caudal global de 5.2L/h.

O sistema de ligação do reservatório à parede era composto por tubos de plástico com diâmetro de 6mm e um gotejador para cada linha, o que permitiria a irrigação por gotejamento. O reservatório possuía uma tampa no topo que era utilizada para facilitar a inserção das AC sintéticas, uma torneira manual no fundo caso fosse necessário retirar água do reservatório e um sistema de tubos e válvulas para drenagem de emergência. A Figura 3 mostra a configuração do sistema de recolha.

Figura 3- Sistema de recolha e bombagem de AC e água da rede.

O horário de alimentação foi definido e automatizado num total de 8h/dia ao longo de 3 períodos, 9h-12h, 13-15h e 16h-19h. A secção em funcionamento com água da rede apresentava um funcionamento semelhante, estando ligada a uma fonte de água da torneira. Esta secção estava apenas ligada aos módulos "α" e " β"que não foram monitorizados neste estudo.

2.1.2 Vegetação e Meio de Enchimento

O tipo de vegetação instalada variou entre módulos. O módulo "α" consistiu numa mistura de diferentes plantas autóctones, o módulo "δ" numa mistura de plantas habitualmente utilizadas em paredes verdes convencionais e o módulo "β" numa combinação das plantas utilizadas nos dois módulos anteriores. As espécies de plantas instaladas no módulo "δ", em estudo, e respetivas quantidades encontram-se detalhadas no Quadro 1.

Quadro 1- Distribuição de vegetação no módulo "δ".

Espécie	Nº exemplares
Hedera helix	9
Fatsia japonica	8
Felicia amelloides	5
Hebe variegata	3

O meio de enchimento utilizado no estudo foi uma mistura 1:1 de fibra de coco e perlite, escolhido com base em testes de porosidade anteriores que garantiram que o tempo de retenção das AC no interior da parede era suficientemente longo para tratar a água. Neste estudo foram realizados testes hidráulicos e de porosidade ao meio, obtendo resultados de porosidade total de 52% e porosidade relativa de 34%.

2.2 AMOSTRAGEM

Foram recolhidos, consistentemente às 10:00h, três tipos de amostras em cada dia de recolha: a água de entrada, a água de saída do módulo "γ", referido em diante como "módulo de controlo", e a água

de saída do módulo "δ", referido em diante como "módulo das plantas". As amostras de entrada foram recolhidas todas as segundas e quintas-feiras diretamente sob os gotejadores e as amostras de saída foram recolhidas todas as terças e sextas-feiras à saída dos tubos de drenagem instalados na parte inferior dos módulos. As amostras foram depois transferidas para um laboratório para análise de parâmetros de qualidade.

Foram também realizados balanços de massas de água de forma a estimar a evapotranspiração e a eficiência da remoção de CQO pela PV. Para tal, o volume de água recolhida nos baldes de saída foi monitorizado de 2 em 2 semanas, de forma estimar o fluxo médio de água em cada módulo ao longo de 24h.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ADAPTABILIDADE DA VEGETAÇÃO

Todas as espécies apresentaram uma adaptação relativamente boa ao sistema, apesar de algumas alterações visuais na coloração de certas folhas. As espécies onde este fenómeno de amarelecimento e avermelhamento foi mais acentuado foram as *Fatsia japónica e Hedera helix,* representada na Figura 4.

Figura 4- Descoloração na folhagem da espécie *Hedera helix*.

Verificou-se que o fenómeno de descoloração se intensificou nos períodos de maior calor e horas de exposição solar, intensificados pela orientação a sul da PV principalmente nos meses iniciais do estudo. Este facto interfere diretamente no processo de fotossíntese das plantas, podendo levar a stress fotossintético e à morte celular. Também se verificou um aumento de temperatura dos módulos, que devido à sua coloração preta retêm quantidades muito elevadas de calor.

Relativamente ao crescimento das plantas, a *espécie Felicia amelloides* apresentou a maior evolução em termos de tamanho, enquanto a *Fatsia japonica* apresentou sinais de queda de folhas.

3.2 ANÁLISE DE QUALIDADE DA ÁGUA

3.2.1 Parâmetros imediatos

Uma seleção de parâmetros foi medida imediatamente após a recolha de amostras, sendo estes: Temperatura, Oxigénio Dissolvido (OD), pH e Potencial de Oxidação-Redução (ORP). O Quadro 2 replica os valores médios obtidos para cada parâmetro.

Quadro 2- Média de Temperatura, OD, pH, ORP nos módulos de entrada, plantas e controlo.

Amostra	Temperatura (°C)	OD (%)	pH	ORP (mV)
Entrada	16.7 ± 2.6	6.98 ± 2.17	6.95 ± 0.6	124.6 ± 24.4
Plantas	16.8 ± 2.4	9.36 ± 0.7	7.05 ± 0.69	133.7 ± 26.3
Controlo	16.8 ± 2.3	9.54 ± 0.58	7.21 ± 0.65	130.1 ± 22.4

A temperatura do ar apresentou flutuações ao longo do tempo, congruentes com as alterações sazonais. Verificou-se um ligeiro aumento de temperatura entre amostras de entrada e saída, porém não significativo.

O OD presente na água exibiu valores mais baixos na entrada do que em ambas as saídas dos módulos. Os seus valores foram também mais dispersos, variando entre 2% e 11%, enquanto os de saída variaram entre 8% e 11%. Uma possível explicação para as variações será a água recolhida na quinta-feira ter sido produzida e armazenada desde o dia anterior, levando ao consumo do oxigénio pelas bactérias do recipiente.

A diferença entre o valor de OD no módulo das plantas deve-se à libertação de oxigénio através dos processos de fotossíntese das plantas. O valor, também elevado, no módulo de controlo poderá ser resultado de processos de aeração à saída da PV ou pela queda de folhas nestes vasos.

Não existiram alterações significativas de pH entre os módulos, rondando o ph 7 em todos os módulos.

Os valores de ORP analisados demonstraram ser mais elevados à saída, especialmente no módulo das plantas (133.7 ± 22.4 mV). Este potencial permite o fornecimento de oxigénio dissolvido suficiente para o crescimento saudável das plantas e evitar condições anaeróbicas.

3.2.2 Eficiência de remoção de Carência Química de Oxigénio (CQO)

Para o cálculo da eficiência de remoção de CQO foi efetuada uma análise estatística. O Quadro 3, abaixo, representa os resultados obtidos.

Quadro 3-Estatísticas de CQO nos módulos de entrada, plantas e controlo.

Amostra	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)	Ef. Remoção média (%)
Entrada	206.3	404.3	315.1 ± 41.6	-
Plantas	17.5	85	47.8 ± 16	85
Controlo	13.3	185.4	49.5 ± 29.9	84

Apesar de ambos os módulos exibirem uma enorme diminuição da CQO, o módulo das plantas apresentou um melhor desempenho global, com uma eficiência média de remoção de 85%.

Verificou-se também um ligeiro aumento da remoção de CQO ao longo do estudo, que poderá ser explicado pelo crescimento de bactérias ao longo do tempo e pela decomposição da matéria orgânica, nomeadamente folhas, que caiu nos módulos.

Adicionalmente, através da realização de balanços de massa para os módulos em estudo, foram obtidas as seguintes eficiências de remoção de CQO, presentes no Quadro 4.

Quadro 4- Remoção de CQO considerando evapotranspiração do sistema.

Módulo	Fluxo Evapotranspiração (L/dia)	Concentração média de CQO (mg/L)	Eficiência de Remoção
Plantas	4.3	47.8	91.6
Controlo	2.6	49.5	91.3

O fluxo de evapotranspiração no módulo de controlo é relativamente menor do que o fluxo no módulo de plantas, devido à transpiração efetuada pelas plantas bem como pelo meio de enchimento. O nível de maturidade das plantas, a percentagem de cobertura do solo e o vento também podem aumentar os níveis de evapotranspiração.

Embora o módulo de controlo apresente uma concentração média de CQO mais elevada, os resultados da eficiência final de remoção de CQO são teoricamente os mesmos, 91%. Estes resultados estão diretamente relacionados com as taxas de evapotranspiração mais elevadas das plantas pois estas têm uma maior capacidade de oxidação de matéria orgânica, equilibrando os valores de remoção de CQO.

3.2.3 NH_4^+-N e NO_{3-}-N

Para avaliar o teor de nitratos foram medidas as concentrações de NO_{3-}-N e NH_4^+-N nas amostras. O Quadro 5 mostra a análise estatística para os diferentes módulos.

Quadro 5- Estatísticas de NO_{3-}-N e NH_4^+-N no sistema.

	Amostra	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)	Ef. Remoção média (%)
NO_{3-}-N	Entrada	0.5	2.7	1.70 ± 0.56	-
	Plantas	0	1.7	0.88 ± 0.47	49
	Controlo	0	1.4	0.43 ± 0.42	76.4
NH_4^+-N	Entrada	1.63	3.28	2.38 ± 0.44	-
	Plantas	0	0.55	0.18 ± 0.15	92.5
	Controlo	0	1.35	0.44 ± 0.34	82

Não se verificou homogeneidade nos resultados da análise de NO_{3-}-N, mostrando a existência de valores mais elevados à entrada (1.70 mg/L), do que à saída, quer no módulo das plantas como de controlo (0.88 mg/L e 0.43 mg/L). O processo de conversão da amónia (NH_4^+) presente no solo em nitrato (NO_{3-}), nitrificação, é demonstrado pela maior concentração de NO_{3-} no módulo com plantas.

A análise de NH_4^+-N apresentou resultados mais uniformes e uma maior eficiência da sua remoção no módulo com plantas pois com a decomposição de matéria orgânica azoto ocorre a fixação de NH_4^+ por bactérias fixadoras de azoto. As eficiências de remoção foram de 92,5% e 82%, respetivamente.

3.2.4 Sólidos Suspensos Totais (SST)

A concentração de SST foi significativamente inferior em ambas as amostragens de saída, com eficiências de 99.7% no módulo das plantas e 95.2% no módulo de controlo, observadas no **Error! Not a valid bookmark self-reference.**. O melhor desempenho do módulo das plantas deve-se à capacidade das plantas em alterar as velocidades de escoamento e às suas capacidades de filtração e oxidação.

Quadro 6- Estatísticas de SST no sistema.

Amostra	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)	Ef. Remoção média (%)
Entrada	38	94	64.88 ± 17.66	-
Plantas	0	6	0.25 ± 1.1	99.7
Controlo	0	10	3 ± 2.54	95.2

4 CONCLUSÕES

Para avaliar a viabilidade de paredes verdes para o tratamento de águas residuais, foi necessário analisar vários parâmetros de qualidade bem como a adaptabilidade da vegetação ao sistema.

Em geral, os resultados demonstraram ser positivos com eficiências de remoção de poluentes elevada. Verificaram-se resultados superiores a 85% na remoção de CQO pelo sistema da PV remoções praticamente totais de SST (99.7%) e uma remoção de NH_4^+-N de 92.5%.

Outros parâmetros, como DO, ORP ou pH também demonstraram promover um meio favorável a proliferação de plantas e organismos, dando um parecer favorável à continuidade do sistema da PV.

Com estes resultados promissores, e uma continuação futura aprofundada de estudos na área, prevê-se a possibilidade de reutilização de AC para diversos fins. Sugere-se a aplicação de estudos semelhantes em condições atmosféricas diferentes de forma a avaliar a adaptabilidade da vegetação e o seu efeito no tratamento das AC.

REFERÊNCIAS

Addo-Bankas, O., Zhao, Y., Vymazal, J., Yuan, Y., Fu, J., & Wei, T. (2021). Green walls: A form of constructed wetland in green buildings. Ecological Engineering, 169, 106321–106321. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106321

Ghaly, A., Mahmoud, N., Ibrahim, M. M., Mostafa, E., Abdelrahman, E., Emam, R., Kassem, M. A., H. M, & Hatem. (2021). Greywater Sources, Characteristics, Utilization and Management Guidelines: a review. Advance in Environmental Waste Management & Recycling; https://www.semanticscholar.org/paper/Greywater-Sources%2C-Characteristics%2C-Utilization-and-Ghaly-Mahmoud/3e62c4cf7ba4bd1e9d5851fd6ca36d834724965d

Mesfin M. Mekonnen, Arjen Y. Hoekstra. Four billion people facing severe water scarcity. Sci. Adv.2,e1500323 (2016). DOI:10.1126/sciadv.1500323

Palermo, S. A., & Turco, M. (2020). Green Wall systems: where do we stand? 410(1), 012013–012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012013

Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., & Zhao, M. (2018). A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 18(1), 77–99. https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REUTILIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO: MAIS VALIAS E PROTOCOLO DE ENSAIOS

Pedro Frazão Pedroso[a]; José Dinis Silvestre[b]; António Aguiar Costa[b]

[a]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, pedroefpedroso@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

RESUMO

O presente artigo aborda a importância da Economia Circular (EC) no sector da arquitectura, engenharia e construção (AEC), destacando seu papel na redução de impactos ambientais causados pela extracção de materiais e geração de resíduos. O sector AEC, responsável por cerca de 35% dos resíduos na Europa, enfrenta desafios significativos em termos de sustentabilidade. Para mitigar esses impactes, a Comissão Europeia estabeleceu metas ambiciosas no European Green Deal, visando uma União Europeia neutra em carbono até 2050.

Uma solução apresentada é a implementação de auditorias pré-demolição (ApD), que ajudam a identificar materiais recuperáveis antes da demolição de edifícios, promovendo a desconstrução em vez da demolição. O artigo explora a possibilidade de usar as ApD para avaliar reutilizar elementos em betão armado, investigando como ensaios correntes poderão contribuir para um protocolo que possa caracterizar suficientemente os elementos. São explorados ensaios de compressão do betão, tensão do aço, esclerómetro, ultra-sons e detecção de aço como potenciais respostas para um protocolo, que é apresentado.

Apresenta-se um trabalho conceptual, baseado em ensaios correntes, bem como se apresentam problemas desta adaptação e potenciais caminhos de investigação futura que possa trazer, eventualmente, a desconstrução de elementos de betão, para o mercado.

Palavras-chave: circularidade, auditorias pre-demolição, sustentabilidade, ensaios, betão

1 INTRODUÇÃO

O sector da construção é um dos principais contribuidores para os impactes ambientais, sendo responsável por, aproximadamente, 50% de todos os materiais extraídos e, na Europa, por cerca de 35% dos resíduos gerados (European Commission, 2024). Só a produção de cimento é responsável por 6% (Fabian Apel *et al.*, 2023) a 9% (Monteiro, Miller and Horvath, 2017) do total de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), com cerca de 40% destas devido à queima de combustíveis fósseis e, o restante, pelas reacções químicas inerentes ao processo de calcinação do clínquer (Sebastian Reiter, 2022). Para além destes factores, 40% das emissões relativas à produção de energia são devidas aos edifícios, sendo 15% destes 40% atribuíveis à construção de edifícios novos.

O sector da construção é, também, um dos maiores sectores no que ao desenvolvimento económico diz respeito, sendo responsável por cerca de 5.5% do PIB europeu (Eurostat, 2022), 4.6% do valor bruto acrescentado em Portugal (*Valor Bruto Acrescentado - Portugal*, 2022) e 6.9% do emprego, também em Portugal (IMPIC, 2023).

Para mitigar os altos impactes ambientais, a Comissão Europeia (CE) desenvolveu objectivos em termos de emissões, determinados no *European Green Deal* (European Commission, 2019) em que, essencialmente, se pretende alcançar uma União Europeia (UE) *net-zero* em 2050.

Portanto, existe uma necessidade do sector de adaptar aos novos desafios sem deixar de responder à sociedade, no que à sustentabilidade económica e social diz respeito, através do contributo para a riqueza, emprego e habitação que o sector gera.

1.1 CIRCULARIDADE COMO SOLUÇÃO

Tendo sido estabelecido que o sector da construção tem um papel fundamental para o ambiente, economia e sociedade, sendo, ao mesmo tempo, responsável por uma fatia considerável dos impactes ambientais totais gerados, há que gerar soluções que possam minimizar impactes e manter o valor acrescentado do sector.

A Economia Circular (EC) ambiciona ter esse papel, gerando novos empregos e criando riqueza (Pedroso, Silvestre and Costa, 2024), mitigando, ao mesmo tempo, impactes ambientais relacionados com a depleção de recursos, volume em aterro e, eventualmente, emissões devidas à transformação de materiais.

Os princípios de EC têm vindo a ser desenvolvidos, acima de tudo, para a concepção de novos edifícios, em metodologias como o *Design for Disassembly* (DfD) (Durmisevic and Yeang, 2009) ou na preferência por modularização. Contudo, existe um parque de edifícios extenso, a precisar de intervenção ou demolição para construção de novo. Para estes casos de fim de vida (FdV) a ideia de EC é mais complexa de ser aplicada, exigindo aproximações à medida para cada edifício.

1.2 AUDITORIAS PRÉ-DEMOLIÇÃO

A necessidade de trazer a EC para o ambiente construído tem sido uma preocupação de CE, com a definição de linhas guia para o desenvolvimento de auditorias pré-demolição (ApD) (Wahlström *et al.*, 2019), que se apresentam como uma metodologia que pretende normalizar o processo de levantamento de resíduos e materiais num edifício, antes da sua demolição e, assim, começar a pensar numa lógica de desconstrução ao invés de demolição.

As ApD têm já transcrição das linhas guia europeias para versões de alguns países, sendo já obrigatórias antes da demolição de um edifício em alguns países, como o Luxemburgo (Government of

Luxembourg, 2012, 2020); em Portugal, o LNEC transcreveu as linhas guia europeias para a realidade portuguesa, através do "Guia português para auditorias pré-demolição" (Milagre Martins *et al.*, 2023). Tal evidencia uma preocupação para com o FdV dos edifícios, principalmente com os resíduos que são enviados para aterro.

Uma função essencial das ApD será, para além da contabilização dos resíduos gerados e do planeamento de como os gerir, a identificação de materiais recuperáveis para reutilização. Esta será uma função central das ApD, tornando-as como um dos principais *enablers* da EC no sector da arquitectura, engenharia e construção (AEC). Contudo, a identificação de materiais é complexa, principalmente elementos estruturais, sendo necessário o desenvolvimento de metodologias que possam aqui apoiar e informar.

1.3 CIRCULARIDADE NAS ESTRUTURAS

Existe, actualmente, um forte investimento em investigação e desenvolvimento de betões com utilização de agregado reciclado de betão (ARB) em substituição de agregados naturais. O LNEC enquanto autoridade no sector AEC desenvolveu a especificação E 471 (LNEC, 2009) que determina a percentagem máxima de incorporação de ARB em até 25% para uma classe máxima C40/50 e somente para algumas classes de exposição.

No entanto, a utilização de ARB tem contrapartidas que influenciam negativamente os impactes ambientais, como é a necessidade de utilização de uma maior quantidade de cimento face a betões com agregados naturais e a energia incorporada superior devido à demolição, separação, transporte e britagem necessários à utilização (Devènes *et al.*, 2022).

Portanto, soluções que possam contribuir para a diminuição da depleção de recursos e de resíduos de construção e demolição (RCD) enviados para aterro, como é o caso da utilização de ARB, são extremamente necessárias, mas, soluções que possam ao mesmo tempo diminuir impactes ambientais trazem mais-valias.

Implementando as ideias de EC, um meio de conseguir a reutilização, poderá ser através da desconstrução por corte da estrutura em elementos (vigas, pilares, etc.), mantendo-se o elemento para reutilização como um todo, eliminando-se ou minimizando a transformação.

No entanto, os elementos estruturais têm requisitos particulares e exigentes pela sua importância do ponto de vista da segurança. Pelo que, para uma reutilização dos elementos para funções estruturais, é necessário garantir que estes elementos têm capacidade para tal.

A viabilidade de recuperação de elementos estruturais para reutilização tem sido estudada com resultados positivos, nomeadamente através do trabalho dos projectos Re:Crete (Devènes *et al.*, 2022), Recreate (ReCreate, 2023) e em algum trabalho comercial, como o desenvolvido na Nova Zelândia no projecto *Whitaker Place* (Greenway NZ, 2023). Tudo exemplos de recuperação de elementos estruturais de betão armado desconstruídos de edifícios em fim de vida para reutilização.

Este artigo pretende explorar ensaios correntes, usados em engenharia civil como forma de avaliar estruturas de edifícios, por forma a definir um possível protocolo que possa ser usado em auxílio das ApD para identificação e caracterização de elementos recuperáveis.

2 ENSAIOS

Como se pretende a reutilização dos elementos, os ensaios a considerar devem ser o menos destrutivos possível sendo, portanto, necessária uma aproximação em que se atinja um compromisso entre ensaios destrutivos localizados que validem o projecto e calibrem outros ensaios não-destrutivos.

Assume-se que, para o estudo da recuperação de elementos de betão armado betonados *in-situ*, são condições essenciais: existir um projecto de estabilidade e que a estrutura siga o EC2 (IPQ, 2010), o que garantirá aproximações de cálculo e materiais com um nível de normalização verificável e validável.

2.1 ENSAIOS GLOBAIS

Foram identificados dois ensaios que se consideram como essenciais para a validação dos materiais presentes no betão armado: (i) compressão de carotes; (ii) tensão do aço. Estes ensaios fazem sentido numa óptica de avaliação de toda a estrutura e validação do projecto, daí a denominação de globais.

2.1.1 Compressão de carotes

O ensaio de compressão de carotes é, muitas vezes, utilizado em reabilitação de edifícios com o objectivo de se determinar a classe de resistência do betão presente numa estrutura. Portanto, é um ensaio extremamente importante para validar o projecto e verificar se o betão se mantém em boas condições de resistência e é o que está dimensionado em projecto. O principal objectivo para a sua utilização neste contexto prende-se com a determinação do valor de resistência característico do betão em estudo para a validação do projecto.

Como um dos principais ensaios ao betão, a compressão de carotes (ou compressão de elementos de betão), tem vários documentos normativos que normalizam os métodos e procedimentos de ensaio: (i) EN 12390-1:2022 (BSI, 2012a); (ii) EN 12390-3:2021 (IPQ, 2009); (iii) EN 12390-4:2019 (BSI, 2000); (iv) EN 206:2013+A2:2021 (BSI, 2014).

Contudo, na compressão de carotes à rotura, não é determinado o valor característico da resistência do betão, este valor pode ser calculado com base no procedimento definido pela *Concrete Society* citada por Vítor Cóias (Vítor Cóias, 2009) que, tendo em conta a direcção da carotagem, relação altura/diâmetro do provete, presença de armaduras e relação da resistência *in situ* e em cubos, permite deduzir a resistência característica com base na rotura.

Quanto ao número de carotes a realizar, e visto não haver uma metodologia de amostragem definida, propõe-se a aproximação definida na norma NP EN 206 que define uma metodologia de amostragem para betão fresco. A norma define um mínimo de 3 amostras a serem efectuadas para qualquer eventualidade, ao que se acrescenta mais uma amostra por cada 150 m^3 de betão acima de 150 m^3. Portanto, à falta de uma metodologia estabelecida, assume-se esta regra de amostragem, cabendo ao auditor fazer um cálculo volumétrico da estrutura (estudo prévio) e, com base nesse cálculo determinar o número de provetes a serem feitos.

2.1.2 Ensaio de tracção do aço

A definição da tracção do aço é, em paralelo com o betão, extremamente importante de determinar. No entanto, em contraste com o betão, o aço tem métodos de produção muito mais controlados e definidos que tornam esta validação dos materiais de projecto no edifício muito mais fácil e segura. O principal objectivo destes ensaios é para a validação da classe de resistência do aço e se em obra foi, efectivamente, usado o aço de projecto.

A primeira validação deve acontecer pela observação do padrão das nervuras dos varões. Este padrão é normalizado (LNEC, 2020) e deverá ser usado para uma primeira verificação que não elimina a realização dos ensaios de tracção em provetes retirados da estrutura.

O ensaio de tracção, à semelhança do ensaio de compressão do betão, é também ele normalizado em várias normas em vigor: (i) NP EN ISO 6892-1:2022 (ISO, 2009); (ii) NP EN ISO 15630-1:2020 (BSI, 2010).

Para este tipo de ensaio, e dado que o aço tem um controlo de qualidade muito superior ao do betão, o número de amostras para a validação de projecto deverá ser de três, salvo situações particulares onde possam existir dúvidas quanto ao aço usado ou a obra tenha sido desenvolvida num período tão grande que se duvide da homogeneidade de materiais usados.

2.2 ENSAIOS AOS ELEMENTOS

Estes ensaios têm objectivos distintos dos ensaios globais. Os primeiros visam validar os materiais de projecto e identificar heterogeneidades. Aqui visa-se validar elemento a elemento com uma bateria de ensaios que permita avaliar e validar os elementos. Exploram-se aqui os ensaios: (i) esclerómetro; (ii) ultra-sons e (iii) detecção de armaduras.

2.2.1 Esclerómetro

O ensaio esclerométrico pretende ser uma forma fácil, rápida e não destrutiva de determinar a resistência do betão. Permite avaliar a resistência superficial do betão numa profundidade que pode ir até aos 5 cm. Ao ser não destrutivo e fácil de aplicar, permite que uma bateria de ensaios possa ser feita a cada elemento, podendo-se assim identificar potenciais áreas menos resistentes ou com problemas e concluir quanto à homogeneidade do elemento e determinação de uma resistência mínima (Vítor Cóias, 2009), sendo estes os principais objectivos.

O ensaio caracteriza-se por ter uma massa que embate na superfície que se pretende avaliar a resistência, sendo medido o ricochete que se traduz num índice esclerométrico, que relaciona com a resistência superficial do material em estudo. Consideram-se aqui esclerómetros do tipo *Schmidt*.

Este é também um ensaio comum, estando normalizado na NP EN 12504-2 (BSI, 2012b). De acordo com a norma referida, o número de ensaios pode variar, devendo ser realizado numa rede 25x25 a 50x50 mm definidos pela norma.

Este ensaio acarreta potenciais problemas pela superficialidade, sendo susceptível de ser influenciado por problemas de degradação superficial, humidade, carbonatação, falta de cuidado na preparação da superfície entre outros que influenciam a leitura e resultados obtidos. Ao se realizarem vários ensaios em grelha, pretende-se minimizar estes problemas. Uma calibração comparativa a compressão de carotes tem o objectivo de validar os ensaios e minimizar problemas superficiais.

2.3 ULTRA-SONS

Com o ensaio de ultra-sons é possível determinar a velocidade de propagação de impulsos ultrasónicos entre dois pontos e assim caracterizar o elemento em estudo. Este ensaio é normalizado e segue em duas normas: (i) NP EN 13791:2019 (IPQ, 2008); (ii) NP EN 12504-4:2021 (BSI, 2004).

O ensaio consiste em usar um equipamento de ultra-sons que tem dois transdutores que, conforme observável na Figura 1, podem ser aplicados de formas distintas.

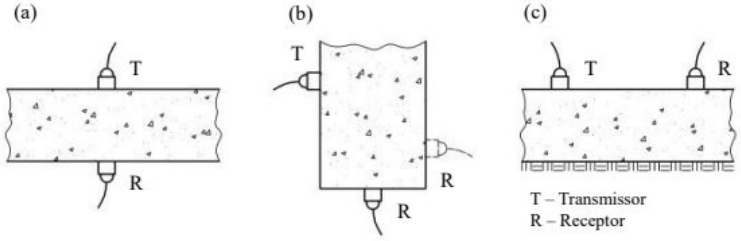


Figura 1 - Posições relativas dos transdutores em ensaios com ultra-sons: (a) método directo; (b) método semi-directo; (c) método indirecto (adaptado de Vítor Cóias (2009))

O método directo é o que apresenta melhores resultados, obtendo-se resultados interpretáveis com qualquer dos métodos escolhidos ou possíveis de serem utilizados.

O principal objectivo de utilização deste ensaio é o de detectar anomalias físicas no betão, como cavidades ou fissuração extrema, sendo de extrema importância numa situação de verificação de qualidade como a que se pretende realizar aqui.

Tal como no esclerómetro, devem ser tidos cuidados na preparação das superfícies onde os transdutores serão aplicados, podendo este facto interferir com a validade da medição obtidos.

2.3.1 Detecção de armaduras

A realização de ensaios que validem o diâmetro e disposição das armaduras é outro passo central à validação dos elementos potencialmente recuperáveis face ao projecto. Com este ensaio será também possível a determinação da espessura do recobrimento.

A utilização de ensaios electromagnéticos (assumindo ensaio com recurso a aparelho electromagnético com capacidade de detecção de varões, orientação diâmetro e, com detector *half-cell*, corrosão do aço tipo *covermeter* (Elcometer, 2024)) para a detecção de varões e determinação de recobrimento e corrosão está normalizada em: (i) BS 1881-204:1988 (BS, 1988); (ii) ASTM C876-91:1999 (ASTM, 1988)

Pretende-se com este ensaio validar as armaduras na sua disposição e diâmetros (longitudinal e transversal), estado de corrosão e recobrimento.

3 PROTOCOLO

3.1 INTRODUÇÃO

O objectivo principal da apresentação deste protocolo prende-se com a necessidade de considerar novas opções para o fim de vida dos edifícios. No entanto, esta necessidade não pode descurar a segurança estrutural na reutilização destes elementos, pelo que é fundamental que se considere o estado da arte no que aos ensaios diz respeito, para que, eventualmente, esta recuperação dos elementos possa ser realizada com segurança.

3.2 ESTRUTURA

3.2.1 Estudo prévio

O estudo prévio visa preparar a inspecção de visita, seguindo as linhas-guia para as auditorias pré-demolição. Aqui deve o auditor recolher toda a documentação disponível acerca do edifício em estudo, incluindo plantas, projecto de estabilidade, alterações posteriores, materiais, etc.

Com a informação disponível, será possível identificar potenciais elementos a serem recuperados, proceder a uma identificação de número e locais para os ensaios globais (localização de carotes, calibração do esclerómetro e amostras de aço).

3.2.2 Inspecção preliminar

Após a recolha e tratamento de dados realizados no estudo prévio, deve proceder-se à inspecção preliminar. Como definido acima, esta inspecção tem a dupla função de fazer uma avaliação prévia dos elementos e de, ao mesmo tempo, preparar os ensaios globais e calibração de esclerómetro, bem como a desconstrução dos elementos. Na inspecção preliminar o inspector deverá validar os elementos de projecto do edifício, verificando os elementos estruturais, no caso em estudo neste protocolo, as vigas. Outra função essencial da inspecção preliminar será a determinação da localização dos carotes e da localização dos provetes de aço a retirar.

Nos locais onde se pretende realizar os carotes, deve-se, primeiro, proceder a uma bateria de ensaios com esclerómetro, com a intenção de calibrar e validar os ensaios com esclerómetro que serão realizados a todos os elementos. A intenção aqui é que, ao se realizarem várias leituras de índice esclerométrico no local onde se irão retirar os carotes, espera-se que esses índices esclerométricos apresentem valores para a resistência do betão consistentes com os que serão obtidos em laboratório no teste de compressão do betão, quando ambos os ensaios referem ao mesmo local.

3.3 ENSAIOS GLOBAIS

Após inspecção preliminar, onde foram determinados os elementos a recuperar ou não, bem como os locais de amostragem, deve-se levar a cabo a recolha de espécimes e os consequentes ensaios para verificar a exequibilidade da recuperação dos elementos, com uma lógica tal como demonstrada na Figura 2.

Devem ser tidos cuidados aquando deste procedimento, começando pelo cuidado na localização ao que se acrescenta o cuidado em evitar aço e a perpendicularidade à viga que permita retirar um provete horizontal.

Os provetes devem ser testados conforme as normas em vigor, obtendo-se valores de resistência *f*c que, e conforme o procedimento de cálculo referido, podem ser transformados em resistência característica *f*ck, valor importante para o cálculo da resistência da viga.

Em relação aos provetes de aço, os cuidados prendem-se essencialmente com a conservação do aço e verificação se existe demasiada corrosão. Conforme a norma de aços para armaduras, as nervuras nos varões devem indicar a classe de resistência do aço, *f*y, que deve ser validada com o projecto do edifício em estudo. No entanto, e para validar a condição do aço, deverão ser recolhidas amostras para teste e validação da classe de resistência, conforme o estipulado para a realização do ensaio, independentemente de a classe ser identificável pelas nervuras.

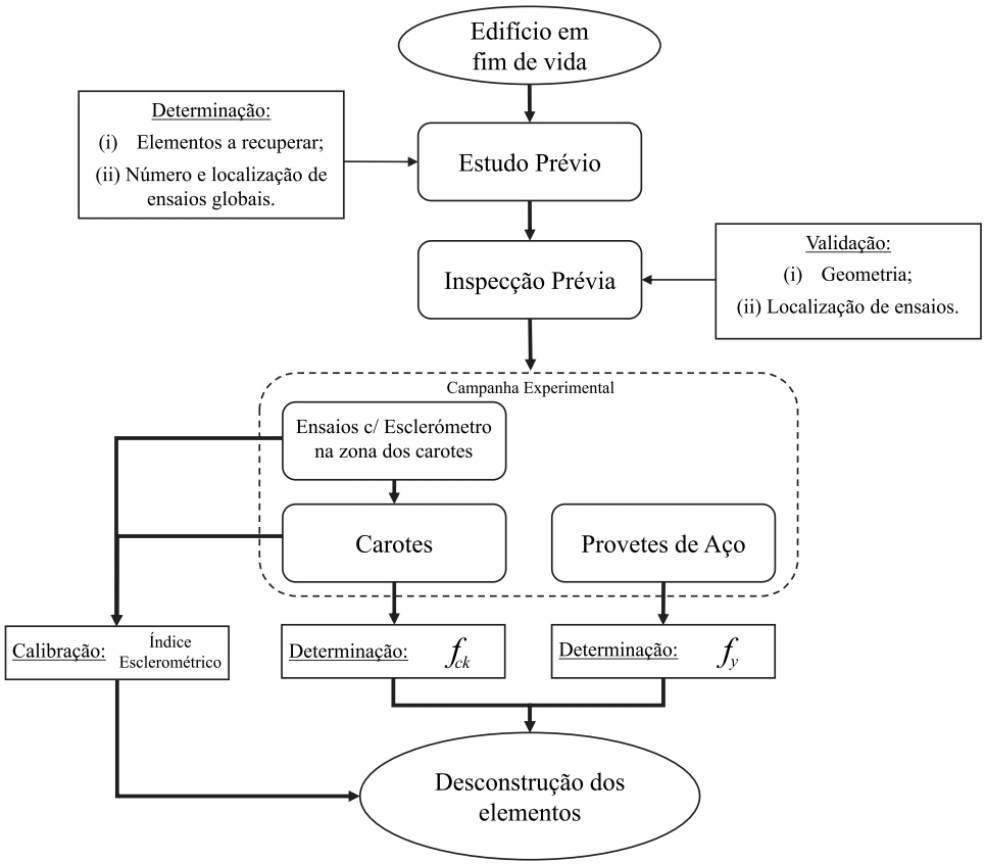


Figura 2 - Fluxograma de ensaios globais

3.4 ENSAIOS AOS ELEMENTOS

Tendo a campanha global realizada, que determina a resistência dos elementos através do ensaio de amostras de betão e aço, considerando também a relação que se determinou entre o índice esclerométrico e os ensaios à compressão do betão, realizam-se então os ensaios elemento a elemento: esclerómetro; ultra-sons; e detecção de armaduras. Ensaios estes que pretendem validar a resistência do elemento, eventuais anomalias e a armadura.

Os ensaios serão sucintamente descritos de seguida, tendo a Figura 3 enquanto resumo dos objectivos, decisões e informação a retirar em cada ensaio.

Relativamente ao esclerómetro, com a rede determinada na descrição do ensaio (25 a 50 mm), com a superfície preparada, deverá ser levada a cabo a campanha em todos os elementos, lendo-se os índices esclerométricos para que possam ser transformados em resistência à compressão do betão e comparados com os índices esclerométricos obtidos anteriormente para validação e calibração.

O principal objectivo da utilização do ensaio de ultra-sons é a determinação de anomalias no interior do betão, bem como fissuração excessiva. Este ensaio deverá ser realizado em vários pontos, começando por um teste longitudinal em que os transdutores são colocados nos extremos (que foram cortados), onde se pretende identificar alguma anomalia inesperada.

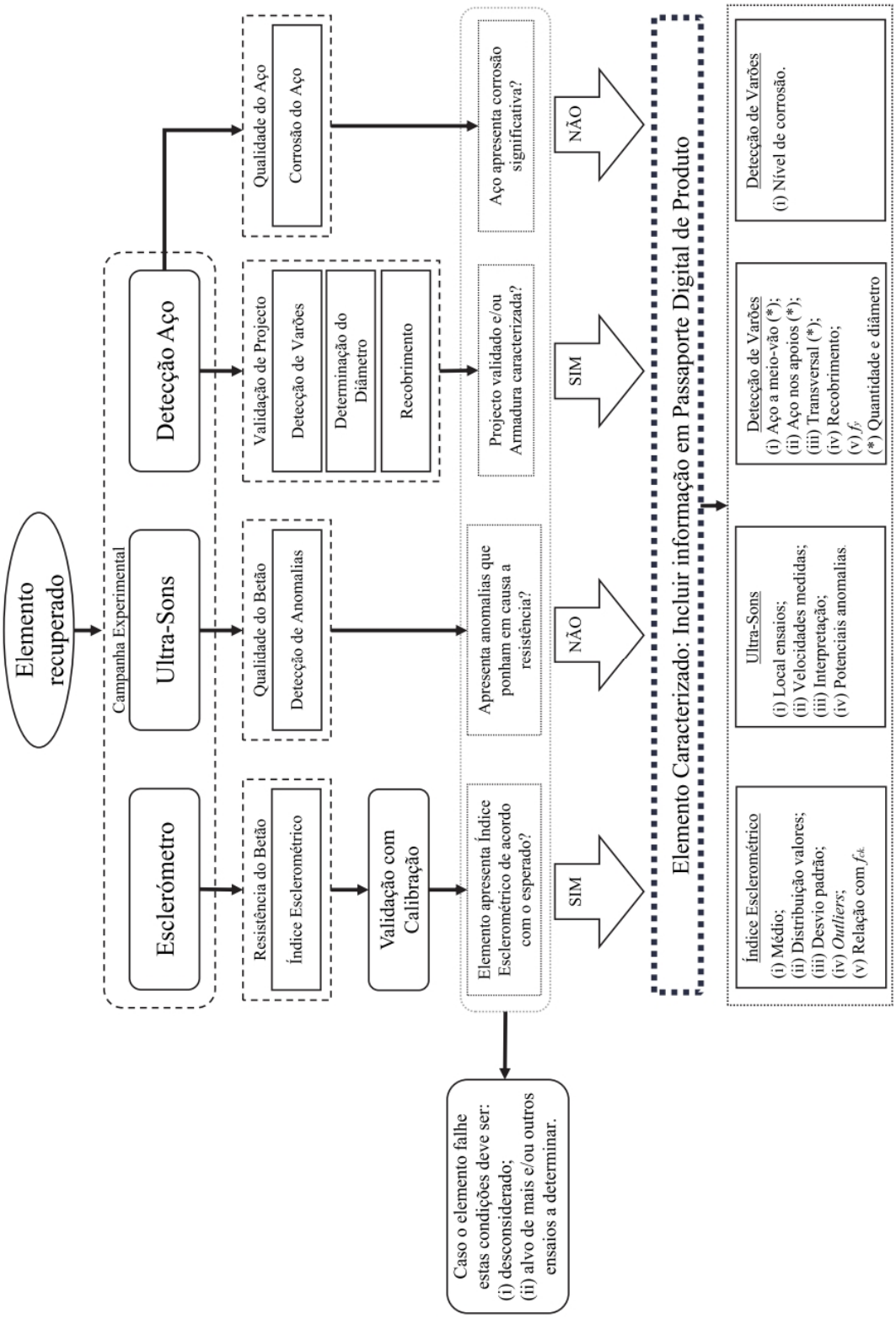


Figura 3 - Fluxograma de ensaios a fazer a todos os elementos

Podem ser realizados outros ensaios transversais ao eixo do elemento ao longo deste, seja para tentar detectar e caracterizar alguma anomalia detectada antes, validar alguma leitura inferior do esclerómetro ou outra razão, como fissuras em que se pretende determinar o desenvolvimento dentro do elemento.

A detecção de armaduras, pretende caracterizar as armaduras presentes nos elementos, podendo, conforme o acessório do equipamento, determinar o recobrimento, diâmetro da armadura, bem como nível de corrosão. Idealmente este ensaio deve servir para validar o projecto do edifício em estudo, pelo que o inspector deverá identificar e validar as armaduras face ao projecto, se são constantes em todo o vão, se os estribos têm o mesmo diâmetro e se o espaçamento é constante. Existindo esta informação, o projecto é validado.

A corrosão pode ser observada nas extremidades cortadas do elemento, contudo deve ser também avaliada a meio-vão, bem como em zonas onde pode eventualmente o aço ter sido exposto a condições adversas, como em zonas de casas-de-banho.

O recobrimento deve ser avaliado em vários pontos de análise, principalmente na face inferior da viga, a meio-vão e em outros pontos no seu eixo nas várias faces.

4 GESTÃO DA INFORMAÇÃO

A aplicação de um protocolo deste género irá gerar uma quantidade muito grande de dados que devem ser tratados, interpretados e, finalmente, disponibilizados. Para tal, a informação deverá constar em Passaporte Digital de Produto (PDP), da forma normalizada que o PDP preconize. O PDP é um documento que está em normalização pela CE através da directiva do *Ecodesign* (EC, 2009), pelo que o tipo de dados a serem necessários será aqui definido.

À informação definida, acrescenta-se a necessidade de criar um modelo digital tridimensional, exacto e preciso, que permita que a informação seja, depois, disponibilizada para trabalhos futuros, através de uma plataforma digital (*Marketplace*).

A digitalização de processos e dos dados será, aqui, essencial, para que os dados gerados possam ser disponibilizados para potenciais utilizadores dos materiais no futuro, no entanto, este tratamento e disponibilização, terá de ser alvo do desenvolvimento de novas metodologias para que possa existir integração dos dados, em plataformas do tipo da desenvolvida pelo projecto C+D (Antunes *et al.*, 2021), desenvolvida para a gestão de RCDs, mas com potencial em servir de mercado para materiais recuperados, conforme o proposto neste trabalho.

5 TRABALHOS FUTUROS

Os ensaios apresentados não foram desenvolvidos para este tipo de validação, pelo que, para aplicação prática deste protocolo ou semelhante, existe a necessidade de validação. Propõe-se para trabalhos futuros que este protocolo e semelhantes sejam validados através de trabalho experimental.

O uso do BIM, especialmente o *scan-to-BIM*, que tem o potencial de criar um modelo 3D dos elementos recuperados terá especial importância para a eventual comercialização dos materiais recuperados, pois serão necessárias medições exactas e modelos 3D que permitam o *designer* de um novo edifício ou estrutura escolher o que necessita num mercado dedicado a estes materiais, como é o caso do desenvolvido no projecto C+D (Antunes *et al.*, 2021).

O BIM será também importante enquanto central de informação, com os *product data templates* (PDT) que são associados aos objectos BIM a terem o potencial de agregar toda a informação necessária para caracterizar perfeitamente um elemento. Estes PDT, ligados aos PDP (EC, 2009), serão essenciais para facilitar e tornar possível a aplicação da EC ao ambiente construído.

Exemplos de tecnologias usadas noutros sectores, como raio-x para a validação das armaduras, GPR (*ground penetrating radar*) para detecção de vazios e densidades, bem como outras tecnologias que poderão ser desenvolvidas e aplicadas em volume num ambiente tipo fábrica, poderão facilitar esta caracterização.

Contudo, o teste de elementos recuperados poderá apresentar várias facilidades face a testes *in situ*, por se poderem testar os elementos em instalações dedicadas, o que poderá facilitar o desenvolvimento de novas tecnologias de diagnóstico ou o uso de tecnologias não aplicadas, ou pouco aplicadas à engenharia civil.

6 CONCLUSÃO

O aproximar-se de grandes objectivos europeus como o horizonte 2030, ao que se seguem os objectivos de *net-zero* em 2050, o financiamento verde e taxonomia europeia que regulam taxas de juro e acesso a financiamento, bem como as compras públicas ecológicas, estão a trazer a sustentabilidade ambiental para o centro decisório do sector AEC.

Portanto, são necessárias ferramentas e metodologias que preparem as transições que serão necessárias num futuro próximo, nomeadamente com a adopção de lógicas cada vez mais circulares no sector, que permitam olhar para os edifícios em fim de vida não como um conjunto de resíduos, mas sim como minas de materiais e produtos à espera de serem recuperados.

Dentro do sector AEC, o ambiente construído é o que mais problemas causa na aplicação de princípios de EC. Os edifícios existentes foram construídos a pensar na utilização e não no fim de vida (FdV), considerando sempre a demolição como opção única para o FdV aquando do sua concepção. Este facto dificulta, em muito, o potencial de recuperação de materiais, produtos ou sistemas de edifícios em FdV pois estes não foram desenhados nem pensados para serem desconstruídos/desmontados.

Dentro destes problemas, a estrutura dos edifícios apresenta-se como um dos mais complexos de resolver de forma eficiente. Com a betonagem *in situ* e com estruturas monolíticas e elementos ligados entre si, o FdV destes sistemas revela-se complexo de resolver de forma ambientalmente sustentável. Existem soluções de demolição selectiva, em que a estrutura é demolida, o betão separado do aço e ambos são reciclados, mas esta solução apresenta impactes elevados pela transformação necessária e, está associada normalmente a soluções de *downcycling*.

Com as auditorias pré-demolição (ApD) a tornarem-se mais relevantes e, eventualmente, obrigatórias (como já o são em alguns países europeus), será mais fácil a identificação de materiais e sistemas recuperáveis. Este artigo pretende defender que estas ApD possam ser utilizadas para identificar elementos de betão armado que possam ser recuperados e planear/executar um protocolo de ensaios que os caracterize por forma a viabilizar e potenciar a sua reutilização.

Apresenta-se um potencial protocolo baseado em ensaios correntes, de aplicação global e elemento a elemento, em que os ensaios globais pretendem caracterizar a estrutura como um todos, e os ensaios a elemento, pretendem caracterizar e validar elemento a elemento.

Do ponto de vista global pretende-se que os ensaios validem as condições de projecto, nomeadamente as classes de resistência do betão e do aço. Do ponto de vista elemento a elemento, pretende-se validar que a resistência do betão é consistente com os ensaios globais e que não existem patologias no betão ou aço que condicionem o uso do elemento.

Este artigo pretendeu explorar que ensaios seriam necessários para caracterizar de forma suficiente, elementos em betão armado betonados *in situ*, para que seja possível os recuperar para reutilização, com o mínimo de transformação possível.

Foram identificados ensaios já usados em engenharia civil, mas com objectivos diferentes, que poderão ser utilizados para este fim, ensaios esses que se montou numa estrutura que poderá servir de protocolo para os objectivos apresentados.

Contudo, e dada a importância da estrutura para a segurança, este é ainda um trabalho conceptual, apesar de já existirem exemplos de elementos deste tipo recuperados e reutilizados, trazer este tipo de conceito para uma aplicação mais disseminada acarreta riscos que deverão ser considerados.

Portanto, para além de tecnologias emergentes ou tecnologias existentes que possam ser reaplicadas para este tipo de protocolos, devem os protocolos ser testados e validados por forma a que os risco de falha dos elementos seja minimizado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020). O autor Pedro Frazão Pedroso agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UI/BD/153606/2022 e ao CERIS enquanto unidade de acolhimento.

REFERÊNCIAS

Antunes, A. *et al.* (2021) 'Environmental Impacts and Benefits of the End-of-Life of Building Materials: Database to Support Decision Making and Contribute to Circularity', *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 12659*, 13(22), p. 12659. Available at: https://doi.org/10.3390/SU132212659.

ASTM (1988) *ASTM C 876-91 - Standard test for Half-Cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*.

BS (1988) *BS 1881 Part 204:1988 Testing concrete - Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*.

BSI (2000) *BS EN 12390-4:2000 Testing hardened concrete Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines*, *British Standard*.

BSI (2004) *BS EN 12504-4:2004 Testing Concrete Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. British Standards Institution.

BSI (2010) *BS EN ISO 15630-1:2010 - Steel for the reinforcement and prestressing of concrete-Test methods Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire*.

BSI (2012a) *BS EN 12390-1:2012 Testin hardened concrete Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*, *British Standards as dimensoes* .

BSI (2012b) *BS EN 12504-2:2012 - Testing in concrete structures - Part 2: Non destructive testing - Determination of rebound number*. BSI.

BSI (2014) *BS EN 206:2013 Concrete - Specification, performance, production and conformity*.

Devènes, J. *et al.* (2022) 'Re:Crete – Reuse of concrete blocks from cast-in-place building to arch footbridge', *Structures*, 43, pp. 1854–1867. Available at: https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.07.012.

Durmisevic, E. and Yeang, K. (2009) 'Designing for Disassembly (DfD)', *Architectural Design*, 79(6), pp. 134–137. Available at: https://doi.org/10.1002/AD.994.

EC (2009) *Directive 2009/125/EC: establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products*.

Elcometer (2024) *Elcometer - Concrete Inspection & Metal Detection*.

European Commission (2019) *European Green Deal*.

European Commission (2024) *Buildings and construction: Environmental impacts*. Available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en (Accessed: 15 December 2023).

Eurostat (2022) *Value in percentagem of GDP of the construction sector in the EU*. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/digpub/housing/bloc-3a.html?lang=en (Accessed: 22 June 2022).

Fabian Apel *et al.* (2023) *Cementing your lead: The cement industry in the net-zero transition*. Available at: https://www.mckinsey.com/industries/engineering-construction-and-building-materials/our-insights/cementing-your-lead-the-cement-industry-in-the-net-zero-transition#/ (Accessed: 18 June 2024).

Government of Luxembourg (2012) *Law of 21 March 2012 on Management of Waste A N°60, Memorial, Official Journal of the Grand Duchy of Luxembourg*.

Government of Luxembourg (2020) *Guide of Deconstruction*.

Greenway NZ (2023) *Projecto Whitaker Place - Greenway NZ*. Available at: https://www.greenway.net.nz/projects/whitaker-place/ (Accessed: 3 February 2024).

IMPIC (2023) *Relatório do Sector da Construção em Portugal 2023 - 1º Semestre*.

IPQ (2008) *NP EN 13791:2008 - Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas e em produtos pré-fabricados*.

IPQ (2009) *NP EN 12390-3:2009 Ensaios do Betão Endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. Portugal. Available at: www.ipq.pt.

IPQ (2010) *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão*. Portugal.

ISO (2009) *ISO 6892-1:2009 - Metallic Materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*.

LNEC (2009) *E 471 - 2009: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*, *Especificação LNEC*. Available at: www.lnec.pt.

LNEC (2020) *LDC - 1/2020: Documentos de classificação de produtos de aço para armaduras de betão armado em vigor em Portugal*, *Lista de documentos de classificação*.

Milagre Martins, I. *et al.* (2023) *Guia português para auditorias pré-demolição*. Lisboa. Available at: www.lnec.pt.

Monteiro, P.J.M., Miller, S.A. and Horvath, A. (2017) 'Towards sustainable concrete', *Nature Materials*, 16(7), pp. 698–699. Available at: https://doi.org/10.1038/nmat4930.

Pedroso, P.F., Silvestre, J.D. and Costa, A.A. (2024) 'End-of-Life as a New Beginning: Pre-demolition Audits, Digital Platforms and Skilled Labour as Enablers of Circular Economy', pp. 636–645. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_59.

ReCreate (2023) *ReCreate Project*. Available at: https://recreate-project.eu/ (Accessed: 3 February 2024).

Sebastian Reiter (2022) *Cement*, *McKinsey*. Available at: https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/spotting-green-business-opportunities-in-a-surging-net-zero-world/transition-to-net-zero/cement (Accessed: 18 June 2024).

Valor Bruto Acrescentado - Portugal (2022). Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/digpub/housing/bloc-3a.html?lang=en (Accessed: 18 June 2024).

Vítor Cóias (2009) *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. 2nd edn. Lisboa: IST Press.

Wahlström, M. *et al.* (2019) *Pre-demolition audit - Overall guidance document*. Available at: https://ec.europa.eu/growth/content/eu-.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO GRANITO ROSA IRACEMA NA PROPRIEDADE DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE ARTEFATOS DE CERÂMICA VERMELHA

Cândido Jorge de Sousa Lobo[a]; Rafaella Cavalcante Regis[b]; Antônio Eduardo Bezerra Cabral [b]; Rogério Cavalcante Regis[a], Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira[b]

[a](Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Avenida Felipe Santiago, 411, 62900-000, Russas, Brasil), candidojslobo@ufc.br

[b](Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Avenida Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, Brasil), rafaellacavalcanter@gmail.com

[a](Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Avenida Felipe Santiago, 411, 62900-000, Russas, Brasil), rogerioregis.ufc@gmail.com

[b](Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Avenida Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, Brasil), eduardo.cabral@ufc.br

[b](Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Avenida Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, Brasil), emilio@ufc.br

RESUMO

A mineração emerge como uma atividade essencial para o avanço de vários segmentos da sociedade, no qual desempenha um papel de relevância significativa na economia brasileira. Nesse contexto, é essencial que a adoção de novas tecnologias de produção seja considerada para viabilizar a fabricação de produtos inovadores como forma de mitigação ambiental. Este trabalho tem como objetivo avaliar a potencialidade da incorporação de resíduo de rochas ornamentais na formulação de massas cerâmicas. Foram preparados corpos de prova com a incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo de Granito Rosa Iracema na massa argilosa. As formulações foram compactadas pelo processo de prensagem em matrizes metálicas, submetidos a carga de compactação de 30kN, sinterizados a temperatura de 1000 °C e permanência de duas horas no patamar de sinterização. As amostras foram avaliadas quanto ao: índice de plasticidade, análise termogravimétrica, Microscopia Eletrônica de Varredura e resistência à flexão. Os resultados indicam que a incorporação do resíduo na massa cerâmica vermelha reduz o índice de plasticidade, diminui a massa específica aparente das peças e aumenta a formação de poros, observados em micrografias. Estas falhas influenciam na redução de 59% da resistência à flexão mediante adição de 30% do rejeito do granito.

Palavras-chave: Rocha Ornamental, Cerâmica vermelha, Resistência à Flexão, Resíduos

1 INTRODUÇÃO

A mineração emerge como uma atividade essencial para o avanço de vários segmentos da sociedade, notadamente na construção civil, no qual desempenha um papel de relevância significativa na economia brasileira. No Brasil, em razão da abundância de recursos naturais e da crescente demanda no setor da construção civil, a indústria de rochas ornamentais experimentou um notável impulso, consolidando-se como uma força proeminente na sociedade. Nesse contexto, é essencial que a adoção de novas tecnologias de produção seja considerada para viabilizar a fabricação de produtos inovadores como forma de mitigação ambiental.

Em paralelo a isto, a indústria de cerâmica vermelha abrange vários ramos, como a indústria de tijolos, blocos, tubos, telhas, ladrilhos, elementos vazados, dentre outros. Nesse contexto, este segmento desempenha um papel significativo no âmbito econômico e social no Brasil, uma vez que pesquisas apontam que o setor possui participação na ordem de 0,4% no Produto Interno Bruto (PIB) nacional, valor equivalente a pouco mais de R$7 bilhões/ano (Ferreira *et al*., 2023). Segundo a ANICER, o segmento representa 4,8% da indústria da Construção Civil e gera cerca de 290 mil empregos diretos e perto de 900 mil indiretos (ANICER, 2024).

Com relação ao Estado do Ceará, é no município de Russas que se concentra a maior atividade de indústrias ceramistas, no qual das 420 empresas do ramo no estado, cerca de 120 estão localizadas nos limites do município, com produção média de 76.000 milheiros peças/mês e com uma oferta de 3.200 empregos diretos (INT, 2012).

As alterações no ecossistema de forma física, química, biológica e cultural provocadas por uma ação humana implicam na necessidade da aplicação de medidas com a finalidade de amenizar o impacto ambiental. A adição de resíduos em substituição parcial da argila torna-se uma viabilidade de mitigação ambiental. Nesse contexto, uma opção eficaz é formulação de massa argilosa através da inclusão de rejeito de granito, de forma a aproveitar este resíduo, uma vez que quando descartado pela indústria, não recebe tratamento adequado, resultando na contaminação do solo e do subsolo, além do assoreamento de córregos e rios.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS E METODOLOGIA

A massa argilosa foi coletada de uma jazida pertencente à cidade de Russas, situada no Estado do Ceará, Brasil. Consiste da mistura de uma argila forte e uma argila fraca na proporção de 4:1. O granito utilizado é denominado Granito Rosa Iracema, resíduo obtido na forma de pó.

Foi avaliada a influência do incremento do resíduo de granito na massa cerâmica, nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30%, através da produção de 5 corpos-de-prova cerâmicos de cada formulação, obtidos por meio da conformação por prensagem, submetidos à carga de compactação de 30 Mpa e sinterizados na temperatura de 1000 °C, com patamar de sinterização de 120 minutos.

O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra os procedimentos utilizados na metodologia experimental, que consiste na caracterização das matérias-primas através da Análise Termogravimétrica e determinação do índice de plasticidade, produção laboratorial de peças cerâmicas e identificação das propriedades física, mecânica e morfológica, definidas pela massa específica aparente, resistência à flexão em 3 pontos e Microscopia Eletrônica de Varredura.

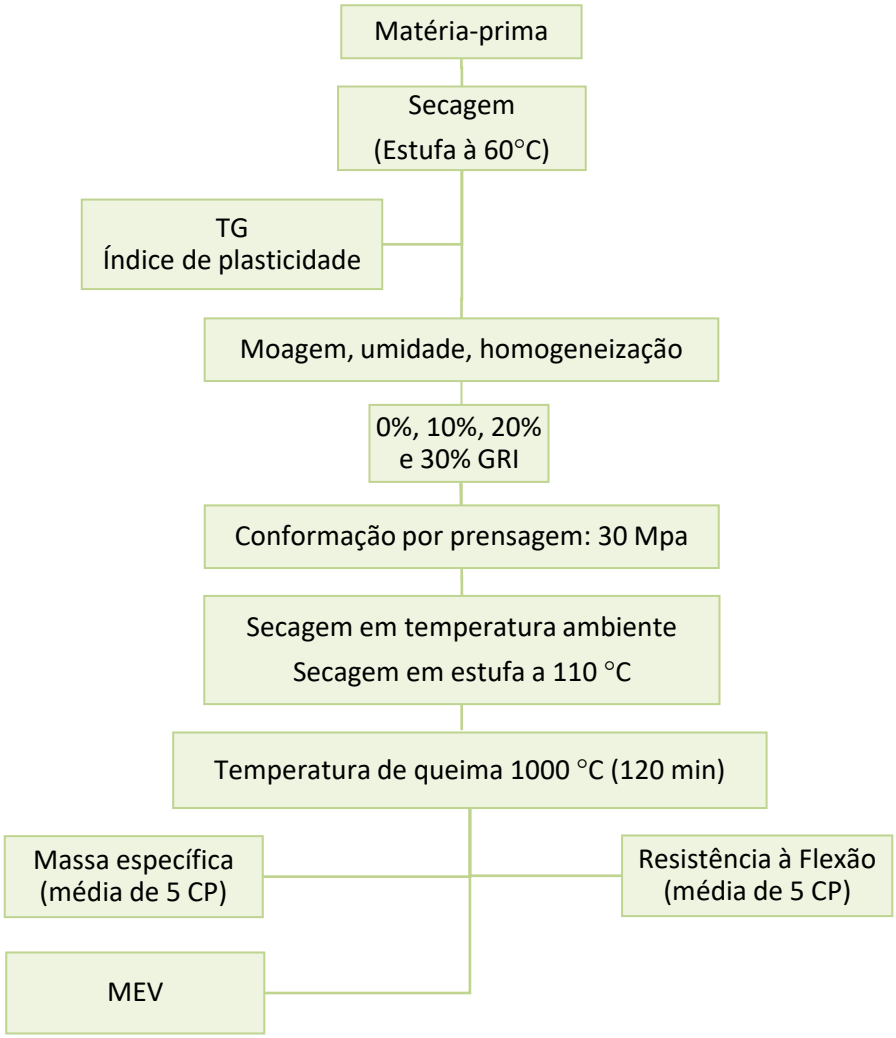


Figura 1 – Fluxograma do procedimento experimental.

2.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

As matérias-primas foram avaliadas termicamente por meio de análises de TG (Termogravimetria) no equipamento modelo STA 449 F3 Jupiter do fabricante alemão NETZSCH, a uma taxa de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio, aquecimento ambiente até 1000°C, disponível no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

As amostras de argila foram preparadas em conformidade com a NBR 6457– Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. O índice de plasticidade das composições da massa argila com incorporação de granito foi definido de acordo com as normas NBR 6459-16 – Limite de Liquidez e NBR 7180-16 – Limite de Plasticidade (ABNT, 2016b; ABNT, 2016c) para cálculo dos limites de Atterberg.

A morfologia dos corpos-de-prova sinterizados foi determinada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, utilizando o microscópio eletrônico de bancada Tescan, modelo VEGA XMU.

A determinação da massa específica aparente é realizada conforme a razão entre o peso da peça após a queima e o volume total (volume das partículas e volume dos poros). A massa específica aparente (g/cm³) foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$MEA = \frac{m}{V}$$

Onde: MEA = massa específica aparente; m = massa; V = volume.

O ensaio de flexão de três pontos é um teste que mede a resistência do material à flexão, indicando a carga máxima que uma amostra pode suportar antes de ocorrer uma falha estrutural. Durante este teste, uma força é aplicada no centro da amostra, enquanto suas extremidades são apoiadas, criando uma curva de flexão. O cálculo da tensão de ruptura do material foi determinado pela equação:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Onde: σ_f = tensão de ruptura; F = força máxima aplicada; L = distância entre os apoios; b = base do corpo-de-prova; d = largura do corpo-de-prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o comportamento térmico das amostras por meio da técnica termoanalítica de Termogravimetria (TG). Os resultados indicam a perda de massa de 8,62% da amostra de argila magra, 9,56% da argila gorda e 3,39% do Granito Rosa Iracema, entre 30°C e 1000°C.

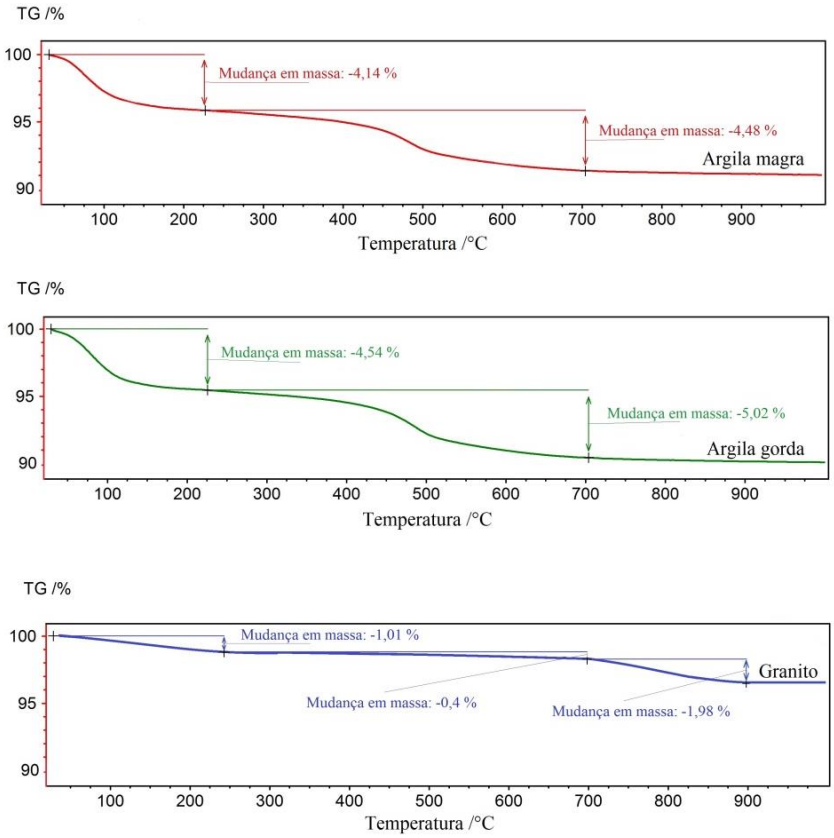


Figura 2 – Análise termogravimétrica da argila gorda, argila magra e Granito Rosa Iracema.

Ainda de acordo com a Figura 2, observa-se que para a faixa de temperatura de 0 °C e 230 °C ocorre a perda de massa decorrente da perda de água de hidratação. As curvas das argilas indicam que a 230 °C e 680 °C há a perda de massa referente à dissociação da água de constituição dos argilominerais e queima da matéria orgânica, e o pico exotérmico evidenciado entre 680 °C e 1000 °C deve-se possivelmente a formação da mulita. A segunda perda de massa da amostra de granito, entre 560 °C e 650 °C refere-se a transformação de fase do quartzo e a última perda, entre 700 °C e 900 °C devido a decomposição do carbonato de cálcio (RAT *et* al., 2023; SOUSA, 2017).

O Quadro 1 indica os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade nas quatro formulações de massas cerâmicas, indicando ainda a classificação de cada massa quanto a consistência.

Quadro 1 – Limites de consistência de Atterberg das composições cerâmicas.

Amostra	**Limite de liquidez (LL%)**	**Limite de plasticidade (LP%)**	**Índice de plasticidade (IP%)**	**Classificação**
SGRI	32,82	17,24	15,58	Muito plástico
10% GRI	30,46	16,69	13,77	Plasticidade média
20% GRI	28,09	16,53	11,56	Plasticidade média
30% GRI	25,68	14,68	11,01	Plasticidade média

Conforme observado no Quadro 1, a massa de argila sem a adição de granito é classificada como altamente plástica, com um limite de plasticidade de 17,24%. Esse valor representa a porcentagem de água necessária para que o material atinja uma consistência plástica, permitindo seu uso em processos de extrusão. O índice de plasticidade, que corresponde à diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, foi de 15,58%. Este índice reflete a quantidade máxima de água que pode ser adicionada à argila, a partir do seu limite de plasticidade, sem que perca sua consistência plástica. O limite de liquidez, por sua vez, foi de 32,82%, indicando o teor de umidade acima do qual o solo começa a se comportar de forma líquida, e abaixo do qual ele passa a apresentar características plásticas (Moreno-Maroto, Alonso-Azcárate, 2018; Regis *et al*, no prelo).

As massas cerâmicas com adição de resíduo de granito em diferentes percentagens exibem plasticidade intermediária, indicando que uma maior quantidade de água é necessária para alcançar a consistência plástica desejada, em comparação com a composição original. Além disso, essas massas apresentam um nível reduzido de plasticidade, que retêm menos água, resultando em menor fluidez e maior rigidez, tornando-se menos maleáveis durante o processo de moldagem.

A Figura 3 apresenta a massa específica aparente dos corpos-de-prova sinterizados. Devido à presença de elementos fundentes que têm baixos pontos de ebulição, a fase vítrea líquida tende a ocupar o espaço dos poros deixados por esses elementos que evaporam durante o processo de sinterização. Esse preenchimento de poros pela fase líquida provoca uma contração tridimensional do material, resultando em uma redução da porosidade e do volume (Regis, 2022). Observa-se na Figura 3 que à medida que é incrementado o resíduo de granito, a massa específica diminui.

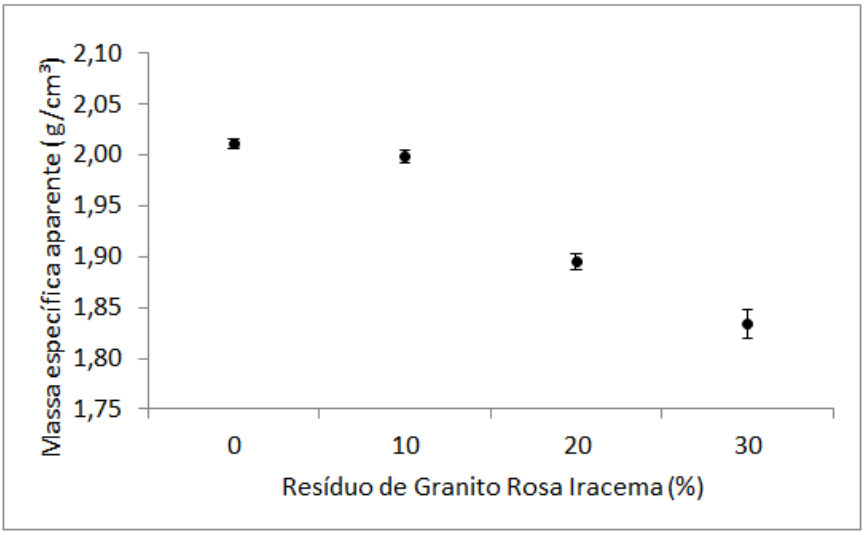


Figura 3 – Massa específica aparente.

Isso pode ser justificado analisando concomitantemente os resultados de resistência à flexão apresentados na Figura 4. A adição de resíduos de granito nem sempre representa melhor desempenho mecânico. Embora o granito reduza a porosidade aberta, o diâmetro médio dos poros aumenta acentuadamente e, juntamente com uma grande quantidade de quartzo, pode introduzir poros grandes o suficiente e microfissuras que comprometem a resistência mecânica e consequentemente à redução da massa específica aparente (Hojamberdiev *et al.,* 2011).

Este efeito é observado na Figura 4, cujo incremento de 30% do granito reduz acentuadamente a propriedade mecânica de resistência à flexão em 59%.

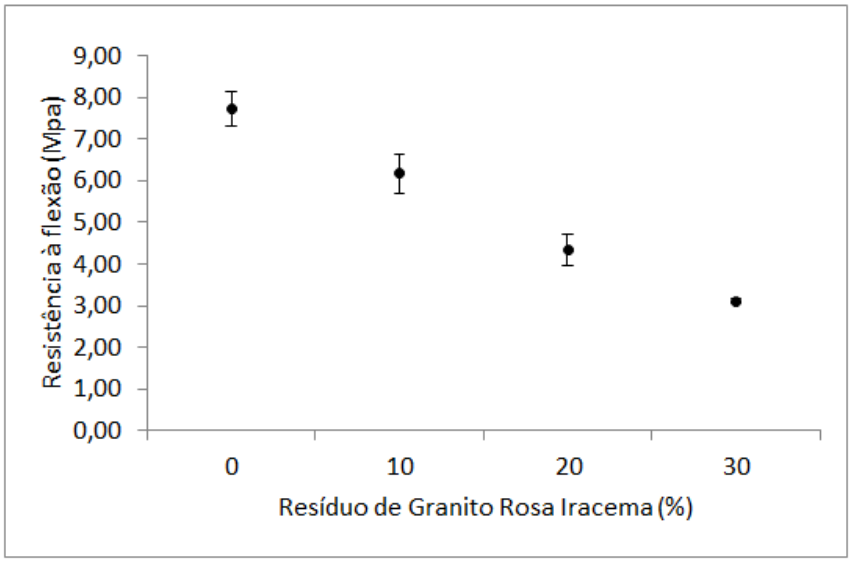


Figura 4 – Resistência à flexão.

A Figura 5 mostra as micrografias (MEV) das formulações para cada teor de resíduo de Granito Rosa Iracema na massa cerâmica, indicando a morfologia das peças cerâmicas sinterizadas à temperatura de 1000 °C.

A microestrutura (a) 0% de resíduo de granito apresenta textura mais regular, cujas partículas finas presentes na forma de aglomerados apontam a presença de argilominerais, indicando uma maior coesão das partículas e explica o maior valor de resistência mecânica à flexão. A micrografia (b), no qual foram adicionados 10% de resíduo de Granito Rosa Iracema, apresentou grãos irregulares característicos de partículas de quartzo (Vieiras, Soares, Monteiro, 2004).

A micrografia (C), 20% resíduo de Granito Rosa Iracema, as superfícies de fratura são bem irregulares e rugosas, apresentam trincas, poros e partículas de tamanhos variados, aspectos característicos da fratura intergranular. A microestrutura (c) 30% resíduo de Granito Rosa Iracema, foi observado o aumento das dimensões dos poros, maior rugosidade e presença de fissuras estruturais no material (Coellho *et al*, 2022).

De modo geral, percebeu-se que o incremento de resíduo de granito propiciou a formação e aumento das dimensões dos poros ao longo da estrutura, além do aumento da textura rugosa.

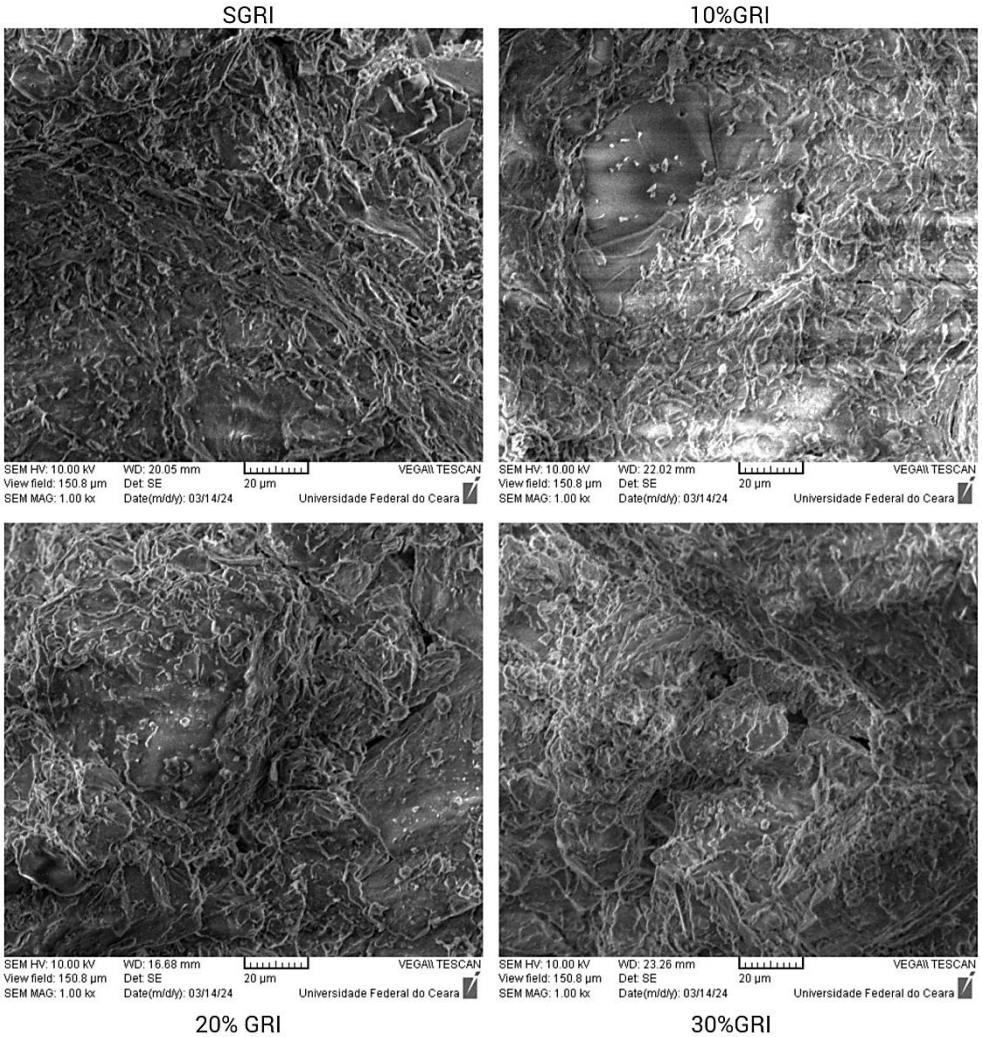


Figura 5 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura de formulações sinterizadas a 1000 °C, submetidas à ampliação de 1000x. (a) 0% de resíduo de granito; (b) 10% de resíduo de Granito Rosa Iracema; (c) 20% de resíduo de Granito Rosa Iracema; (d) 30% de resíduo Granito Rosa Iracema.

4 CONCLUSÕES

Através do estudo de incorporação de resíduo de Granito Rosa Iracema em uma massa argilosa utilizada na produção de peças de cerâmica vermelha, concluiu-se que o resíduo apresenta potencial como subproduto alternativo deste setor.

Os resultados indicam que a incorporação de resíduo de rocha ornamental na massa cerâmica vermelha reduz o índice de plasticidade e diminui a massa específica aparente das peças cerâmicas. De acordo com o processo de sinterização estabelecido, este incremento aumenta a formação de poros, devido à redução do fator de empacotamento oriundo da baixa variabilidade do tamanho de partículas.

Através do MEV percebeu-se a interface entre as partículas do granito e argila, aumentando a inclusão de concentradores de tensão, além de propiciar a formação e aumento das dimensões dos poros ao longo da estrutura. Estas falhas influenciam diretamente na resistência à flexão, no qual apresenta uma diminuição de 59% da resistência à flexão com a adição de 30% do rejeito do granito.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016a). ABNT NBR 6457: Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016b). ABNT NBR 6459: Solo-Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016c). ABNT NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.

Almeida, T. F. *et al*. (2020). Caracterização do resíduo de mármore calcinado para utilização como fonte alternativa de carbonato de Cálcio. Brazilian Journal of Development, 6 (9): 66962-66969. https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-217

ANICER. (2024). Dados Oficiais. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/. Acesso em 24/02/2024.

Carreiro, M. E. A., Santos, R. C., Silva, V. J., Lira, H. L., Neves, G. A., Menezes, R. R., & Santana, L. N. L.. (2016). Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural. Cerâmica, 62(362): 170–178. https://doi.org/10.1590/0366-69132016623621990

Coelho, AMR, Saggioro, FG, Sales Junior, JCC, Andrade, JCS, Cavalcante, RH. (2022). Avaliação do potencial de aproveitamento de resíduos de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha no estado do Amazonas. Matéria (Rio De Janeiro), 27(2): e13209. https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1309

Ferreira E. P. *et al*. (2023) Diagnóstico da indústria de cerâmica vermelha de São Roque do Canaã, ES. Cerâmica Industrial, 28(4): e132801. http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2023.022

INT - Instituto Nacional de Tecnologia. Panorama da indústria de cerâmica vermelha no Brasil. EELA/INT. Rio de Janeiro, RJ: INT, 2012.

Moreno-Maroto, J. M., Alonso-Azcárate, J. (2018). What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. Applied clay science, 161: 57-63. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011

Hojamberdiev, M., Eminov, A.; Xu, Y. (2011). Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. Ceramics International, 37(3), 871–876. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.10.03

Rat, E.; Martínez-Martínez, S.; Sánchez-Garrido, J. A.; Pérez-Villarejo, L.; Garzón, E.; Sánchez-Soto, P. J. (2023). Characterization, thermal and ceramic properties of clays from Alhabia (Almería, Spain). Ceramics International, 49(9): 14814-14825. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.328.

Regis, R. C. *et al.* (2022). Influência das variáveis de processamento nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmicas à base de subproduto do granito Corumbá, Cerâmica Industrial, 27(1): 1-11. http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.009

Regis, R. C. *et al.* (no prelo). Potencialidade das matérias-primas argilosas extraídas do município de Russas/CE: análises químicas, térmicas e tecnológicas. Ambiente Construído.

Sousa, J. P. (2017). Caracterização tecnológica de argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha no Município do Crato - Ceará. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Vieira, C. M. F., Soares, T. M., Monteiro, S. N. (2004). Utilização de Granito em Massa Cerâmica para Telhas. Cerâmica Industrial, v. 1, pp. 28-32.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS À BASE DE CAL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MÁSCARAS CIRÚRGICAS DESCARTÁVEIS: ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO ATRAVÉS DE CHOQUE TÉRMICO

Maria Paula Mendes[a]; María Isabel Romero[b]; Miguel Bravo[a], Manuel Francisco C. Pereira[c], Inês Flores-Colen[a]

[a]CERIS, IST-ID, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, mpaulamendes@tecnico.ulisboa.pt, miguelnbravo@gmail.com, ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

[b]Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Avenida Reina Mercedes, no. 2, 41012, Sevilla, Spain, mariaisabelromero@us.es

[c]CERENA, IST-ID, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, mfcp@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

As argamassas à base de cal são frequentemente utilizadas na reabilitação de edifícios antigos. Apresentam-se os resultados das taxas de perda de massa, dos ensaios mecânicos e físicos de argamassas à base de cal hidráulica natural (Secil NHL 3,5) com incorporação de resíduos de máscaras cirúrgicas descartáveis sujeitas a ciclos de calor-frio.

Durante o ensaio de envelhecimento, as argamassas com 2,5% em massa de máscara em substituição do agregado revelaram uma taxa média de perda de massa de 5,13%±0,04%, enquanto que as argamassas de referência apresentaram uma perda inferior de 2,45%±0,16%. Estes valores de perda de massa estão em consonância com os resultados do desempenho mecânico executados para 5º, 10º e 15º ciclos, nos quais os valores da resistência à compressão diminuem durante o envelhecimento, permanecendo acima dos 0,4 MPa (norma EN998) apenas para as argamassas de referência.

A porosidade aberta inicial teve um aumento nas argamassas com resíduos de máscaras (valor de 30%) em comparação com a argamassa de referência (valor de 23%), não havendo ao longo dos ciclos de envelhecimento uma tendência significativa para ambas as argamassas. Trabalhos futuros deverão concentrar-se na análise da microestrutura das amostras envelhecidas e na caracterização da distribuição porosimétrica.

Palavras-chave: Máscaras faciais**,** durabilidade**,** argamassa, cal hidráulica, choque térmico

1 INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19 impulsionou significativamente o uso de máscaras cirúrgicas descartáveis tipo IIR (MCD). Segundo dados da EUROSTAT (2024), em 2021, o total de exportações e importações de máscaras pela União Europeia atingiu 125,41 kt, reduzindo-se para 67,91 kt em 2022 e 7,24 kt em 2023. No período pós-pandemia, verificou-se uma redução substancial no seu uso, embora estas continuem a ser uma ferramenta útil e amplamente utilizada no controlo de doenças respiratórias. As máscaras são geralmente descartadas em aterros sanitários, incineradas ou, muitas vezes, deitadas fora de forma inadequada. A gestão destes resíduos tornou-se, portanto, um problema de poluição ambiental, dado serem maioritariamente constituídas por um plástico: o polipropileno (PP). Este material contribui para a poluição por plásticos e microplásticos do meio ambiente (Wang et al., 2023).

As argamassas à base de cal são frequentemente utilizadas na reabilitação de edifícios antigos, devido à sua maior compatibilidade com os materiais de alvenaria em comparação com o cimento Portland (Izaguirre et al., 2011; Marini et al., 2018; Ruegenberg et al., 2021). A cal hidráulica é produzida a partir de calcários que contêm impurezas como sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Estes compostos reagem durante o processo de calcinação, formando silicatos e aluminatos de cálcio. As argamassas de cal hidráulica natural endurecem através da hidratação destes componentes hidráulicos e, em menor escala, da carbonatação da cal (hidróxido de cálcio). A carbonatação ocorre quando se dá a evaporação da água livre (humidade relativa inferior a 70%), o que leva a uma maior retração por secagem e à presença de microfissuras em redor dos agregados (Pozo-Antonio, 2015).

Estudos demonstram que a incorporação de fibras sintéticas nas argamassas de cal hidráulica pode reduzir a fissuração por retração, aumentar a resistência mecânica e melhorar a sua durabilidade (Liguori et al., 2015; Veiga, 2017; Rashmi Nayak et al., 2022). A durabilidade das argamassas de cal hidráulica é fundamental para uma reabilitação sustentável (Ruegenberg et al., 2021), uma vez que promove o prolongamento da vida útil de um edifício, contribui para a mitigação das alterações climáticas, reduz a extração de matérias-primas, diminuindo a pressão sobre os ecossistemas.

Os ensaios de envelhecimento acelerado são normalmente utilizados para avaliar a durabilidade das argamassas de revestimento (Maia et al., 2019). A sua seleção depende da relevância do mecanismo de degradação em causa, assim como da formulação da argamassa em estudo. Neste trabalho, apresentam-se os resultados da durabilidade aos ciclos de calor-frio (choque térmico) de uma argamassa à base de cal hidráulica natural (SECIL NHL 3,5) com incorporação de resíduos de máscaras cirúrgicas descartáveis (tipo IIR). Deste modo, o principal objetivo é compreender se a formulação da argamassa adotada é resistente a choques térmicos característicos de ambientes de baixa humidade relativa, e com temperaturas extremas.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS E CARACTERIZAÇÃO

Os resíduos utilizados nas argamassas foram obtidos a partir de máscaras faciais descartáveis do tipo IIR compostas maioritariamente por polipropileno. Estas máscaras são compostas por três camadas distintas: uma camada externa hidrofóbica de cor azul que impede a penetração de gotículas de aerossol, uma camada intermédia filtrante e uma camada interna branca que absorve as gotículas exaladas pelo utilizador.

Para a produção das argamassas, foi utilizada uma cal hidráulica natural (SECIL NHL 3,5), com adição de 2,5% em massa de resíduos de MCD em estado seco, em substituição da massa do agregado. O

critério utilizado para a formulação da argamassa foi adicionar a maior quantidade possível de resíduo, sem haver perda de trabalhabilidade da argamassa no estado fresco.

Para permitir a trabalhabilidade da mistura, a relação água/ligante foi superior na argamassa de cal hidráulica com resíduos de máscara (1,5; ACM) do que na argamassa de referência (0,95; ACH). A mistura dos materiais foi realizada segundo a norma EN 196-1 (2016). A avaliação da consistência, da massa volúmica, e do teor de ar seguiram respetivamente as seguintes normas: EN 1015-3 (1999), EN 1015 – 6 (1998) e, EN 1015-7 (1998). No Quadro 1 apresentam-se os resultados obtidos, verificando-se que os valores de consistência são similares, havendo uma diminuição da massa volúmica e um aumento do teor de ar na ACM.

Quadro 1 – Características das argamassas no estado fresco.

Argamassa	Consistência (mm)	Massa volúmica (kg/m^3)	Teor de ar (%)
AC*	170,0	2,05	3,1
ACM	169,5	1,87	4,5

*Argamassa de referência (REF); ACM: argamassa à base de cal hidráulica com incorporação de resíduos de máscara no estado seco.

No total, foram moldados 24 provetes prismáticos (160 mm × 40 mm × 40 mm), 12 para a ACH (de referência) e 12 para a ACM. Em relação à caracterização das argamassas (ACH e ACM), foram avaliadas características como a velocidade de propagação dos ultrassons (EN 12504-4: 2007), porosidade aberta (EN 1015-10), resistência à compressão e flexão (EN 1015-11: 2019), antes e após o 5º, 10º e 15º ciclos.

2.2 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO: CHOQUE TÉRMICO

Não existe uma metodologia padrão definida para a execução de ciclos de calor-frio para avaliar a durabilidade das argamassas (Nenevê et al., 2022). Neste trabalho, as amostras foram submetidas a ciclos de calor-frio (choque térmico), durante os quais as suas propriedades mecânicas e físicas foram monitorizadas em intervalos regulares antes, durante e após o processo de envelhecimento. As amostras foram sujeitas a pesagens antes e após ida à estufa e ao congelador (Fig. 1). Cada ciclo teve a duração de 24 horas.

Durante a primeira fase, os provetes foram estabilizados a uma temperatura de 40°C para simular uma exposição prolongada ao calor. Na segunda fase, os provetes foram submetidos a um choque térmico negativo ao serem arrefecidas a -22°C (Fig. 1) para replicar quedas acentuadas de temperatura e induzir stress térmico. Na terceira fase, as amostras foram expostas a 100°C durante 5 horas, garantindo a secagem das amostras após a estadia no frio, evitando-se a condensação de água líquida dentro das amostras, e uma degradação adicional devido a mecanismos de gelo-degelo. Para avaliar as suas propriedades mecânicas e físicas ao longo do envelhecimento, foram recolhidas e testadas três amostras prismáticas de cada argamassa em condição pristina e após os 5º, 10º e 15º ciclos.

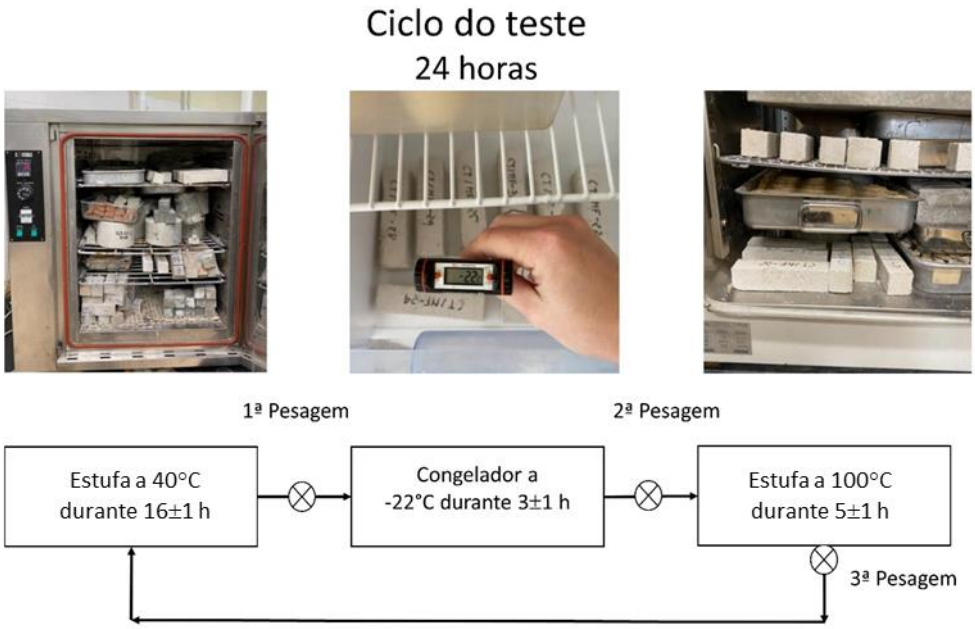


Figura 1 – Ensaio choque térmico: ciclo de calor-frio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CHOQUE TÉRMICO

A Fig. 2A mostra a taxa de variação média na massa das argamassas ACH e ACM ao longo dos 15 ciclos de envelhecimento por choque térmico. Foi observada uma diminuição significativa na massa média em ambas as argamassas, sendo mais pronunciada na ACM, devido à perda de material decorrente da desintegração da matriz nos cantos e arestas. Com a continuação do ensaio, ambas as argamassas exibiram uma tendência geral de perda de massa, sendo mais rápida e mais extensa na ACM.

Após os primeiros cinco ciclos de envelhecimento foi observada uma diminuição significativa no desempenho mecânico das amostras, especialmente na resistência à compressão (Fig. 2B). Após o 5º ciclo, tanto as resistências à flexão quanto à compressão pareceram estabilizar. Na ACH, os valores de resistência à compressão foram superiores ao mínimo de 0,4 MPa (Fig. 2B) estabelecido pela norma EN 998-1 (2012) para argamassas para reboco. Contudo, a descida no desempenho da resistência à compressão é mais acentuada na ACH do que na ACM no 5º ciclo.

A Fig. 2D mostra um decréscimo no módulo da elasticidade dinâmico com o aumento do número de ciclos de envelhecimento para a ACH, podendo as variações no teor de água ser negligenciadas. Esta diminuição pode estar associada à deterioração física do material. Já no caso da ACM, no final do ensaio observa-se um aumento da velocidade. Não foram observadas alterações significativas na porosidade aberta, sendo detetada uma diminuição nos valores de porosidade aberta da ACM no 15º ciclo de envelhecimento (Fig. 2E).

O processo de secagem na estufa a 100 °C pode ter causado a evaporação da água livre dos provetes, provocando danos como microfissuras, evolução da porosidade capilar, colapso de poros finos e transformações mineralógicas (Gallé, 2001). Esta secagem pode explicar porque os resultados da

velocidade de propagação de ultrassons e porosidade aberta na ACM não foram significativos para a duração do ensaio.

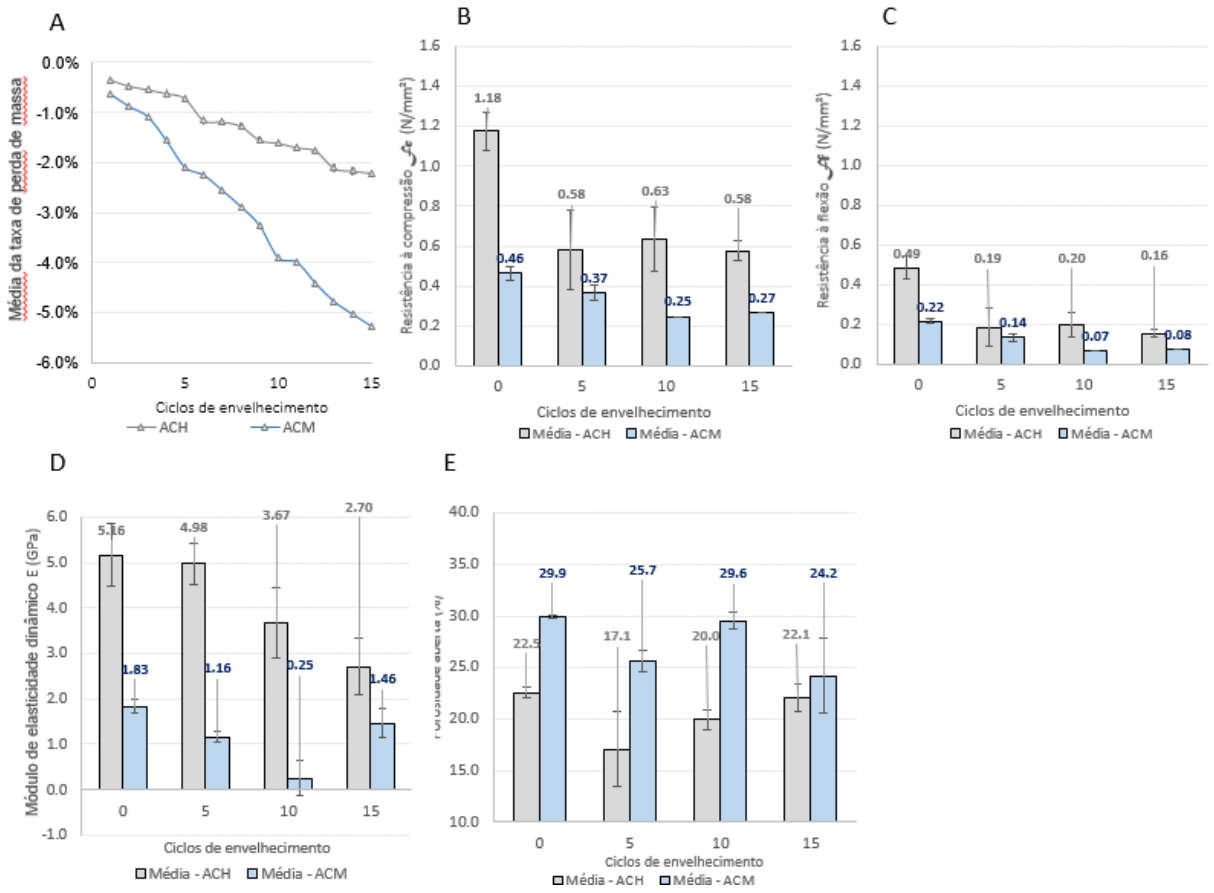


Figura 2 –Perda de massa e propriedades mecânicas e físicas ao longo do envelhecimento da argamassa de referência (ACH) e da argamassa com adição de resíduos de máscara (ACM): A) taxa da variação média da massa das argamassas; B) resistência à compressão (f_c); C) resistência à flexão (f_f); D) módulo de elasticidade dinâmico (E); E) porosidade aberta.

4 CONCLUSÕES

A durabilidade de uma argamassa com incorporação de resíduos de máscaras cirúrgicas descartáveis é fundamental para garantir a adequação técnica, económica e ambiental. A ACM (2,5% em massa de resíduos de máscara em estado seco) sujeita ao ensaio de choque térmico sofreu um decréscimo no desempenho mecânico. Trabalhos futuros devem-se focar na análise da microestrutura das amostras sujeitas a este ensaio de envelhecimento e na caracterização dos poros. Também parece ser necessário considerar uma taxa de adição mais baixa dos resíduos de máscara.

AGRADECIMENTOS

M.P. Mendes declara que recebeu apoio financeiro da Fundação Amélia de Mello no âmbito do projeto ReDuCe (1801P.01109). Este trabalho também foi apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS, no âmbito do

projeto transversal CERIS CAL-TEX. M.I Romero-Gómez, M. Bravo, R. Cardoso, I. Flores-Colen e M.P. Mendes declaram que receberam apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

REFERÊNCIAS

EUROSTAT, 2024- EU trade since 2015 of COVID-19 medical supplies [DS-1180622]. Last update: 21/05/2024.

Gallé, C., 2001. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. Cem. Concr. Res. 31, 1467–1477. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00594-4

Izaguirre, A., Lanas, J., Alvarez, J.I., 2011. Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars. Constr. Build. Mater. 25, 992–1000. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.080

Liguori, B., Caputo, D., Iucolano, F., 2015. Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition. Constr. Build. Mater. 77, 455–460. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.067

Maia, J., Ramos, N.M.M., Veiga, R., 2019. A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems. Constr. Build. Mater. 222, 654–663. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.178

Marini, A., Cominelli, S., Zanotti, C., Giuriani, E., 2018. Improved natural hydraulic lime mortar slab for compatible retrofit of wooden floors in historical buildings. Constr. Build. Mater. 158, 801–813. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.010

Nenevê, B.L., Costa, M.R.M.M., Medeiros-Junior, R.A., 2022. Alternative small-scale accelerated test to measure the effect of thermal shock on rendering mortar properties. J. Build. Eng. 46, 103807. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103807

Pozo-Antonio, J.S., 2015. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. Constr. Build. Mater. 77, 472–478. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115

Rashmi Nayak, J., Bochen, J., Gołaszewska, M., 2022. Experimental studies on the effect of natural and synthetic fibers on properties of fresh and hardened mortar. Constr. Build. Mater. 347, 128550. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128550

Ruegenberg, F., Schidlowski, M., Bader, T., Diekamp, A., 2021. Assessing the influence of the mixing method on porosity and durability of NHL-based renders based on key parameters. Constr. Build. Mater. 276, 122197. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122197

Veiga, R., 2017. Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. Constr. Build. Mater. 157, 132–140. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080

Wang, L., Li, S., Ahmad, I.M., Zhang, G., Sun, Y., Wang, Y., Sun, C., Jiang, C., Cui, P., Li, D., 2023. Global face mask pollution: threats to the environment and wildlife, and potential solutions. Sci. Total Environ. 887, 164055. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164055

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CIRCULARIDADE DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: PRECEDÊNCIA ENTRE ELEMENTOS BASEADA EM MODELOS DIGITAIS PARA DEMOLIÇÃO

André Mantelatto, Artur Kuzminykh; Manuel Parente*; José Granja; Miguel Azenha

University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal, map@civil.uminho.pt

RESUMO

As práticas modernas de demolição devem estar em conformidade com os princípios da economia circular, o que por sua vez é potenciado pela adoção de tecnologias digitais. Metodologias como o Building Information Modeling (BIM) facilitam uma abordagem integrada do planejamento ao longo do ciclo de vida de um ativo de construção com base em dados e modelos. Surgem desafios, particularmente na fase de fim de vida do ativo, devido à ausência de modelos BIM e à interoperabilidade limitada. Ao concetualizar um ativo destinado a demolição ou renovação, adotando a abordagem de o ver como um repositório de materiais e produtos de construção para potencial reutilização, os dados podem ser aproveitados para conceber um processo de desconstrução simplificado. A disponibilização destes dados num formato aberto que permita a integração com mercados de materiais secundários aumenta a possibilidade de planejar o processo de demolição com base na procura. Esta abordagem promove a circularidade, incentivando a reutilização de produtos de construção, o upcycling e a reciclagem de materiais.

Este artigo descreve uma metodologia para extrair os dados dos ativos e facilitar a integração com os algoritmos de otimização de sequência de demolição. Ilustra uma abordagem de aplicação de uma metodologia de extração das precedências entre elementos construtivos a partir da componente geométrica de um modelo BIM de um edifício, adaptada para a demolição. Assim, adotando as técnicas de gestão da informação, os formatos de dados abertos disponíveis e as ferramentas e aplicações de TI distribuídas publicamente, a metodologia proposta potencia uma otimização baseada em modelos BIM e orientada para a procura de atividades de desconstrução alinhadas com os princípios circulares e práticas sustentáveis.

Palavras-chave: Demolição, circularidade, mercados de RCD, otimização, requisitos de informação

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a construção civil teve participação de 7,2% no produto interno bruto (PIB) brasileiro em 2023 (IBGE, 2024). No mesmo ano, este setor contribuiu com 5,7% para o PIB de Portugal de acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE, 2024). Entretanto, ambos países ainda carecem de investimentos para o desenvolvimento tecnológico desta área e de processos mais alinhados com práticas sustentáveis voltadas à economia circular (Comissão Europeia, 2020). A indústria da construção é responsável, por exemplo, pelo consumo de mais da metade de todos os recursos extraídos e minerados (Comissão Europeia, 2020), entre diversos outros impactos ambientais negativos, como poluição, esgotamento de matérias-primas e emissões de gases de efeito estufa. Ademais, estima-se que até 85% de todos estes recursos extraídos virem resíduos (Pacheco-Torgal *et al.*, 2020).

A abordagem da economia circular para a indústria de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) pode ser descrita como uma abordagem de ciclo de vida que otimiza a vida útil de ativos, integrando a fase final de vida do projeto e utilizando novos modelos de propriedade onde os materiais

são armazenados temporariamente no edifício, o qual atua como um banco de materiais (Leising *et al.*, 2018). Assim, surge o tema da rastreabilidade de materiais, juntamente com a questão de como seguir o conceito "cradle-to-cradle" (C2C) – "do berço ao berço" –, rastreando o material ao longo de todas as fases de seu ciclo de vida. Uma forma possível de resolver esta questão passa pela compilação de toda a informação sobre as partes constituintes e elementos dos edifícios numa base de dados abrangente que permita aos utilizadores e à indústria compreenderem os edifícios como bancos de materiais. O problema do gerenciamento de dados, portanto, vem à tona.

Embora, porém, seja claro que a gestão da informação e as tecnologias digitais possam incentivar a adoção de práticas sustentáveis, a indústria da construção é conhecida por ser a que menos investe em tecnologias de informação (Bolpagni *et al.*, 2021), ao contrário de muitos outros setores que já demonstram avanço significativo nestas áreas. Por outro lado, o conceito de BIM, descrito como um conjunto de metodologias capaz de gerar representações digitais de características físicas e funcionais de ativos, tem sido utilizado cada vez mais para suprir estas carências dentro da indústria AECO. O BIM permite abordagens integradas de planejamento e design, que podem ajudar a melhorar o desempenho da indústria, permitindo a previsão e a prevenção de erros, bem como a otimização de processos para fornecer soluções melhores e mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida do ativo (Kim *et al*., 2013). O BIM fornece entrega integrada de projetos, oferecendo uma vantagem de integração entre plataformas e controle de fluxos de informações. Embora o BIM seja frequentemente apontado como uma metodologia para redução de resíduos e impacto ambiental entre soluções digitais, ele tem sido usado apenas ocasionalmente sob essa perspetiva (Kang *et al.*, 2022), que ainda é considerada um domínio subdesenvolvido (Nikmehr *et al.*, 2021).

Industry Foundation Classes (IFC), por sua vez, é uma norma aberta e internacional, certificada através da ISO 16739, criada para permitir a interoperabilidade entre softwares BIM a partir da padronização de processos relativos à informação da construção (International Organization for Standardization, 2024). Entretanto, foi identificada uma lacuna em trabalhos científicos no estado de arte literária atual no tocante à aplicação dos esquemas normativos para determinar relações de precedência de elementos construtivos. A consequente ausência de informação referente à sequência construtiva em modelos IFC fazem, portanto, com que o BIM ainda não tenha atingido toda sua potencialidade para a automação da criação de cronogramas de construção e demolição visando atingir resultados otimizados, a despeito de todo o avanço corroborado em estudos anteriores (Liu et al., 2015; Tamari & Isaac, 2023). Em outras palavras, apesar de haver na norma uma entidade para definir a relação sequencial entre processos (*IfcRelSequence*), não foi constatada nenhuma aplicação prática na sua utilização para determinação de interdependências.

A utilização de simulação 4D para otimizar o cronograma de demolição e a quantificação de materiais para determinar o volume de agregados reciclados são dois exemplos documentados de como o BIM pode ser empregado para apoiar atividades de desconstrução (Ge *et al.*, 2017; Gerra *et al.*, 2020; Won & Cheng, 2017). Há também sugestões para uma auditoria pré-demolição (García *et al.*, 2017) para a utilização de tecnologias digitais. Entretanto, a ausência de bancos de dados compatíveis com modelos BIM de ativos existentes são citados como barreiras para a implementação do BIM neste ambiente (Li *et al.*, 2020; Sobhkhiz *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). Estudos recentes, como o apresentado por Tamari & Isaac (2023), visam integar diversos aspectos de planejamento para gerar cronogramas de construção otimizados. Outros, como Kim *et al.* (2013), propõem uma estrutura para a elaboração automática de cronogramas de construção civil através de dados armazenados em projetos BIM. Todavia, nenhum destes trabalhos foca na integração dos resultados com questões da pauta ambiental.

Neste âmbito, o projeto RecycleBIM promove esforços no desenvolvimento de processos para integração do BIM na economia circular através de cinco objetivos principais: (i) a utilização de técnicas progressivas de captura de dados para possibilitar uma entrada para a modelagem em BIM com métodos semiautomáticos e custos controlados; (ii) fornecimento de requisitos de informação para garantir a quantidade e a qualidade corretas de dados relativos aos materiais contidos nas estruturas; (iii) a utilização de aplicações com formatos de dados abertos para processar a informação e permitir a sua otimização para planejar as atividades de desconstrução e demolição; (iv) uso estratégico e otimizado de resíduos de demolição reciclados em concreto impresso em 3D para práticas de construção digital; (v) fornecimento de registros precisos de circularidade material com contexto geográfico. No projeto, o BIM é considerado como uma metodologia primária para adaptar os sistemas digitais aos processos de construção e demolição, por meio da recolha de dados de forma eficaz e eficiente, da automação e facilidade no desenvolvimento de modelos BIM e do planejamento integrado para gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (Han et al., 2021; Volk et al., 2014).

Para além das contribuições para o projeto RecycleBIM, este artigo visa apoiar-se nas metodologias BIM aplicadas em contexto da demolição e circularidade para suprir a lacuna identificada na bibliografia, ao apresentar uma metodologia que permite a extração automática de uma matriz de precedência de elementos estruturais para construção e demolição de edifícios verticais. Contribuição esta de relevância não somente para o estado de conhecimento atual, uma vez que assiste com uma metodologia inovadora para extrair precedências de um modo interoperável e legível por máquina, como também na aplicação dos resultados em potenciais trabalhos futuros de otimização da sequência de demolição de um edifício, visando à maximização do aproveitamento dos materiais que o constituem e promovendo a circularidade deles. Assim, a estrutura deste artigo passa pela descrição da metodologia seguida para a extração das precedências entre elementos a partir da componente geométrica de modelos BIM (Seção 2), seguida da implementação desta metodologia em um caso de estudo alinhado com os objetivos do projeto RecycleBIM (Seção 3). Finalmente, são tiradas algumas conclusões juntamente com indicação das limitações da metodologia e de trabalhos futuros (Seção 4).

2 DADOS E MÉTODOS

Neste capítulo, será abordado o procedimento adotado para a formulação da metodologia proposta para a extração automática de uma matriz de precedência de elementos estruturais para construção e demolição de edifícios verticais a partir de um modelo IFC. Conforme detalhado na Figura 1, a qual apresenta o processo em linhas gerais, o único dado de entrada necessário neste caso é um modelo IFC do edifício e, como saída, teremos a matriz contendo os elementos construtivos precedecessores e sucessores gerada automaticamente através da metodologia. Para tal, foram consultados os esquemas IFC da BuildingSmart e elaborado um conjunto de regras definidas para a sequência construtiva e desconstrutiva.

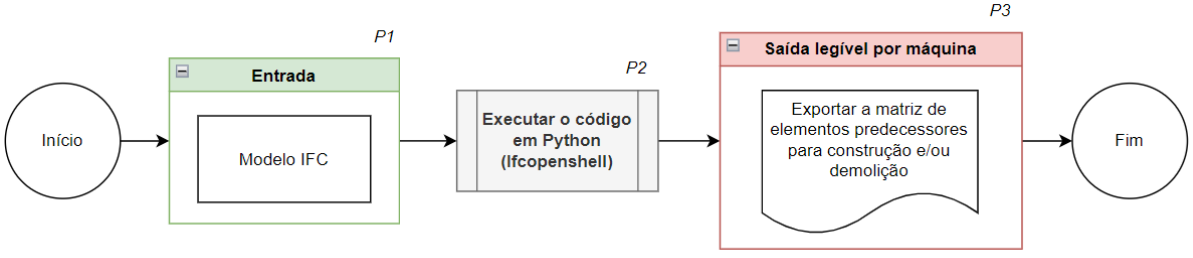


Figura 1 - Procedimento geral

O método baseia-se, primeiramente, na seleção de todos os elementos que possuem superfícies em contato. A seguir, no caso da aplicação da metodologia para determinar a sequência construtiva de edifícios, o procedimento para análise de interdependência entre objetos é executado de baixo para cima, isto é, os elementos que estiverem em cotas inferiores são designados como predecessores, uma vez que suportam outros objetos em contato, porém em cotas superiores. Estes, por outro lado, são incluídos na matriz como sucessores dos primeiros.

Para o caso de demolição de edifícios, foi estabelecida a ordem contrária à construção, sendo os elementos em cotas superiores adicionados à matriz como predecessores daqueles objetos em contato em cotas inferiores e estes, por sua vez, como sucessores. Para exemplificar, tomemos o caso de um pilar (Elemento 1) localizado no segundo andar de um edifício e que suporta duas vigas do terceiro pavimento (Elemento 2 e Elemento 3), conforme ilustra a Figura 2. Como os elementos estão em contato, todos serão incluídos na matriz conforme as regras de precedência implícitas ao procedimento escolhido – construção ou demolição –, garantindo, desta forma, processos seguros e resultados coerentes com a realidade.

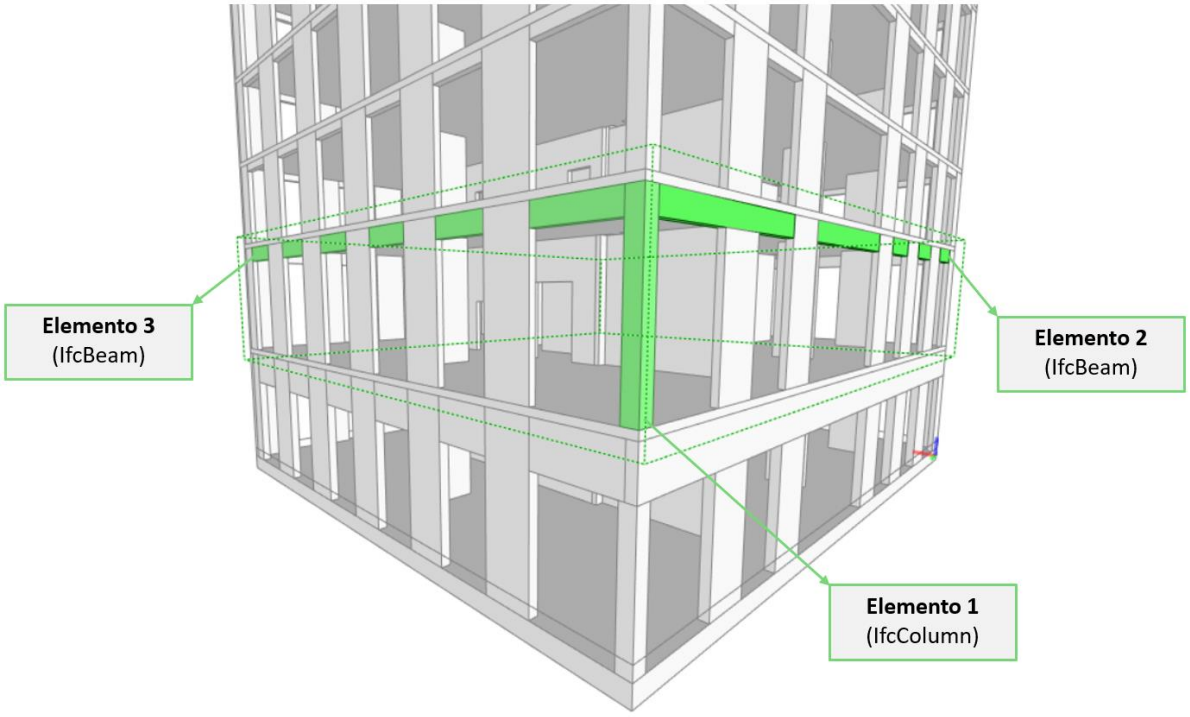


Figura 2 – Exemplo de interdependência entre objetos em contato

Para a elaboração do código, foi utilizada a linguagem de programação orientada a objetos Python. Foram também utilizadas bibliotecas open-source (código aberto) que auxiliam na elaboração do desenvolvimento do código através de funcionalidades desenhadas para realizar tarefas de forma mais eficiente (Van Rossum & Drake, 2009), como ifcopenshell e trimesh.

Ifcopenshell foi desenvolvida para trabalhar com arquivos IFC, permitindo a leitura e edição de modelos BIM. Através desta biblioteca é possível, por exemplo, manipular geometrias, alterar parâmetros, extrair dados, entre outras funcionalidades (IfcOpenShell Contributors, 2024). Trimesh, por sua vez, foi projetada para trabalhar com malhas triangulares (Dawson-Haggerty & Trimesh Contributors, 2024). Com ela, é possível manipular, analisar e visualizar dados de geometria das

malhas. Nesta metodologia, esta biblioteca foi empregada exclusivamente para executar a checagem de colisão entre os elementos construtivos, como será explicado ainda nesta Seção.

A Figura *3* apresenta o diagrama de fluxo do código criado e faz parte do procedimento geral apresentado anteriormente na Figura 1 em P2 – Executar o código em Python (ifcopenshell). A primeira etapa na criação do código, portanto, foi a importação das bibliotecas supracitadas (P2a) e o carregamento do modelo IFC a ser analisado (P2b). A seguir, o usuário deve manualmente escolher o tipo de metodologia a ser empregada na análise (P2c) – construção ou demolição. O código, por sua vez, irá definir automaticamente parâmetros como coordenadas globais (P2d) e criar uma lista para armanezar os dados da matriz de precedência e outra lista para possíveis erros gerados ao longo do processo (P2e). Anteriormente ao início da análise e extração de dados, entretanto, é necessário verificar em qual versão IFC o modelo foi exportado (P2f e P2g), uma vez que esta metodologia foi criada a partir do esquema IFC4 ADD2 TC1. Caso o modelo tenha sido exportado em versões anteriores, uma mensagem de erro será carregada na tela do usuário (P2h).

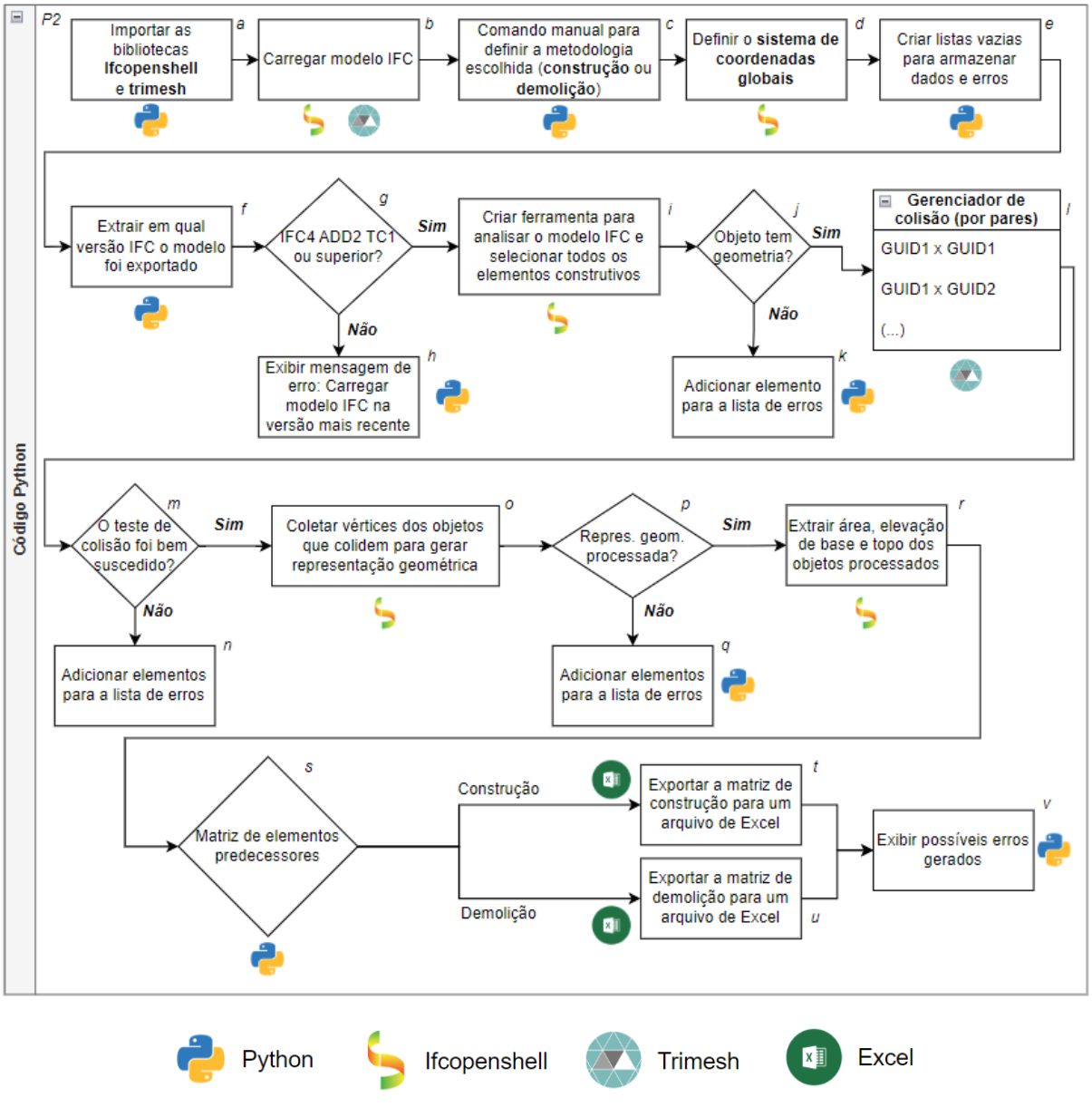


Figura 3 – Metodologia adaptada para código Python

A primeira etapa da análise do modelo IFC corresponde à seleção de todos os elementos construtivos com geometria (P2i), gerando portanto uma matriz com todos os possíveis Identificadores Globais Únicos (GUID's) correlacionados, como exemplifica o Quadro *1*.

Quadro 1 – Matriz de elementos construtivos

A	B
GUID1	GUID1
GUID1	GUID2
GUID1	GUID5
...	...
GUID2	GUID1
GUID2	GUID2
GUID2	GUID5
...	...
GUID5	GUID1
GUID5	GUID2
GUID5	GUID5

A seguir, a biblioteca trimesh será utilizada para verificar a colisão dos pares de objetos da matriz gerada (P2l) e, caso eles colidam, serão coletados os vértices de suas geometrias para gerar uma representação geométrica (P2o) e serão extraídas as informações de área, elevação inferior e superior (P2r). Além disso, ambos serão adicionados à uma nova matriz de elementos predecessores (P2s), segundo as regras descritas abaixo em a) caso a metodologia escolhida tenha sido construção; e em b) caso a metodologia escolhida tenha sido demolição.

a) Construção:

- GUID do objeto 1 é diferente do GUID do objeto 2 – para filtrar apenas elementos distintos;
- Área do objeto 1 e área do do objeto 2 são maiores que zero – para filtrar apenas elementos com superfícies;
- Caso a elevação inferior do objeto 1 seja menor do que a elevação inferior do objeto 2, ele será adicionado como precedessor. Caso contrário, como sucessor;
- Caso as elevações inferiores do objeto 1 e do objeto 2 sejam iguais, será considerada a elevação superior;
- Caso a elevação superior do objeto 1 seja menor do que a elevação superior do objeto 2, ele será adicionado como precedessor. Caso contrário, como sucessor;
- Caso as elevações superiores do objeto 1 e do objeto 2 sejam iguais, será considerada a área total dos objetos;
- Caso a área do objeto 1 seja maior do que a área do objeto 2, ele será adicionado como precedessor. Caso contrário, como sucessor.

b) Demolição:

- Caso a metodologia escolhida pelo usuário tenha sido demolição, as mesmas verificações são aplicadas, todavia as regras são opostas – elementos com maiores elevações superiores e inferiores e menores áreas são predecessores aos elementos com menores elevações superiores e inferiores e maiores áreas. Ademais, a verificação da elevação superior é realizada anteriormente à verificação da elevação inferior.

Por fim, a matriz é expotada para um arquivo Excel (P2t e P2u) em interface visualmente amigável ao usuário e de modo a ser legível por máquinas. Se faz importante ressaltar que os processos (P2j, P2m e P2p) são verificações para filtrar apenas elementos geométricos e surgem em redundância para salvaguardar o resultado final de erros de modelação. O objetos que falharem nestas verificações são adicionados à lista de erros (P2k, P2n e P2q) que será, posteriormente, exibidas ao usuário (P2v).

3 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo aplicado para testar a metodologia proposta se baseia na demolição da estrutura civil de um edifício vertical de treze níveis, composto por lajes, vigas, pilares e paredes estruturais em concreto armado, conforme ilusta a Figura *4*. O prédio foi modelado utilizando o software Autodesk Revit 2022 (Autodesk Inc., 2022) e exportado para a versão IFC4 ADD2 TC1.

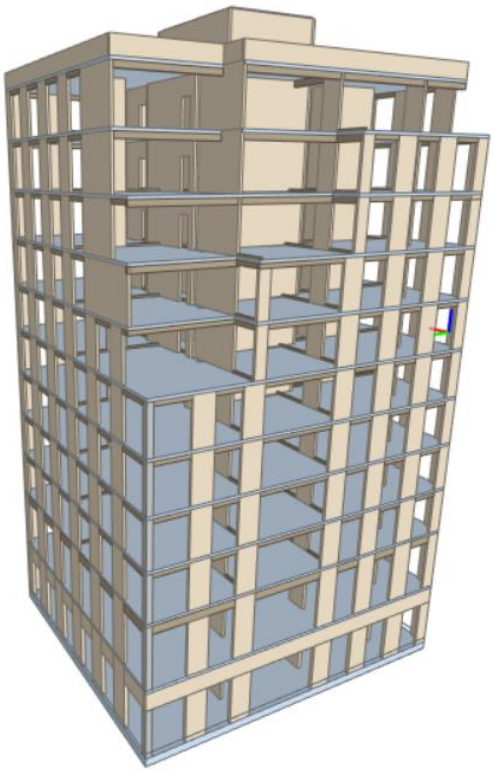


Figura 4 – Modelo IFC de entrada

É importante salientar que, apesar de o modelo IFC dispor de dados relevantes ao projeto, ele não contém nenhuma informação quanto à interdependência entre elementos, como já era esperado tendo em vista a lacuna identificada na revisão bibliográfica, mas reforçando, assim, a importância deste trabalho.

O arquivo IFC foi utilizado como dado de entrada no código de programação descrito na Seção 2, e a metodologia executada em um sistema operacional Windows 11 com processador Inter Core i7 (11ª geração) 2.30 GHz. O tempo total de processamento foi de 20393.65 s (aproximadamente 5.66 h). Como saída, obtivemos um arquivo em Excel contendo a matriz de elementos predecessores para demolição do edifício, abrangendo um total de 1483 resultados, conforme pode ser visto na Figura *5*, a qual apresenta as primeiras 25 linhas. A matriz é constituída por dez colunas, representadas (da esquerda para a direita) por:

- A – Identificador global único do objeto sucessor;
- B – Classe IFC do objeto sucessor;
- C – Elevação inferior do objeto sucessor;
- D – Elevação superior do objeto sucessor;
- E – Área do objeto sucessor;
- F – Identificador global único do objeto predecessor;
- G – Classe IFC do objeto predecessor;
- H – Elevação inferior do objeto predecessor;
- I – Elevação superior do objeto predecessor;
- J – Área do objeto predecessor.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Object's Guid	Object's IfcClass	Object's Bottom Elevation	Object's Top Elevation	Object's Total Area	Precedence's Guid	Precedence's IfcClass	Precedence's Bottom Elevation	Precedence's Top Elevation	Precedence's Total Area
2	0LtDkbt1f1MOyCeToEoiW3	IfcBeam	3.9	4.5	30.46	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
3	0LtDkbt1f1MOyCeToEoiW4	IfcBeam	3.9	4.5	21.55	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
4	0LtDkbt1f1MOyCeToEoiW6	IfcBeam	3.9	4.5	21.55	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
5	0MRie6hv98wRscntvUbCwB	IfcWall	-5.3	-0.32	61.82	0MRie6hv98wRscntvUbCsu	IfcWall	-5.3	-0.32	7.69
6	0XfigbToj4yBABjeSU0QcM	IfcWall	11.9	15.5	24.8	1f_YqF_ID6nfQK2lMbMzQd	IfcSlab	15.3	15.5	1086.77
7	0XfigbToj4yBABjeSU0QcQ	IfcWall	11.9	15.5	40.72	1f_YqF_ID6nfQK2lMbMzQd	IfcSlab	15.3	15.5	1086.77
8	0XfigbToj4yBABjeSU0QcU	IfcWall	11.9	15.3	5.32	0XfigbToj4yBABjeSU0QcM	IfcWall	11.9	15.5	24.8
9	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfr	IfcWall	8.3	11.9	24.8	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZ$4	IfcSlab	11.7	11.9	1086.77
10	0XfigbToj4yBABjeSU0Qft	IfcWall	8.3	11.7	33.4	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZ$4	IfcSlab	11.7	11.9	1086.77
11	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfv	IfcWall	8.3	11.9	40.72	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZ$4	IfcSlab	11.7	11.9	1086.77
12	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfx	IfcWall	8.3	11.9	3.98	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZ$4	IfcSlab	11.7	11.9	1086.77
13	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfz	IfcWall	8.3	11.7	5.32	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfr	IfcWall	8.3	11.9	24.8
14	0XfigbToj4yBABjeSU0Qfz	IfcWall	8.3	11.7	5.32	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZ$4	IfcSlab	11.7	11.9	1086.77
15	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJv$	IfcWall	-0.1	4.5	9.71	2Gvz1zWerBMPG9HJhLsZdp	IfcBeam	3.9	4.5	24.08
16	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJv$	IfcWall	-0.1	4.5	9.71	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
17	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJvz	IfcWall	-0.1	4.5	11.63	0LtDkbt1f1MOyCeToEoiW6	IfcBeam	3.9	4.5	21.55
18	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJvz	IfcWall	-0.1	4.5	11.63	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJv$	IfcWall	-0.1	4.5	9.71
19	0jh05JXBHCfeF7xAVGhJvz	IfcWall	-0.1	4.5	11.63	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
20	0wTdscteD4Sg5bv86tqu3m	IfcWall	-0.1	4.5	5.2	0wTdscteD4Sg5bv86tqvz3	IfcWall	-0.1	4.7	34.16
21	0wTdscteD4Sg5bv86tqu3m	IfcWall	-0.1	4.5	5.2	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
22	0wTdscteD4Sg5bv86tqu4c	IfcWall	-0.1	4.7	7.26	0wTdscteD4Sg5bv86tquJQ	IfcWall	4.7	8.3	40.72
23	0wTdscteD4Sg5bv86tqu4c	IfcWall	-0.1	4.7	7.26	0wTdscteD4Sg5bv86tquNA	IfcWall	4.7	8.3	3.98
24	0wTdscteD4Sg5bv86tqu4c	IfcWall	-0.1	4.7	7.26	3BShmMMLv0yxdyNuRLN$77	IfcSlab	4.5	4.7	1086.77
25	0wTdscteD4Sg5bv86tqu8W	IfcWall	-0.1	4.7	44.7	0wTdscteD4Sg5bv86tqu8y	IfcWall	-0.1	4.7	16.2

Figura 5 – Dados de saída (matriz de elementos predecessores de demolição)

Além da matriz, outra saída gerada pelo código de programação foi a lista de erros gerados durante a operação, neste caso exibida na tela do usuário. Foram identificados três tipos de falhas: (i) Falha no teste de colisão – Figura *6*; (ii) Falha no processamento de geometria – Figura 7; e (iii) Elementos duplicados – Figura 8. Todas as três figuras a seguir representam apenas uma parcela dos dados exibidos.

```
Clash collision failed: 0J7iqywAv8uxP1CGW1JbmP, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhW - '1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhW'
Clash collision failed: 0J7iqywAv8uxP1CGW1JbmP, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhY - '1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhY'
Clash collision failed: 0J7iqywAv8uxP1CGW1JbmP, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhk - '1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhk'
```

Figura 6 – Elementos identificados em falha no teste de colisão

```
Geometry creation failed: (True, {('object1', 'object2')}), 151kkIIt1CZhbQLuvKAt38, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhk - Failed to process shape
Geometry creation failed: (True, {('object1', 'object2')}), 1CmlX7995EvAYRjg9tuTwS, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhW - Failed to process shape
Geometry creation failed: (True, {('object1', 'object2')}), 1N4yd2hL17TvdMagQKCe_v, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhW - Failed to process shape
Geometry creation failed: (True, {('object1', 'object2')}), 1N4yd2hL17TvdMagQKCfLg, 1w3C5hV7fCCR6zVCAFRGhY - Failed to process shape
```

Figura 7 – Elementos identificados em falha no processamento de geometria

```
Check if there are elements duplicated: IfcWall, 1TqccMlaL65eUKBizh5K7m, -0.1, 4.5, 16.850000000000087 and IfcWall, 1TqccMlaL65eUKBizh5KBn, -0.1, 4.5, 16.850000000000087
Check if there are elements duplicated: IfcWall, 1TqccMlaL65eUKBizh5KBn, -0.1, 4.5, 16.850000000000087 and IfcWall, 1TqccMlaL65eUKBizh5K7m, -0.1, 4.5, 16.850000000000087
```

Figura 8 – Elementos duplicados

Em inspeção minusciosa no modelo de entrada, foi observado que os elementos não processados (falhas *i* e *ii*) tratam-se de vigas ausentes de geometrias resultantes de possível imprecisão na fase de modelação. Práticas como a de sobrepor elementos distintos e, então, uní-los, podem ser a causa deste tipo de ocorrência. A falha *iii*, por sua vez, refere-se a dois elementos exatamente iguais criados em duplicidade e sobrepostos nas mesmas coordenadas globais.

A validação da matriz foi realizada de forma manual por amostragem comparando-se a relação de precedência do modelo de entrada com os resultados obtidos. A determinação da amostragem foi realizada estatisticamente, através do cálculo de amostragem aleatória simples apresentado na Equação (1) (Rea & Parker, 2000):

$$n = \frac{N.Z^2.p.(1-p)}{(N-1).e^2 + Z^2.p.(1-p)} \quad (1)$$

Onde:

- *n* é o tamanho da amostra;
- *N* é o tamanho da população (neste caso, a matriz contém 1483 elementos);
- *Z* é o valor correspondente ao nível de confiança desejado (neste caso, 1,645 para 90% de confiança);
- *p* é a proporção estimada da população que possui a característica de interesse (neste caso, 0,5 para maximizar o tamanho da amostra);
- *e* é a margem de erro tolerável (neste caso, 10% ou 0,1).

Portanto, temos que o tamanho da amostra a ser validado para uma população de 1483 elementos, com um nível de confiança de 90% e uma margem de erro de 10% é de, aproximadamente, 65 elementos. Portanto, foram escolhidos aleatoriamente 65 resultados da matriz de elementos predecessores e verificados manualmente no modelo IFC. Foi obtido, desta forma, um percentual de acertos de 98,5%, o que indica que a metodologia proposta é válida. O único resultado não coerente refere-se à relação de precedência para um objeto sem geometria, ou seja, este elemento específico foi inserido incorretamente na matriz, apesar da criação de filtros no código de programação para selecionar apenas elementos com superfícies.

4 CONCLUSÕES

Através do manuseio de dados intrínsecos aos modelos IFC e por meio da elaboração de um código de programação, foi possível extrair uma matriz contendo as relações de interdependência entre os elementos estruturais, seja para a construção ou para a demolição de edifícios verticais. Este estudo,

todavia, limita-se na análise apenas de projetos de estrutura civil. Trabalho futuros devem expandir a atuação desta metodologia para outras disciplinas – como arquitetura, sistemas MEP (mechanical, eletrical and plumbing) etc. –, através da elaboração de novas regras a serem integradas no método aqui apresentado. Além disto, deve-se também verificar mais a fundo a questão de elementos sem geometria serem inseridos na matriz, apesar do código de programação escrito conter filtros que, supostamente, deveriam impossibilitar ocorrências como esta.

Por meio da aplicação da metodologia proposta em um estudo de caso realista, foi possível provar sua eficácia e confiabilidade para futuras aplicações em trabalhos, como, por exemplo, de otimização de cronogramas de planejamento, visando determinar a melhor sequência construtiva ou de demolição e, consequentemente, promovendo soluções mais econômicas e sustentáveis. No que se refere à demolição do edifício em pauta, este estudo viabiliza a adoção de técnicas digitais para promover a integração de princípios da economia circular no contexto da construção civil, consoantes com a proposta do projeto RecycleBIM voltada à melhores práticas ambientais.

Este trabalho, portanto, é um avanço no desenvolvimento da automação de uma etapa do planejamento construtivo hoje realizada de forma manual e morosa, impedindo, assim, o atingimento de soluções otimizadas (Tamari & Isaac, 2023). Ademais, promove de forma mais abrangente a manipulação de dados inerentes ao modelo IFC e a utilização dos recursos disponíveis através das potenciais tecnologias possibilitadas pela implementação da metologia BIM.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela ERA-MIN 3, cujo financiamento provém da União Europeia no âmbito do Programa Horizonte 2020 através do Grant Agreement No. 101003575 da Comissão Europeia. Este trabalho foi também parcialmente financiado pela FCT / MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB / 04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

Autodesk Inc. (2022). Autodesk Revit (Version 2022). Recuperado de https://www.autodesk.com/products/revit/overview a 22 de junho de 2024

Bolpagni, M., Gavina, R., & Ribeiro, D. (2021). Industry 4.0 for the Built Environment. Methodologies, Technologies and Skills (Vol. 20). Springer. https://link.springer.com/bookseries/15775

Comissão Europeia. (2020). A new Circular Economy Action Plan. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF a 22 de junho de 2024

Dawson-Haggerty, M., & Trimesh Contributors. (2024). Trimesh (Version 4.4.1). Recuperado de https://trimsh.org/ a 22 de junho de 2024

García, D., Plazaola, X., Vegas, I., & Areizaga, P. (2017). International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste BIM for pre-demolition and refurbishment inventories and waste information management

Ge, X. J., Livesey, P., Wang, J., Huang, S., He, X., & Zhang, C. (2017). Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study. Visualization in Engineering, 5(1). https://doi.org/10.1186/s40327-017-0050-5

Guerra, B. C., Leite, F., & Faust, K. M. (2020). 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams. Waste Management, 116, 79–90. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.07.035

IfcOpenShell Contributors. (2024). IfcOpenShell (Version 0.7.0). Recuperado de https://ifcopenshell.org/ a 22 de junho de 2024

International Organization for Standardization (ISO). (2024). Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries -- Part 1: Data schema (ISO Standard No. 16739-1:2024).

Kang, K., Besklubova, S., Dai, Y., & Zhong, R. Y. (2022). Building demolition waste management through smart BIM: A case study in Hong Kong. Waste Management, 143, 69–83. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.027

Kim, H., Anderson, K., Lee, S., & Hildreth, J. (2013). Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. Automation in Construction, 35, 285–295. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.020

Leising, E., Quist, J., & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. Journal of Cleaner Production, 176, 976–989. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.010

Li, C. Z., Zhao, Y., Xiao, B., Yu, B., Tam, V. W. Y., Chen, Z., & Ya, Y. (2020). Research trend of the application of information technologies in construction and demolition waste management. In Journal of Cleaner Production (Vol. 263). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121458

Liu, H., Al-Hussein, M., & Lu, M. (2015). BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. Automation in Construction, 53, 29–43. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.008

Nikmehr, B., Hosseini, M. R., Wang, J., Chileshe, N., & Rameezdeen, R. (2021). Bim-based tools for managing construction and demolition waste (CDW): A scoping review. Sustainability (Switzerland), 13(15). https://doi.org/10.3390/su13158427

Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., Colangelo, F., Tuladhar, R., & Koutamanis, A. (2020). Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment. In Advances in Construction and Demolition Waste Recycling

Rea, L. M., & Parker, R. A. (2000). Desenvolvendo perguntas para pesquisas. Metodologia de pesquisa: do planejamento à execução (pp. 262-262). São Paulo: Pioneira.

Sobhkhiz, S., Taghaddos, H., Rezvani, M., & Ramezanianpour, A. M. (2021). Utilization of semantic web technologies to improve BIM-LCA applications. Automation in Construction, 130. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103842

Tamari, M., & Isaac, S. (2023). Fully integrated construction planning. Automation in Construction, 154, 105027. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105027

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. In Automation in Construction (Vol. 38, pp. 109–127). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

Wang, J., Wei, J., Liu, Z., Huang, C., & Du, X. (2022). Life cycle assessment of building demolition waste based on building information modeling. Resources, Conservation and Recycling, 178. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106095

Won, J., & Cheng, J. C. P. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. Automation in Construction, 79, 3–18. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ECONOMIA CIRCULAR DO AÇO NUMA SIDERÚRGICA

Alberto Casado Lordsleem Jr.[a]; Clarissa Sena de Andrade[b]

[a]Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 50720-001, Recife, Brasil, acasado@poli.br

[b] Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 50720-001, Recife, Brasil, clarissasena981@gmail.com

RESUMO

A tradicional economia linear é caracterizada pelo consumo de recursos finitos na prática regular da extração, produção e descarte, cujas consequências causam preocupação recorrente na sociedade. Por outro lado, a economia circular busca o progresso econômico associado à otimização de recursos naturais através do desenvolvimento dos processos de fabricação com o emprego de matéria-prima alternativa, priorizando insumos duráveis, recicláveis e renováveis. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva descrever a aplicação da economia circular do aço em siderúrgica, destacando os impactos para a sustentabilidade econômica, social e do meio-ambiente. A metodologia da pesquisa contemplou estudo de caso com etapas de revisão da literatura, investigação em campo e análise dos dados coletados. A investigação em campo consistiu em observação direta e análise de documentação, além de visitas e entrevistas com os gestores da empresa estudada. Os resultados demonstraram os impactos positivos do modelo de negócio no contexto da economia circular, com a redução de emissão de gases de efeito estufa em aproximadamente 50% em relação à média global; redução da energia gasta durante fabricação do aço em 8,90%, mesmo diante do aumento da produção de 5,53%. Ressalte-se também o reaproveitamento histórico crescente de resíduos para a produção do aço. A principal contribuição desta pesquisa reside na sistematização das ações que caracterizam a economia circular do aço numa siderúrgica, através da qual se incentiva processos sustentáveis na indústria da construção civil, reduzindo o consumo de matérias-primas, energia e emissões, ainda assim aumentando a rentabilidade num ambiente sustentável.

Palavras-chave: Economia circular, Sustentabilidade, Gases de Efeito Estufa, Aço, Siderúrgica.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por 37% dos gases de efeito estufa emitidos na atmosfera, sendo apontada como a indústria com maior impacto na sustentabilidade ambiental (Huang et al., 2018; United Nations Environment Programme, 2022). Além disso, o setor é o maior consumidor de matéria-prima, gerando cerca de 35% dos resíduos de aterros urbanos (Ghaffar; Birman; Braimah, 2020).

Essa situação constitui-se num desafio social devido ao crescente volume de resíduos da construção civil, onde no Brasil apresenta mais de 60% da coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) nas cidades, como consequência de um modelo econômico linear (Abrelpe, 2020).

Como opção para redução do uso de materiais primários e seus impactos ambientais, por meio de diferentes estratégias que substituem o fim da vida útil, como redução, reutilização e reciclagem de materiais nos processos de produção/distribuição e consumo, destaca-se a economia circular (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

A Economia Circular (ciclo infinito), propõe mudanças na forma de pensar e agir em relação ao consumo de bens e serviços, favorecendo a reintegração dos resíduos ao ciclo produtivo/consumo infinitas vezes (Ruiz et al., 2020).

No Brasil, o principal marco regulatório que aborda a economia circular é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), introduzida em 2010 pela Lei nº 12.305 (Brasil, 2010), sendo pioneiro nos países da América Latina e Caribe a implementar a legislação relacionada à gestão de resíduos (Guarnieri; Cerqueira-Streit; Batista, 2020).

No entanto, a economia circular não está formalmente expressa nas leis nacionais e tem sido abordada de forma descentralizada, com implementação incipiente e o conceito ainda pouco compreendido. Os sistemas da Economia Circular estão baseados na reutilização, reparação, recondicionamento, remanufatura e reciclagem dos produtos. O retorno ao ciclo produtivo, permite tratar os resíduos de forma biológica e técnica, sendo pensados desde seu design para que possam recircular de forma segura e com qualidade (Abdalla; Sampaio, 2018), ampliando as possibilidades de negócios relacionados direta ou indiretamente com a Economia Circular.

A economia circular abrange diversas áreas, inclusive a industrial, através da remanufatura, que permite a transformação de produtos usados ou com defeitos em produtos novos, com um novo ciclo de vida (Alamerew; Brissaud, 2020).

Particularmente, na indústria do aço não é diferente. As siderúrgicas no Brasil estão distribuídas em 10 estados brasileiros, com maior concentração na região do Sudeste, 92% da produção (Ellen Macarthur Foundation, 2017; Instituto Aço Brasil, 2024). O aço é o material mais reciclável do mundo, podendo ser continuamente reciclado sem perda de qualidade, e reaproveitado como matéria-prima através da sucata. A adoção do conceito de economia circular no setor vem possibilitando o reuso inteligente e eficaz de matéria-prima, insumos e resíduos (Instituto Aço Brasil, 2024).

Diante do contexto apresentado, o presente trabalho tem por objetivo descrever através de um estudo de caso a aplicação da economia circular do aço em siderúrgica, demonstrando os impactos causados pelo modelo de negócio da empresa na sustentabilidade econômica, social e ambiental.

2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO E A ECONOMIA CIRCULAR

A Organização Internacional do Trabalho considera que o setor siderúrgico responde por 3% das pessoas empregadas no mundo, contribuindo com 3,8% do PIB global (World Steel Association, 2020). Estima-se que a demanda mundial por aço dobrará até 2050, segundo a *World Steel Association* (2021), situação que contribui sobremaneira para aumento do consumo de recursos, visto que dentre os segmentos industriais, a siderurgia é o maior consumidor de energia (Milford et al., 2011).

Diante da situação, o processo de produção do aço é determinante para o crescimento estratégico e sustentável deste segmento, assim como reavaliar o modelo de negócio vigente. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2024), existem dois tipos de usinas siderúrgicas: as integradas (utilizam o minério de ferro como matéria-prima de forma majoritária) e as semi-integradas (utilizam a sucata como fonte principal da produção do aço). A Figura 1 ilustra o processo de produção do aço.

Nas usinas integradas, a primeira etapa consiste na preparação da matéria-primas bruta (Etapa 1) - minério de ferro – o qual é processado via pelotização (aglomeração dos finos em pelotas de tamanho definido para eficiência do alto-forno) ou via sinterização (preparado quanto às características físicas e químicas). A adição de sínter, coque e madeira (Etapa 2) dentro do alto-forno (Etapa 3) promovem a produção de ferro-gusa (liga de ferro e carbono), por meio da redução induzida pelo coque. Os

fundentes e escorificantes são adicionados com a função de formar compostos com maior ponto de fusão ao agregar-se com impurezas do minério de ferro e carvão. No refino (Etapa 4) é inserido o oxigênio para oxidar carbono, manganês, silício e fósforo presentes no ferro-gusa. O metal líquido vai para o lingotamento (Etapa 5), seguindo para a conformação mecânica através da laminação (Etapa 6).

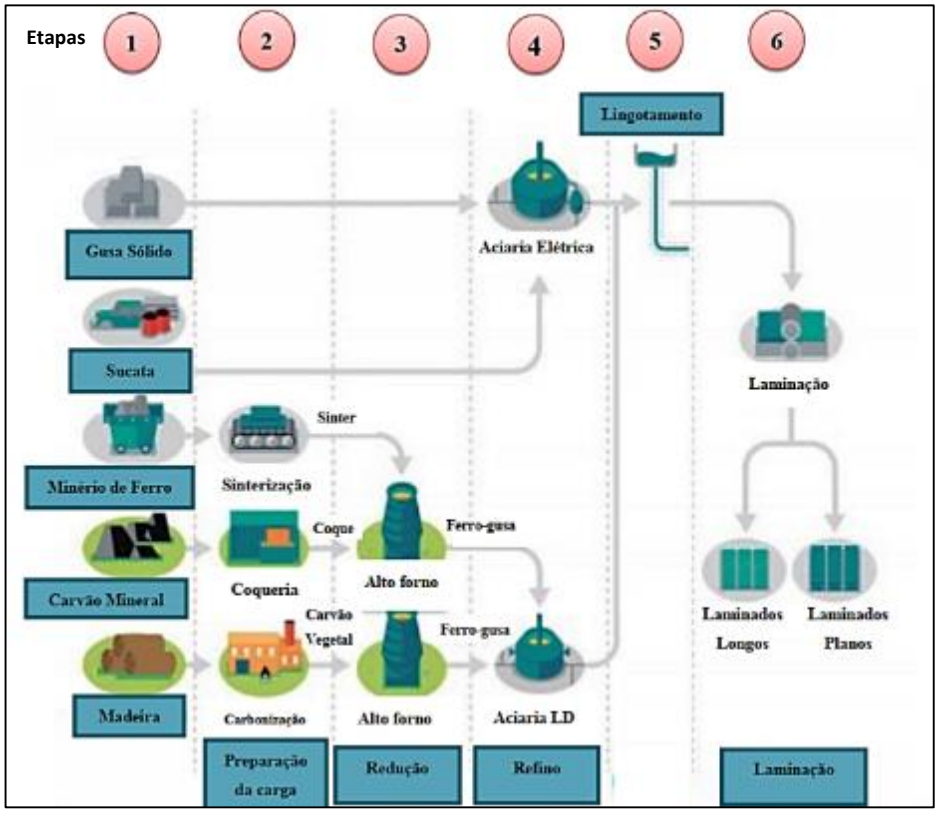


Figura 1 - Produção do aço (Instituto Aço Brasil, 2024)

Nas usinas semi-integradas, foco deste trabalho - modelo de negócio da economia circular, a produção de aço ocorre pela fusão metálica (sucata, ferro-gusa) nas aciarias elétricas/forno elétrico no refino (Etapa 4), eliminando-se as Etapas 2 e 3, seguindo para o lingotamento (Etapa 5) e a laminação (Etapa 6). A principal vantagem das usinas semi-integradas é a ausência da etapa de redução de minério de ferro, diminuindo a complexidade da produção e a redução de custos e da emissão de CO2.

Segundo dados da *World Steel Association* (2021), uma tonelada de aço produzido com sucata ferrosa reciclada equivale a deixar de emitir 1,5 tonelada de gases de efeito estufa. A Figura 2 ilustra a emissão de CO_2 pelas usinas integradas e semi-integradas.

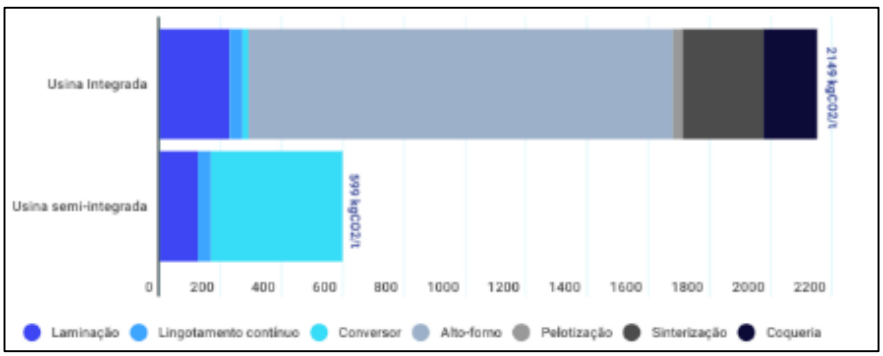


Figura 2 - Usinas integradas versus semi-integradas na emissão de CO2 (Chalabyan et al., 2019)

Além de ser menos poluente, as usinas semi-integradas apresentam outras vantagens: ativada e desativada com maior facilidade, podem produzir aço em quantidades menores, mais flexível com os ajustes de níveis de produção de acordo com a demanda de aço e fazem a utilização de sucata se expondo menos à disponibilidade de minério de ferro (Mercado, 2018).

A tendência mundial é de que haja uma adoção cada vez maior de usinas semi-integradas (também denominadas de mini-mills), visto que em 2020, a produção mundial de aço bruto já era 27,7% através de usinas semi-integradas; enquanto, o restante em usinas integradas (World Steel Association, 2021).

O papel da usina siderúrgica semi-integrada é fundamental para a economia circular na transformação da sucata em aço, contribuindo para a preservação do meio ambiente, para a redução do uso de energia necessária no processo de produção de aço e para gerar oportunidades de trabalho a milhares de pessoas por meio da coleta e processamento de sucata para reciclagem.

3 DADOS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, adotou-se o método de pesquisa qualitativa com a realização de um estudo de caso. Dias Filho (2008) destaca os principais elementos da pesquisa qualitativa: o ambiente natural como fonte direta de dados e o pesquisador como seu principal instrumento; ser descritiva; a preocupação com o processo é muito maior do que com o produto; a análise de dados tende a seguir um processo indutivo.

Desta forma, essa pesquisa caracteriza-se por ser qualitativa, pois tem seu foco na descrição do processo produtivo do aço, procurando abordar o modelo de negócio voltado a uma economia circular em um estudo de caso de uma usina semi-integrada, e sua importância para a sustentabilidade do meio ambiente, econômica e social.

Este trabalho está estruturado em 3 etapas principais, sendo a primeira etapa relativa à revisão da literatura, e as duas outras etapas, sobre a investigação em campo e a análise de dados coletados.

3.1 REALIZAÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA

Foi realizada a revisão narrativa da literatura para construir o referencial teórico, que se tornou importante para a contextualiação temática abordada. O levantamento da literatura é a localização e a obtenção de documentos para avaliar a disponibilidade de material que subsidiará o tema do trabalho de pesquisa (Gonçalves; Barroso, 2019).

Foram pesquisadas publicações pertinentes ao foco do estudo, conforme descrição nos capítulos 1 e 2 deste trabalho, relativas ao tema para construir o quadro teórico e contextualizar a temática. A pesquisa bibliográfica se deu no período de 2015-2024 na plataforma google acadêmico e também, plataformas para obter informações técnicas como o Instituto Aço Brasil e a World Steel Association.

3.2 INVESTIGAÇÃO EM CAMPO COM ANÁLISE DESCRITIVA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa de campo de natureza descritiva, com fontes de evidências adotadas como: observação direta e análise de documentos.

Foi realizado um estudo de caso com o intuito de avaliar as etapas do processo de produção do aço sob a visão do responsável da área, além da realização de visitas nas áreas de produção para se obter uma visão técnica e profissional, conforme sequêndia ilustrada na Figura 03.

Figura 3 - Visitas técnicas às áreas da siderúrgica estudada

Assim, foram feitas entrevistas ao gestor e especialista da área de metálicos, no qual são responsáveis pela comercialização e recebimento da sucata na usina. Também foram realizadas entrevistas ao especialista e analista da área da aciaria, nos quais são responsáveis pela transformação da sucata em tarugo e ao especialista de laminação para entender como ocorre o processo de transformação do tarugo em vergalhão.

Por se tratar de uma pesquisa qualitativa, optou-se pela entrevista como instrumento complementar de coleta de dados, que também permitiu obter informações dos sujeitos do estudo por meio da interação oral.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Foi realizada a análise de dados a partir da pesquisa documental e investigação de campo, através das quais as informações foram compiladas, analisadas criticamente de forma a caracterizar e descrever o processo siderúrgico da usina.

A estratégia de pesquisa documental serviu para realizar mediações na discussão com a literatura, resgatando-se normas técnicas, materiais disponibilizados pela siderúrgica estudada - cursos, materiais e site da empresa estudada; foi resgatado também o relatório anual de 2020. O Quadro 1 reúne as principais análises realizadas no estudo de caso.

Quadro 1 - Principais análises do estudo de caso

Parâmetro	Quantificação
Emissões de CO2	Emissão total (tCO2) e por tonelada de aço (t CO2/t aço)
Consumo de energia	Consumo total de energia por tonelada de aço (GJ/t aço)
Matérias-primas	Toneladas de Gusa, Ligas, Carburantes e Sucata
Coprodutos	Reaproveitamento (%)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A empresa estudada atua no segmento de siderurgia como produtora de aços planos e longos, minério de ferro e apresenta usinas integradas e semi-integradas, assim como opera no mercado reciclando a sucata, a qual representa 73% de sua matéria-prima. Essa sucata é transformada em aço voltando para uso na construção civil, na agropecuária, em automóveis, na infraestrutura e na energia.

Nechifor et al. (2020) indicam que a adoção da sucata como insumo na indústria siderúrgica favorece a redução dos impactos ambientais e fornece direcionamento para uma economia circular. A utilização de materiais reciclados e novas tecnologias na produção de aço requer a utilização de menos recursos, incentivando uma circularidade nos processos de produção (Mulvaney et al., 2021). Por esses motivos que o modelo de negócio da empresa estudada é caracterizado como economia circular.

A Figura 4 apresenta um esquema resumido da economia circular da empresa estudada.

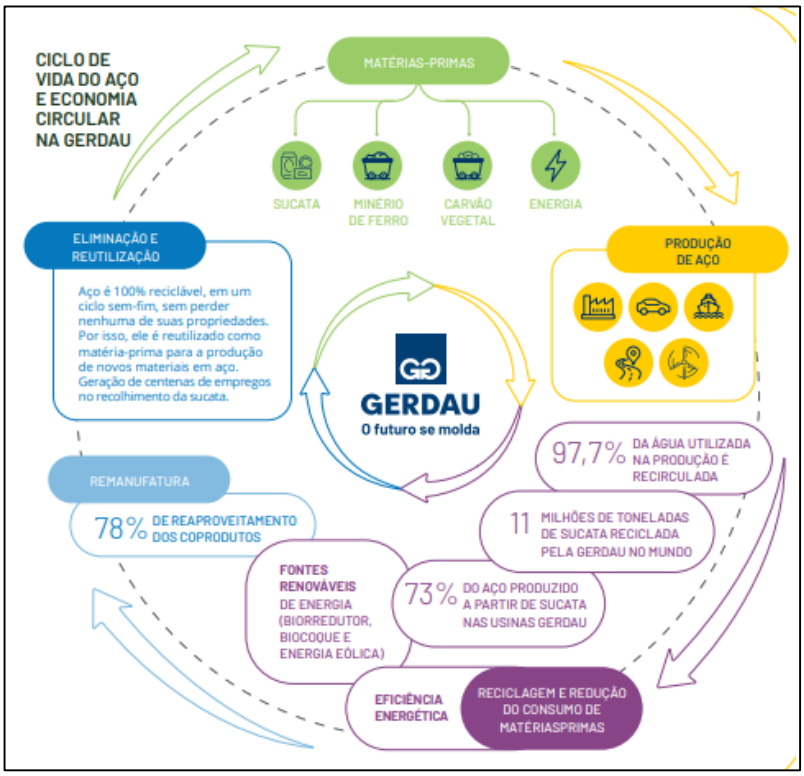


Figura 4 - Esquema resumido da economia circular da empresa estudada (Gerdau, 2020)

4.1 EMISSÕES DE CO2 E CONSUMO DE ENERGIA

O modelo circular adotado na empresa estudada vem trazendo resultados relevantes para a sustentabilidade, principalmente pela emissão de CO2, que é o principal gás de efeito estufa emitido pela indústria siderúrgica (Di Schino, 2019).

O Quadro 2 reúne dados da produção de gases de efeito estufa dos anos de 2019 e 2020. Sobre os valores apresentados, deve-se considerar a produção de gases de efeito estufa de forma direta (escopo 01 – engloba as fontes de emissão: processos industriais; combustão estacionária; combustão móvel) e de forma indireta (escopo 02 – engloba as fontes de emissão: energia elétrica adquirida).

Quadro 2 - Emissões diretas de gases de efeito estufa, em toneladas de CO2 (Gerdau, 2020)

Produção de gases de efeito estufa	Anos		Variação (%)
	2019	2020	
Escopo 01	9.056.519	9.198.407	+1,57
Emissões biogênicas de CO2	1.891.560	1.738.243	-8,10
Escopo 02	2.890.986	2.082.515	-27,96

De acordo com a Quadro 2, verifica-se um aumento na emissão de CO2 de 2019 para o 2020, fato que é explicado pela maior produção de aço. A empresa reportou a produção de 12.453.099t de aço em 2019 contra 13.142.345,30t em 2020, perfazendo um aumento de 5,53%.

A Figura 5 ilustra a emissão de CO2 por tonelada aço produzido no referido período.

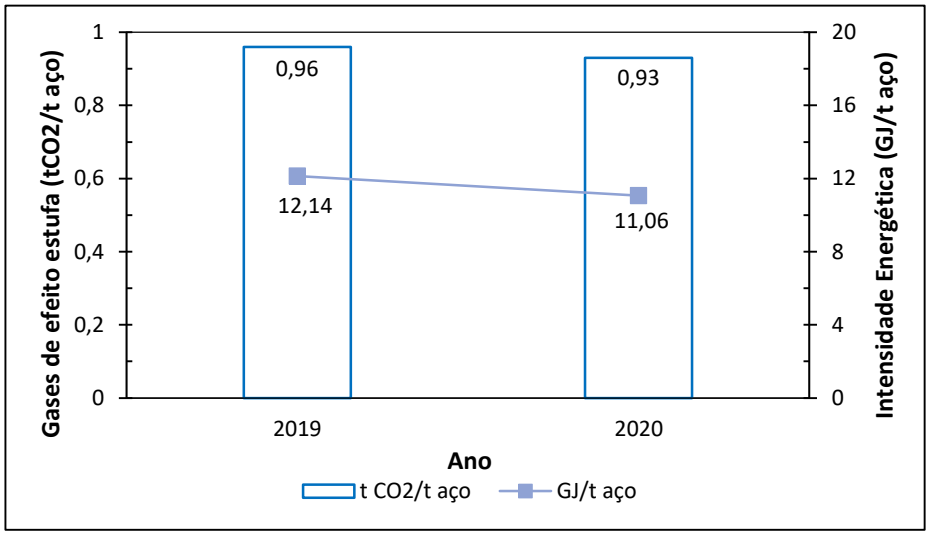


Figura 5 - Esquema resumido da economia circular da empresa estudada

Analisando-se os dados do Quadro 2 e a Figura 5, constata-se que a intensidade de emissões de gases de efeito estufa chegou a diminuir em 2020 quando comparada com aquela de 2019, chegando a 0,93 t CO2/t de aço produzido, no qual representa aproximadamente a metade da média global da indústria do aço, cujo valor é de 1,83 t CO2/t aço produzido (Pandit et al., 2020). Essa redução é atribuída ao uso tanto de sucata, como também de usinas semi-integradas.

Nechifor et al. (2020) apontam que para cada tonelada de aço produzida a partir de sucata há uma redução de 60% de CO2. Por sua vez, Di Schino (2019) ratifica que as usinas semi-integradas têm emissões de CO2 mais baixas do que as usinas integradas.

A utilização de carbono de origem renovável florestal, reciclagem da sucata e o reaproveitamento dos gases, e foco em um modelo circular e sustentável reflete a intensidade carbônica estar abaixo da média global da indústria do aço. Esta intensidade também inclui as usinas integradas, que apesar do aumento de produção, conseguiu uma melhor performance, reduzindo a emissão dos gases.

Dentre os setores industriais, a siderurgia é o maior consumidor de energia, sendo a maior parte proveniente de combustíveis fósseis, portanto, o consumo de energia e as emissões de CO2 estão relacionados (Conejo et al., 2020; Jones & Hastings-Simon, 2021).

A empresa estudada conseguiu reduzir o consumo total de energia de 151.201.598,91 GJ (ano de 2019) para 145.365.489,33 GJ (ano de 2020), uma redução de 3,86%; mesmo após ter aumentado sua produção de aço no ano de 2020. Essa redução no consumo de energia se deve à introdução de fontes renováveis, conforme apresentado na Figura 4.

Ainda sobre a Figura 5, pode-se observar o consumo total de energia por tonelada de aço, destacando uma melhora neste indicador para 2020, passando de 12,14 para 11,06 GJ/t aço (-8,90%). Segundo IEA (2019), o consumo de energia na siderurgia é de aproximadamente 20 GJ/t aço, fato que permite constatar que a empresa estudada apresenta uma redução deste indicador em 44,70%. Este

resultado está de acordo com Nechifor et al. (2020) e Mulvaney et al. (2021) que indicam que o uso de aço reciclado pode demandar até 40 e 60% menos energia, respectivamente.

Finalmente, é importante destacar que nas usinas integradas da empresa, cerca de 92% dos gases gerados são reaproveitados no processo de fabricação do aço na produção de energia elétrica e térmica para as próprias plantas industriais, contribuindo para a eficiência energética das usinas.

4.2 SUCATA

Com a utilização da sucata, a empresa estudada reduziu a demanda de recursos naturais, consumo de energia e minimizou a emissão de gases, contribuindo também com a diminuição da quantidade de material depositado em aterros e locais inadequados, auxiliando ainda mais na redução da produção de gases. Em 2020 foram recicladas 11 milhões de toneladas de sucata ferrosa, o que é equivalente a 1.089 vezes o peso da Torre Eiffel, localizada em Paris/França (Mendonça, 2020).

A reciclagem de 1 tonelada de sucata equivale a não emissão de 1,5 t de gases que provocam o efeito estufa (Broadbent, 2016; Mulvaney et al., 2021). A empresa deixou de emitir 16,5 milhões de toneladas de gases que impulsionariam o efeito estufa; assim, mostrando os efeitos que um modelo de negócio circular pode trazer no processo siderúrgico para minimizar o impacto com o ambiente.

A empresa estudada conseguiu reduzir a utilização das matérias-primas incluindo a Gusa, responsável por desprender altas energias em processo de usinas integradas, e conseguiu manter a reciclagem da sucata em 73%, em relação ao ano anterior (2019), conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Análise de matérias-primas, em toneladas (Gerdau, 2020)

Matérias-primas	Anos		
	2018	2019	2020
Gusa (interno e externo)	4.320.298,68	3.995.328,55	3.889.719,60
Ligas	232.194,94	192.497,89	211.926,81
Carburantes	184.640,75	125.045,42	170.237,72
Sucata/total de matéria-prima proveniente de reciclagem	14.273.236,62	11.548.789,24	11.482.790,78

4.3 COPRODUTOS

Durante o processo de produção de aço a geração de resíduos se torna inevitável, a empresa estudada busca o desenvolvimento de rotas tecnológicas com o reaproveitamento desses materiais nas suas usinas ou para outros fins produtivos e mercado. Assim, mantém uma equipe de pesquisa voltada para o desenvolvimento deste setor, chamado de coprodutos, com base nos princípios da economia circular e a sustentabilidade, contribuindo para preservar os recursos naturais, economizar energia e reduzir o descarte de materiais poluentes, reutilizando e reciclando materiais que antes iriam ser descartados como rejeitos. O processo de produção da usina estudada gera os resíduos demonstrados no Quadro 4.

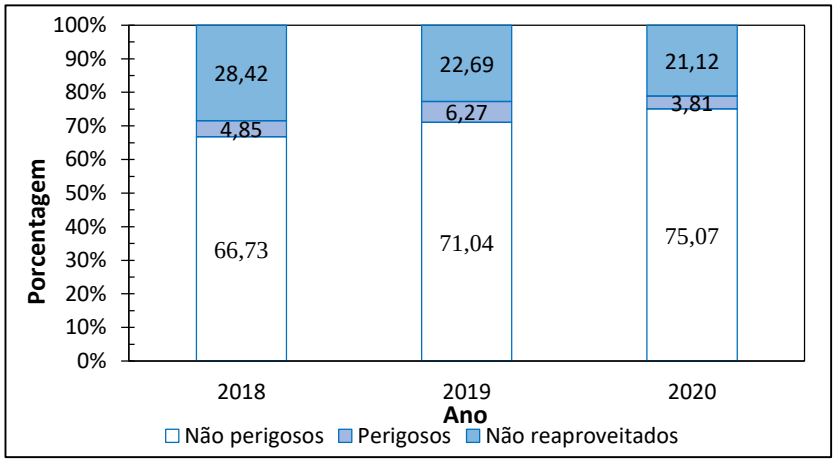
A geração dos resíduos no processo industrial de fabricação do aço cresceu 6.413.895, 6.399.671 e 7.345.566 t para 2018, 2019 e 2020, respectivamente, tendo em 2020 um aumento de 14,53% em relação a 2018, o que também é explicado pelo crescimento da produção de aço.

Quadro 4 - Tipos de resíduos gerados na indústria

Tipos de resíduos	Descrição
Resíduos industriais Perigosos	Óleo, graxa, escória granulada dos altos- fornos, escória de aciaria, lama de aciaria, pó de balão, pó de carvão, metais não ferrosos e cotão de trituração, escória de panela, e escama de moinho. Impactos: contaminação do solo, água superficial e subterrânea.
Resíduos industriais não perigosos	Pneus, sucata, terra de sucata. Impactos: alteração da qualidade do solo.
Resíduos não industriais perigosos	Resíduos da área de saúde, lâmpadas, etc. Impactos: manuseio no caso de objetos perfurocortantes e destinação dos resíduos da área de saúde.
Resíduos não industriais não perigosos	Resíduos de obra civil, madeira para formar o concreto e resíduos de fossas. Impactos: resíduos de obra civil e madeira, não tem potencial de contaminação; já o resíduo de fossa pode causar contaminação do solo de água subterrânea.

Conforme a Figura 6, apesar do aumento dos resíduos gerados, a empresa também conseguiu aumentar o volume de resíduos reaproveitados no processo de 78,88% para 2020. Outro dado importante que a empresa disponibilizou foram os produtos que estão em estoque, sendo aqueles que ainda não tem uma destinação definida. Foram reportadas 329.377 t de produtos em estoque para o ano de 2020. Além disso, o número de rejeitos produzidos reduziu de 271.656 t em 2018 para 243.725 t em 2020.

Figura 6 - Evolução na destinação da geração de resíduos na indústria estudada (gerdau, 2020)



De acordo com a empresa estudada o percentual de reaproveitamento de coprodutos cresceu ao longo dos anos, desde 71,58% em 2018 até 78,88% em 2020, o que reforça a ideia de economia circular, gestão de energia, inovação e transformação digital. O resultado operacional dos coprodutos em 2020 gerou uma receita menos despesas de US$ 96.471.668,02.

Os coprodutos resultantes da indústria siderúrgica, como pó, lodo, escória, entre outros, são reciclados e transformados em novos produtos para outras indústrias, principalmente a construção civil. Por exemplo, 97% da quantidade total de escória produzida é recuperada, onde 78% são usados na fabricação de cimento, 21% na construção de estradas e o restante na agricultura como fertilizante (Ardelean et al., 2022). No entanto, é necessário desenvolver novas tecnologias para melhorar a

qualidade dos coprodutos, garantindo assim a sua reutilização com uma abordagem sustentável, menor impacto ambiental e maior eficiência energética (Branca et al., 2020).

Embora a empresa estudada apresente resultados positivos para uma economia circular com foco no uso de materiais reciclados e eficiência energética, Di Schino (2019) indica que o crescimento da demanda por aço pode limitar a produção de usinas semi-integradas, devido à disponibilidade de sucata. Pauliuk et al (2012) destacam que a oferta de sucata poderia aumentar até 2050, mas tecnologias avançadas de reciclagem são necessárias.

A indústria siderúrgica tem potencial na economia circular, principalmente com usinas semi-integradas e aproveitamento de sucata. No entanto, para garantir o sucesso econômico (rentabilidade e competitividade) e sustentabilidade, é necessário desenvolver novas tecnologias que visem a reciclagem de sucata e outros materiais (Horváth et al., 2019; Jones & Hastings-Simon, 2021).

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo de caso possibilitou uma análise descritiva dos processos de uma usina semi-integrada na produção do aço, desde a entrada da sucata na usina até a laminação para o produto final, e também a avaliação dos impactos do modelo de negócio circular introduzido na empresa, no qual representa um conjunto de usinas integradas e semi-integradas.

As medidas de introdução da economia circular na empresa resultaram em 73% de sucata como matéria-prima da empresa. Conseguindo reciclar 11 milhões de toneladas de sucata ferrosa e deixando de emitir aproximadamente 16,5 milhões de toneladas de gases de efeito estufa. Apesar do aumento da produção do aço de 12.453.099 t (2019) para 13.142.345,30 t (2020), a empresa conseguiu reduzir a intensidade de emissão de gases de efeito estufa de 0,96 tCO2/t aço (2019) para 0,93 tCO2/t aço (2020), no qual representa aproximadamente a metade da média global da indústria do aço de 1,83 CO^2/t. A empresa também conseguiu reduzir seu consumo total de energia em 2020 em relação a 2019, de 12,14 GJ/t para 11,06 GJ/t.

Embora a geração de resíduos durante o processo ter crescido de 2018 para 2020 em 14,53%; o reaproveitamento também cresceu de 71,58 a 78,88%; demonstrando que o reaproveitamento é um dos pilares da empresa que a caracteriza como sustentável. Pode-se perceber que a utilização da sucata traz benefícios ao setor siderúrgico como menor gasto de energia, como também minimiza a quantidade de gases que geram efeito estufa. Além disso, visto que o Brasil possui uma quantidade de sucata considerável no mercado, a aplicação da economia circular na siderúrgica se torna viável e um ganho na economia e sustentabilidade, gerando até um novo mercado de compra e comercialização.

Através dos resultados obtidos, pode-se perceber que as siderúrgicas de aço têm potencial para produzir um percentual considerável de resíduos e isso traz enorme oportunidade para a introdução do modelo de negócio de economia circular, pois introduzindo a sucata como matéria-prima é agregado valor a resíduos que iriam ser descartados na natureza. Além disso, quando ocorrem perdas de aço no processo, o material poderá ser sucateado e ser retornado como matéria-prima, e os resíduos gerados durante a produção, como a escória, tornam-se coprodutos e são vendidos para empresas que utilizam este material como matéria-prima, tornando-se lucro para empresa e desenvolvendo novas oportunidades de empregos. Com isso, pode-se perceber a importância deste modelo de negócio para o futuro da sociedade e do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

Abdalla, F., Sampaio, A. (2018). Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. Entorno Geográfico, (15), 82-102. https://entornogeografico.univalle.edu.co/index.php/ entornogeografico/article/view/6712

Abrelpe. Panorama de resíduos sólidos do Brasil 2020. In: Panorama de resíduos sólidos do Brasil 2020. ABRELPE, 2020. https://abrelpe.org.br/panorama/

Alamerew, Y.A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: Journal of Cleaner Production, 254, 120025. https://www.sciencedirect.com/science/article/ abs/pii/ S095965262030072X

Ardelean, E., Socalici, A., Lupu, O., Bistrian, D., Dobrescu, C., Constantin, N. (2022). Recovery of waste with a high iron content in the context of the circular economy. Materials, 15(14), 4995.

Branca, T.A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., Rosendahl, S. (2020). Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. Metals, 10(3), 345.

Brasil. Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, 2010.

Broadbent, C. (2016). Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1658-1665.

Chalabyan, A., Li, Y., Yuanpeng, S., Zhou, J., Tang, R., Zhao, V. (2020). How should steelmakers adapt at the dawn of the EAF mini-mill era in China? https://www.mckinsey.com

Conejo, A.N., Birat, J.P., Dutta, A. (2020). A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. Journal of environmental management, 259, 109782.

Di Schino, A. (2019). Circular economy aspects related to steel production. https://journal.uctm.edu/node/j2019-1/27_18_95_p_239_244.pdf

Dias Filho, J.M. (2008). Pesquisa Qualitativa: Um Caminho para a Compreensão das Práticas Contábeis.

Ellen Macarthur Foundation. Uma Economia Circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial. 2017. Disponível em: https://depositorioceds.espm.edu.br/wp- content/uploads/2021/04/Uma EconomiaCircularnoBrasil.pdf. Acesso em: 30 out. 2021.

Gerdau. Relato anual Gerdau 2020. São Paulo: Quintal 22, 2020. https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2022/07/RelatorioGerdau2020-1.pdf

Ghaffar, S.H., Burman, M., Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. Journal of cleaner production, 244, 118710.

Gonçalves, T.M.; Barroso, A.F.F. (2019). A economia circular como alternativa à economia linear. SIMPROD - Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, XI. Sergipe: [s. n.], 2019. 8 p. https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12561/2/EconomiaCircularAlternativa.pdf

Guarnieri, P., Cerqueira-Streit, J. A., Batista, L. C. (2020). Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. Resources, conservation and recycling, 153, 104541.

Horváth, Á.K., Kis-Orloczki, M., Papp, A.T. (2019). Possibilities for adopting the circular economy principles in the EU steel industry. In Solutions for Sustainable Development (pp. 218-226). CRC Press.

Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 1906-1916.

IEA. (2019). Steel. https://www.iea.org/tcep/industry/steel/

Instituto Aço Brasil. O aço. https://acobrasil.org.br/site/

Jones, M., Hastings-Simon, S. (2021). Innovators and the development of mini-mills for steel recycling: lessons for the development of a circular economy from the steel industry. Payne Institute Commentary Series: Viewpoint.

Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2021). Conceituando a economia circular: uma análise de 114 definições. Resources, Conservation & Recycling. 2017. Elsevier B.V. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835?via%3Dihub

Mendonça, C. (2020). https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/historia/torre-eiffel

Mercado, A. (2018). Environmental assessment of the Mexican steel industry. In Industry and environment in Latin America (pp. 218-244). Routledge.

Milford, R.L., Allwood, J.M., Cullen, J.M. (2011). Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO2 abatement in the steel and aluminium sectors. Resources, Conservation and Recycling, 55(12), 1185-1195.

Mulvaney, D., Richards, R. M., Bazilian, M. D., Hensley, E., Clough, G., Sridhar, S. (2021). Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110604.

Nechifor, V., Calzadilla, A., Bleischwitz, R., Winning, M., Tian, X., Usubiaga, A. (2020). Steel in a circular economy: Global implications of a green shift in China. World Development, 127, 104775.

Pandit, J.K., Watson, M., Qader, A. (2020). Reduction of Greenhouse Gas Emissions in Steel Production.

Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D.B. (2012). Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle. Environmental science & technology, 46(1), 148-154.

Ruiz, L.A.L., Ramón, X.R., Domingo, S.G. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector–A review and an integrative model approach. Journal of Cleaner Production, 248, 119238.

United Nations Environment Programme. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.

World Steel Association. (2021). Climate change and the production of iron and steel. World Steel Association: Brussels, Belgium.

World Steel Association. (2020). The steel industry in modern society. https://worldsteel.org/es/media-centre/press-releases/2020/the-steel-industry-in-modern-society/

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VALORIZAÇÃO DE LAMA DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA PERSPECTIVA DE UMA ECONOMIA CIRCULAR

Ana Paula Mattoso[a]; Sandra Cunha[a]; José Aguiar[a]; António Duarte[a]; Helena Lemos[b]

[a] CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal, id10627@alunos.uminho.pt (A.P.M.), sandracunha@civil.uminho.pt (S.C), aguiar@civil.uminho.pt (J.A.), aduarte@civil.uminho.pt (A.D.)

[b] Águas do Norte, S.A. Dom Pedro de Castro, 5000-669, Vila Real, Portugal, helena.lemos@adp.pt

RESUMO

O processo de purificação da água destinada ao abastecimento público gera uma grande quantidade de resíduo, denominado "lama" de Estação de Tratamento de Água (LETA). Face aos desafios da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), relacionados com o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, que visa garantir o acesso universal a água potável, prevê-se um crescimento dos volumes de água tratada e, consequentemente, o aumento da quantidade de LETA gerada na indústria da água, à escala mundial. Nesse contexto, com base no princípio da economia circular, as lamas produzidas nas estações de tratamento de água apresentam potencial para valorização como matéria-prima em outras indústrias. Por outro lado, na cadeia do setor da construção civil estão os materiais que mais consomem cimento, sendo esta atividade responsável por elevadas emissões de gás carbônico (CO_2). Assim, o aproveitamento da LETA como Material Cimentício Suplementar (MCS) para substituir uma parte do cimento nas argamassas e betões vai contribuir para diminuir a pegada de carbono desses materiais de construção, tornando a indústria da construção civil mais sustentável. Este artigo apresenta uma síntese de estudos e práticas recentes sobre a valorização da LETA na produção de argamassas e betões. Vários estudos confirmaram a viabilidade de aproveitamento da LETA como MCS, tendo em conta as suas características pozolânicas.

PALAVRAS-CHAVE

Lama de ETA, materiais de construção sustentáveis, economia circular.

1 INTRODUÇÃO

O ciclo produtivo responsável pelo tratamento de água para abastecimento público gera uma grande quantidade de resíduos, conhecidos como "lamas" de Estação de Tratamento de Água (LETA), com características que variam em função da qualidade da água bruta na origem, do esquema e tecnologias de tratamento utilizadas e dos produtos químicos adicionados nos processos de tratamento. À escala mundial, estima-se que sejam geradas mais de 10.000 ton/dia de LETA (Ahmad et al., 2017), cujo destino final é, geralmente, a deposição em aterros sanitários, ou diretamente nos ecossistemas (terrestre e aquático).

De acordo com a Figura 1, observa-se que no Brasil a maior parte das Estações de Tratamento de Água (ETA) lança esses resíduos diretamente nos meios hídricos localizados nas proximidades da ETA, afetando negativamente a qualidade desses mananciais, devido à elevação da sua turbidez (o que compromete os processos fotossintéticos) e ao aumento da concentração de matéria orgânica, além de reduzir a biodiversidade na flora e fauna aquáticas (Soares et al., 2018). Em Portugal, cerca de 48% das LETA geradas em 2022 foram depositadas em aterros sanitários (AdP, 2022), elevando os encargos de gestão deste resíduo, e contribuindo quer para o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, durante o transporte, quer para a sobrecarga desses aterros e consequente diminuição da sua vida útil.

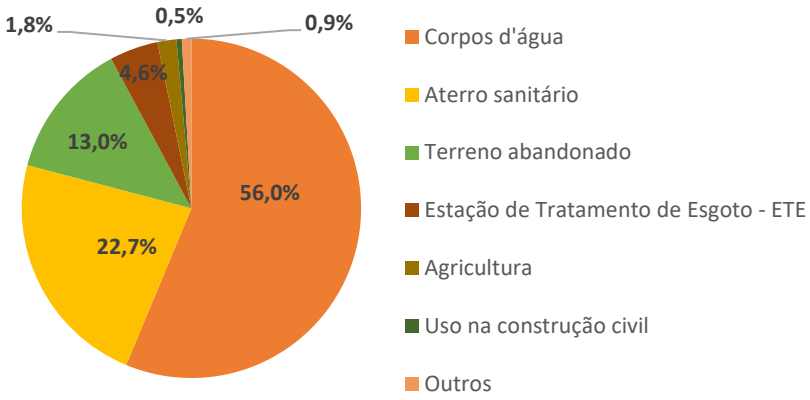


Figura 1 – Destino da LETA no Brasil (*IBGE*, 2020)

A composição das LETA é variável, mas geralmente 92% é constituída por produtos químicos usados no processo e apenas 8% corresponde a impurezas removidas da água bruta (DI Bernardo et al., 2012). A quantidade gerada por cada ETA também é muito variável. Segundo Tantawy (2015), a produção de lamas de uma ETA localizada na Austrália pode chegar a 43.500 ton/ano; enquanto na Índia, a geração anual de LETA foi estimada em 29.700 toneladas (Ahmad et al., 2017). Em Portugal, as ETA operadas pelo grupo Água de Portugal (AdP) registaram a produção de 18.076 toneladas de lamas em 2022 (AdP, 2022).

A fração sólida das lamas acumuladas nos decantadores das ETA possui na sua composição os sólidos em suspensão (fina e coloidal) na água, removidos por gravidade, acrescida de substâncias iônicas presentes nos reagentes aplicados no tratamento (Moreira et al., 2009). Assim, o uso de sais de alumínio (Al) ou de ferro (Fe) no processo de coagulação da água vai gerar lamas com elevada concentração desses metais. Os sólidos removidos também podem conter outros metais, presentes na água bruta ou nas impurezas dos produtos químicos empregados na ETA (Katayama et al., 2015). Na ETA de Areias de Vilar (Portugal), onde é aplicado um oxidante logo na primeira fase do tratamento

(pré-oxidação), impurezas como matéria orgânica, micropoluentes e metais, essencialmente ferro e manganês na forma insolúvel (Fe^{3+} e Mn^{4+}), aparecerão como resíduo nas lamas (Mattoso et al., 2023). A fração sólida dessas lamas também terá na sua composição o hidróxido de alumínio - $Al(OH)_3$, por causa do uso de um sal de alumínio como coagulante; e poderá conter grande quantidade de óxido de cálcio (CaO), principalmente porque os resíduos de lama de cal gerados no processo se juntam às lamas dos decantadores. O carvão ativado (para adsorção de micropoluentes) e o polieletrólico aplicados na etapa de coagulação/floculação também estarão presentes como resíduo nessas lamas. O Quadro 1 apresenta a composição química (em termos de óxidos) das lamas geradas na ETA de Areias de Vilar, e a composição química do cimento comum visando a sua comparação. Os dados foram fornecidos pela Águas do Norte, S.A., e são referentes a análises efetuadas no âmbito de um projeto de investigação em curso, que pretende avaliar a viabilidade de reutilização das lamas geradas por este sistema na indústria da construção civil.

Quadro 1 – Composição química da LETA de Areias de Vilar e do cimento Portland

	Composição química (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MnO	P_2O_5	TiO_2	K_2O
LETA	22,51	25,27	6,54	31,00	0,62	12,57	0,45	0,9
Cimento comum	16,6	3,39	3,3	64,9	0,06	0,14	0,19	1,26

O cimento Portland usado para a produção de argamassas e betões é composto essencialmente por CaO, sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3); e esses mesmos compostos estão presentes nas lamas de ETA. Geralmente o teor de SiO_2 desses dois materiais são semelhantes, enquanto o Al_2O_3 e o Fe_2O_3 aparecem em maior concentração nas lamas. Já o CaO, que normalmente é encontrado nas LETA em pequenas proporções (usualmente menos de 6%), é o composto químico de maior concentração no cimento (mais de 50%). Na ETA de Areias Vilar as lamas apresentaram concentração significativa de cálcio, possivelmente porque os resíduos de lama de cal gerados no processo se juntam às lamas dos decantadores para serem desidratadas conjuntamente.

Pelo exposto, observa-se que o ciclo produtivo capaz de garantir a água potável e industrial necessária ao desenvolvimento das nações gera resíduos que demandam uma prática sustentável de gerenciamento, suscitando na comunidade científica um interesse crescente em desenvolver pesquisas que apontem alternativas viáveis e sustentáveis para o aproveitamento das LETA. Uma opção favorável é utilizá-la como matéria-prima em outros processos industriais, aplicando-se o princípio da economia circular.

Por outro lado, o setor da construção civil apresenta elevado impacto ambiental, principalmente por causa do alto consumo de cimento na sua cadeia de produção. O cimento é essencial para a construção das obras de infraestrutura necessárias ao desenvolvimento de um país, mas a sua produção responde globalmente por até 7% das emissões antrópicas de CO_2, sobretudo devido ao uso do calcário como matéria-prima e das altas temperaturas empregadas no processo de fabricação (Visedo & Pecchio, 2019). À escala global, o setor industrial foi responsável pela emissão direta de quase 9 Gt de CO_2 em 2022, e a indústria do cimento foi o segundo setor que mais contribuiu com esses lançamentos (2,42 Gt de CO_2), sendo apenas superada pela indústria do ferro e do aço (IEA, 2023). Na área de construção civil, o grande desafio da indústria cimenteira é atender a demanda global de cimento e ainda reduzir as emissões de CO_2. Para a International Energy Agency (IEA), uma alternativa sustentável é

implementar estratégias que otimizem o uso do cimento, para reduzir a aplicação desse material ao longo de toda a cadeia da construção e assim contribuir para a diminuição das emissões de CO_2 decorrente da produção do cimento.

A quantidade de CO_2 emitida para a produção do cimento é variável em diferentes países, dependendo da tecnologia e das matérias-primas empregadas no processo de fabricação. No Brasil, por exemplo, foram emitidos aproximadamente 610 kg CO_2/ton de cimento; enquanto a Espanha, a Inglaterra e a China emitiram 698 kg CO_2/ton de cimento, 839 kg CO_2/ton de cimento e 848 kg CO_2/ton de cimento, respetivamente (Cimento, 2012). O consumo do cimento também varia de país para país, dependendo do estágio de desenvolvimento em que se encontram, mas os betões e as argamassas são os materiais de construção que mais utilizam cimento na sua composição (Scrivener et al., 2018), aumentando a pegada de carbono desses materiais. De acordo com Turner & Collins (2013), o CO_2 equivalente para a construção de 1 m^3 de betão foi estimada em 354 kg CO_2-e/m^3, onde o cimento foi responsável por 76,4% das emissões de gases de efeito estufa desse material. Em estudo mais recente a taxa de contribuição do cimento na pegada de carbono do betão foi superior a 95% (Robayo-Salazar et al., 2018). Em argamassas convencionais, a pegada de carbono chegou a alcançar a marca dos 535,8 kg CO_2-e/m^3, sendo o cimento da mistura a matéria-prima de maior impacto ambiental, com a emissão de 515,65 kg CO_2-e /m^3 (Batuecas et al., 2021).

Face ao alto consumo de cimento e ao impacto negativo que a sua produção e uso representa para o meio ambiente, substituir parte desse ligante por outros materiais reciclados na composição da mistura pode reduzir significativamente a pegada de carbono dos betões e das argamassas, mitigando o impacto ambiental desses materiais de construção. As LETA mostram-se como uma alternativa viável, pois apresentam na sua composição compostos de alumínio e silicatos, conferindo-lhe características similares às pozolanas (De Carvalho Gomes et al., 2019;Tantawy, 2015), havendo já vários estudos com resultados promissores para o seu uso como Material Cimentício Suplementar (MCS) (Liu et al., 2021; Godoy et al., 2020; He et al., 2021; Zhuge et al., 2022). Além disso, as lamas de ETA são resíduos que estão disponíveis em várias regiões, pois constituem subprodutos de uma indústria essencial e presente em todo mundo; cujo aproveitamento na área da construção civil também contribuirá para a redução da quantidade de resíduos depositados em aterros sanitários (Dahhou et al., 2018). A viabilidade de aproveitamento dos resíduos gerados na ETA, associada às demandas da indústria cimenteira, tem justificado mais investimentos em pesquisas científicas nessa área.

O principal objetivo da economia circular é reduzir o consumo dos recursos naturais através da reutilização e reciclagem de materiais, contribuindo para a sustentabilidade dos processos, incluindo a otimização da sua eficiência energética. A aplicação desse princípio de gestão é essencial para alcançar a meta de neutralidade climática, pois o rápido crescimento da população mundial nos últimos anos trouxe como consequência o elevado consumo de recursos naturais, cuja extração e processamento está diretamente relacionada com o aumento das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE). Desde 2015, com a apresentação pela Organização das Nações Unidas (ONU) da agenda de 2030 para o desenvolvimento sustentável, muitos países ao redor do mundo implementaram políticas que incentivam a economia circular, associadas à redução das emissões de GEE, à melhoria da eficiência energética e ao uso de tecnologias mais limpas. Uma opção difundida mundialmente e que contribui para a mitigação das emissões desses tipos de gases na construção civil é a aplicação de resíduos de outras indústrias como material complementar, para substituir parcialmente o clínquer na produção do cimento ou como substituto parcial do cimento na argamassa e no betão.

Ademais, diante dos desafios definidos na Agenda de 2030, a aplicação dos princípios da circularidade nesses dois importantes setores da indústria irá contribuir diretamente para o alcance de vários dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), nomeadamente os 6, 9, 11 e 12. No ODS 6, a meta é garantir o acesso universal a água potável. A valorização da LETA como insumo para outra indústria assegura maior sustentabilidade para o setor. Em relação à ODS 9, a meta 9.4 propõe a modernização das infraestruturas com maior eficiência no uso dos recursos. O aproveitamento das LETA na indústria de construção civil permite o uso mais eficiente de um resíduo, tornando as obras das infraestruturas mais sustentáveis. Relativamente ao ODS 11, a meta é garantir para todos o acesso a uma habitação adequada. Para isso, será necessário ampliar o ambiente construído em várias partes do mundo, aumentando o uso do cimento e consequentemente das emissões de CO_2 decorrentes da sua utilização. A substituição parcial do cimento por lama de ETA vai mitigar as emissões CO_2, diminuindo o impacto dessas construções no clima. Da mesma forma, no âmbito do ODS 12, a aplicação do princípio da circularidade nesses setores contribui para a gestão ambientalmente correta dos resíduos gerados nas ETA, incentivando a adoção de práticas sustentáveis nas indústrias estudadas. A aplicação dos princípios da circularidade na indústria da água e na indústria de construção civil traz benefícios econômicos, sociais e ambientais para os dois setores. O objetivo deste artigo é apresentar uma síntese de estudos e práticas recentes sobre a valorização da lama de ETA na produção de argamassas e betões.

2 APLICAÇÃO DE LAMA DE ETA EM ARGAMASSAS E BETÕES

Este artigo foi elaborado com base numa revisão da literatura existente sobre valorização da lama de ETA na produção de argamassas e betões, tendo em conta os impactos que esses materiais de construção representam para o ambiente. Foram realizadas consultas nas bases de dados do Scielo, ScienceDirect e Scopus, e para garantir que a pesquisa se mantém atualizada, priorizou-se artigos publicados nos últimos 10 anos.

O aproveitamento das LETA para uso em materiais de construção é um tema amplamente discutido por pesquisadores da área. A partir da revisão da literatura efetuada, que avaliou um total de trinta e dois artigos, foram selecionadas catorze publicações mais relevantes para serem analisadas e discutidas nesta seção. O Quadro 2 apresenta uma identificação e breve descrição dos objetivos das publicações selecionadas nesta revisão.

Quadro 2 – Síntese de publicações científicas sobre valorização de LETA na produção de argamassas e betões na última década

Publicação	Objetivo	Autor
The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition.	Avaliar a possibilidade de uso da lama de ETA como uma adição mineral substituindo parcialmente o cimento.	Gastaldini et al. (2015)
Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água.	Avaliar as propriedades do concreto com adição de diferentes teores de lama de ETA.	Tafarel et al. (2016)
Potential uses of waste sludge in concrete production.	Avaliar os efeitos da substituição da areia natural por diferentes níveis de LETA nas propriedades do betão.	Ramirez et al. (2017)

Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation.	Investigar o efeito sinergético das cinzas de LETA e do calcário usadas em substituição parcial do cimento na resistência à compressão do betão.	Hagemann et al. (2019)
Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste	Investigar a aplicação de LETA para o desenvolvimento de um Material Cimentício Suplementar.	Godoy et al. (2020)
Estudo da adição de lodo de ETA – Estação de Tratamento de Água em argamassas de revestimento.	Analisar as características físicas e propriedades mecânicas de argamassas produzidas com adição do lodo da ETA.	Laurindo et al. (2020)
Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production	Investigar o potencial de uso da LETA calcinada em substituição ao cimento para a produção sustentável de compósitos cimentícios.	Ruviaro et al. (2021)
The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks.	Investigar os efeitos da adição de LETA nas propriedades de pastas de cimento e blocos de betão.	Liu et al. (2021)
Properties of concrete incorporating alum sludge in different conditions as partial replacement of fine aggregate.	Investigar as propriedades do concreto que incorpora lama de alúmen como substituto parcial do agregado miúdo.	Kaish et al. (2021)
Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics.	Avaliar o desempenho de compósitos cimentícios produzidos com a aplicação de LETA como substituto parcial do cimento.	He et al. (2021)
Reuse of drinking water treatment sludge in mortar as substitutions of both fly ash and sand based on two treatment methods.	Avaliar o desempenho de misturas de argamassas produzidas com LETA submetida a dois tipos de tratamentos.	Li et al. (2021)
Water treatment sludge conversion to biochar as cementitious material in cement composite.	Investigar os efeitos da aplicação de biochar de LETA nas propriedades da pasta de cimento.	De Carvalho et al. (2022)
Repair mortars with water treatment plant sludge (WTPS) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) for more eco-efficient and durable constructions.	Avaliar a durabilidade de argamassas de reparo produzidas com LETA e areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.	Hemkemeier et al. (2023)
Water treatment waste as supplementary cementitious material.	Avaliar o potencial de utilização da lama de ETA como material pozolânico em substituição ao cimento.	Altheman et al. (2023)

Numa investigação conduzida por Gastaldini et al. (2015) foi testada a lama de ETA como material pozolânico para substituir parcialmente o cimento no betão. As lamas foram previamente calcinadas

a diferentes temperaturas (400, 500, 600 e 700 °C), com tempo de exposição de 1 e 2 horas. Para os autores é viável a incorporação de até 30% em peso de lama, onde a temperatura de calcinação mais eficiente foi 600 °C por 1 hora. A substituição resultou em aumento de resistência à compressão que variou de 3% a 30%, quando comparado ao betão de referência (100% cimento Portland), tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Outra vantagem destacada pelos autores é que nessas condições foi possível reduzir o consumo de cimento no betão até 200 kg/m^3.

De acordo com Tafarel et al. (2016), a incorporação das LETA em peças de betão sem fim estrutural, tais como blocos intertravados para pavimento, betão leve para preenchimento, tubulações de betão e mobiliário urbano é uma opção promissora para a valorização desses resíduos. Os autores avaliaram a influência do uso da lama de ETA, em substituição parcial aos agregados miúdos, nas propriedades do betão convencional no estado endurecido, para fabricação de blocos intertravados para pavimento. A pesquisa usou a lama húmida, sem qualquer tratamento térmico; e a incorporação de até 5% mostrou-se viável. Outro estudo, realizado por Ramirez et al. (2017), avaliou os efeitos da incorporação de LETA nas propriedades mecânicas e na absorção de água em betões. Foram usadas misturas com níveis de substituição de 0, 5, 7 e 10 % de lodo húmido em relação à massa de areia. A incorporação de LETA em sua forma natural (húmida) reduziu a resistência do betão. Para o autor, do ponto de vista técnico, a substituição em níveis de até 5% pode ser usada para a produção de betão não estrutural, sendo necessário realizar mais estudos para avaliar os efeitos da aplicação de lamas calcinadas nas propriedades do betão e a viabilidade ambiental associada ao processo de calcinação. Relativamente a esse aspecto, Mattoso et al. (2024) também sugerem mais investigações que incluam análises económicas associadas à valorização das LETA como MCS, tendo em conta que o tratamento térmico aplicado às lamas pode aumentar os custos da produção.

Hagemann et al. (2019) avaliaram a atividade pozolânica da LETA e o seu potencial como substituto da argila calcinada na produção de betão, comparando resultados de misturas ternárias (LETA tratada termicamente + calcário moído + cimento) e misturas binárias (LETA tratada termicamente + cimento) com uma prova de referência que usou apenas o cimento. As misturas ternárias resultaram em maior resistência à compressão em comparação com misturas binárias e cimento simples. A mistura ternária composta por 15% de LETA e 7,5% de calcário moído atingiu níveis de resistência à compressão entre 45 e 60 MPa e ainda reduziu o consumo de cimento Portland em até 38,4%. Nesse estudo os melhores resultados foram alcançados com uso de lama calcinada a 700°C por 1 hora e moída por 1 hora.

De acordo com Godoy et al. (2020), a lama de ETA é um resíduo não perigoso e não inerte composto principalmente por SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, constituído essencialmente por quartzo e caulinita. Ensaios realizados pelos autores confirmaram a transformação da caulinita em fase amorfa reativa após calcinação. As lamas calcinadas a 600°C evidenciaram atividade pozolânica, demonstrando grande potencial para uso como MCS. As propriedades mecânicas de argamassas produzidas com 14% e 35% de LETA calcinada a 600°C, em substituição ao cimento, apresentaram resultados satisfatórios, sendo necessário realizar mais estudos para avaliar a durabilidade de compósitos cimentícios produzidos com LETA calcinada.

No estudo realizado por Laurindo et al. (2020), concluiu-se que o uso de LETA como agregado na produção de argamassa contribui para o aumento da retenção de água, bem como para a redução da absorção de água por capilaridade, quando comparada com a argamassa convencional. De acordo com os autores, isso demonstra que a lama traz benefícios para a argamassa de revestimento, tornando-a mais estanque e resistente a agentes deletérios.

Ruviaro et al. (2021) produziram um compósito cimentício mais sustentável substituindo o cimento Portland por até 20% de LETA. A lama usada para preparar a pasta de cimento foi previamente seca

em estufa (105°C por 24 horas) e depois calcinada a 700 °C por 1 hora. O material produzido apresentou resistência mecânica melhorada em relação ao compósito de cimento simples. A pesquisa também confirmou que a emissão de CO_2-eq associada à produção de 1m³ de pasta diminuiu progressivamente com o aumento do teor de lama incorporada, alcançando uma redução de 42% em relação à pasta de referência quando o nível de substituição de cimento por LETA foi de 45% em peso.

Liu et al. (2021) estudaram os efeitos da adição de lama ETA nas propriedades da pasta de cimento e de blocos de betão. Nas pastas e nos blocos de betão a LETA substituiu parcialmente o cimento nas proporções de 10% a 30% em peso. De acordo com os autores, o uso das lamas como MCS modifica significativamente as características microestruturais dos compósitos de cimento, afetando a resistência à compressão dos blocos de betão. A incorporação de 10% de lama em substituição ao cimento resultou em blocos de betão com maior resistência à compressão aos 90 dias de cura, presumidamente devido à reação pozolânica tardia das lamas.

De acordo com Kaish et al. (2021), é possível produzir betão mais sustentável substituindo parcialmente os agregados finos por lama de ETA. Os autores utilizaram lama seca a 105°C, durante 24h, e lama aquecida a 300°C, por 3 horas, em substituição de areia fina, tendo concluído que a incorporação de até 10% de lama, independente do tratamento térmico aplicado, proporciona melhores propriedades de resistência e durabilidade para o betão. Tanto a lama seca a 105°C quanto a lama aquecida a 300°C foram trituradas e moídas até uma finura aproximada de 65µm. As lamas calcinadas a 300°C apresentaram melhor desempenho em todas as propriedades avaliadas. Mesmo assim, para os autores, tendo em conta o custo energético, é mais sustentável do ponto vista ambiental usar as lamas secas em estufa (105°C).

O uso da lama de ETA na construção civil como material cimentício suplementar é apontado por pesquisadores como uma alternativa viável e sustentável. Numa investigação realizada por He et al. (2021) a LETA tratada termicamente (105°C por 24 horas seguida de calcinação a 900°C por 2 horas) e moída até tamanho médio de 12µm foi usada para produzir argamassa, em substituição do cimento, nas proporções de 10%, 20% e 30% em peso. Antes de ser aplicada na mistura, a lama foi submetida ao teste de lixiviação de metais pesados e os resultados confirmaram que a aplicação de LETA misturada com cimento Portland é um método seguro e sustentável. A pesquisa também confirmou que a LETA calcinada tem atividade pozolânica, aumentando seu potencial de aplicação em materiais cimentícios para substituir parte do cimento. A incorporação de até 10% em peso de lama melhorou as propriedades mecânicas das argamassas e diminuiu a retração por secagem das pastas.

Num estudo realizado por Li et al. (2021), a LETA submetida a dois tipos de tratamentos (calcinação a 900°C, por 4 horas, e imersão em solução de hidróxido de sódio – NaOH a 10%, por 1 hora) foi usada para produzir argamassa substituindo parcialmente o agregado. Segundo os autores, as argamassas produzidas com lamas submetidas a tratamento térmico apresentaram melhor desempenho do que aquelas que usaram LETA tratada com NaOH, tanto nos testes de resistência à compressão como em relação à análise microestrutural. Hemkemeier et al. (2023) também investigaram sobre o uso da lama de ETA para substituir parcialmente o agregado miúdo de misturas cimentícias. A lama seca e triturada foi utilizada para produzir argamassa de reparo. A LETA substituiu a areia fina na proporção de 3% em massa, resultando numa mistura capaz de proporcionar mais proteção para o reforço do aço em ambientes agressivos, sujeitos a CO_2 e Cl^-, e ainda a redução da taxa de corrosão na ordem de 70%.

De Carvalho Gomes et al. (2022) produziram biochar (bio-carvão) a partir da lama de ETA, incorporando esse material em pastas de cimento. As misturas contendo 1%, 2% e 5% do biochar de LETA, em substituição do cimento, apresentaram uma resistência à compressão ligeiramente superior

aos 28 dias, quando comparada com o material de referência. Com a adição de 10% de biochar, as pastas produzidas apresentaram resistência à compressão semelhante à do material de referência.

Outro estudo, realizado por Altheman et al. (2023), avaliou o potencial de uso da LETA como material pozolânico. Foram testadas duas misturas: uma contendo LETA e cimento e outra constituída por LETA, escória de alto-forno e cimento. Da mistura de LETA e cimento resultou uma argamassa com resistência à compressão próxima aos padrões mínimos exigidos na legislação (ABNT NBR 5752), atingindo 89,2% da resistência da amostra de referência. Quando foi usada a mistura contendo LETA e escória de alto-forno, a argamassa apresentou resistência à compressão dentro dos padrões exigidos.

3 CONCLUSÃO

Da revisão bibliográfica efetuada, constata-se que vários estudos confirmam o potencial, a viabilidade e os benefícios do aproveitamento da LETA como MCS, pois os seus principais constituintes são a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e a hematita (Fe_2O_3), tal como no cimento Portland, que conferem às lamas características pozolânicas.

O uso de adições minerais para substituir parcialmente o cimento reduz significativamente o impacto ambiental da indústria de construção civil e o subproduto LETA apresenta-se como uma alternativa promissora e sustentável para mitigar o processo das alterações climáticas, através da diminuição das emissões globais de CO_2 e outros gases com efeito estufa.

Apesar dos avanços das pesquisas nessa área, recomenda-se que em futuras investigações haja uma preocupação acrescida com a inclusão de estudos quer de ciclo de vida dos materiais, quer de viabilidade econômica do aproveitamento das LETA na indústria da construção civil, para avaliar qual o real impacto que o tratamento térmico aplicado ao resíduo, visando a redução do seu teor em matéria orgânica, poderá ter nos custos de produção de argamassas e betões mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AdP. (2022). *Relatório de sustentabilidade 2022*. https://www.adp.pt/pt/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/?id=214

Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2017). Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(9), 453. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6166-1

Altheman, D., Andréia Gachet, L., Siviero Pires, M., & Cristina Cecche Lintz, R. (2023). Water treatment waste as supplementary cementitious material. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.418

Batuecas, E., Ramón-Álvarez, I., Sánchez-Delgado, S., & Torres-Carrasco, M. (2021). Carbon footprint and water use of alkali-activated and hybrid cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, *319*, 128653. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128653

Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2. (2012, August). https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html

Dahhou, M., El Moussaouiti, M., Arshad, M. A., Moustahsine, S., & Assafi, M. (2018). Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge-incorporated Portland cement. *Journal*

of Material Cycles and Waste Management, *20*(2), 891–901. https://doi.org/10.1007/s10163-017-0650-0

De Carvalho Gomes, S., Zhou, J. L., Li, W., & Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *145*, 148–159. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032

De Carvalho Gomes, S., Zhou, J. L., Zeng, X., & Long, G. (2022). Water treatment sludge conversion to biochar as cementitious material in cement composite. *Journal of Environmental Management*, *306*, 114463. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114463

DI Bernardo, L., Dantas, A. D. B., & Voltan, P. E. N. (2012). Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. In *São Carlos: LDiBe* (1st ed.). LDiBe.

Gastaldini, A. L. G., Hengen, M. F., Gastaldini, M. C. C., do Amaral, F. D., Antolini, M. B., & Coletto, T. (2015). The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and Building Materials*, *94*, 513–520. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038

Godoy, L. G. G. de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Da Dalt, S., & Bonan Gomes, L. (2020). Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. *Case Studies in Construction Materials*, *12*, e00329. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00329

Hagemann, S. E., Gastaldini, A. L. G., Cocco, M., Jahn, S. L., & Terra, L. M. (2019). Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, *214*, 916–926. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324

He, Z. hai, Yang, Y., Yuan, Q., Shi, J. yan, Liu, B. ju, Liang, C. feng, & Du, S. gui. (2021). Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. *Journal of Cleaner Production*, *290*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125832

Hemkemeier, T. A., Almeida, F. C. R., Sales, A., & Klemm, A. J. (2023). Repair mortars with water treatment plant sludge (WTPS) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) for more eco-efficient and durable constructions. *Journal of Cleaner Production*, *386*, 135750. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135750

IBGE. (2020). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7469

IEA. (2023). *Global cement production in the Net Zero Scenario, 2010-2030.* IEA. https://www.iea.org/energy-system/industry/cement#tracking

Kaish, A. B. M. A., Odimegwu, T. C., Zakaria, I., Abood, M. M., & Nahar, L. (2021). Properties of concrete incorporating alum sludge in different conditions as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, *284*, 122669. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122669

Katayama, V. T., Montes, C. P., Ferraz, T. H., & Morita, D. M. (2015). Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *20*(4), 559–569. https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040105046

Laurindo, S. S., Antunes, E. G. P., Savi, A. E., Speck, J. A., & Piva, J. H. (2020). Estudo da adição de lodo de ETA - Estação de Tratamento de Água em argamassas de revestimento. *MIX Sustentável*, *6*(4), 19–28. https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.19-28

Li, D., Zhuge, Y., Liu, Y., Pham, P. N., Zhang, C., Duan, W., & Ma, X. (2021). Reuse of drinking water treatment sludge in mortar as substitutions of both fly ash and sand based on two treatment methods. *Construction and Building Materials*, *277*, 122330. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122330

Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Pham, P. N., Li, D., Oh, J.-A., & Siddique, R. (2021). The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks. *Resources, Conservation and Recycling*, *168*, 105291. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105291

Mattoso, A. P., Aguiar, J. L. B. de, Duarte, A. A. L. S. D., Lemos, H. M. O., & Cunha, S. R. L. (2023). Valorization of water treatment sludge from a circular economy perspective: the case of the WTP of Areias de Vilar. *6th International Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, 343–345.

Mattoso, A. P., Cunha, S., Aguiar, J., Duarte, A., & Lemos, H. (2024). Valorization of Water Treatment Sludge for Applications in the Construction Industry: A Review. *Materials*, *17*(8), 1824. https://doi.org/10.3390/ma17081824

Moreira, R. C. A., Guimarães, E. M., Boaventura, G. R., Momesso, A. M., & Lima, G. L. de. (2009). Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. *Química Nova*, *32*(8), 2085–2093. https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800019

Ramirez, K. G., Possan, E., Dezen, B. G. dos S., & Colombo, M. (2017). Potential uses of waste sludge in concrete production. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *28*(6), 821–838. https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2015-0178

Robayo-Salazar, R., Mejía-Arcila, J., Mejía de Gutiérrez, R., & Martínez, E. (2018). Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. *Construction and Building Materials*, *176*, 103–111. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.017

Ruviaro, A. S., Silvestro, L., Scolaro, T. P., de Matos, P. R., & Pelisser, F. (2021). Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. *Journal of Cleaner Production*, *327*, 129484. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129484

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, *114*, 2–26. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015

Soares, A. F. S., Silva, L. F. M., & Araújo, B. J. R. S. (2018). Poluição hídrica ocasionada pelo lodo gerado em estação de tratamento de água. *Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*.

Tafarel, N., Macioski, G., Carvalho, K., Nagalli, A., Freitas, D., & Passig, F. (2016). Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *21*, 974–986. https://doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0090

Tantawy, M. A. (2015). Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. Materials Research Bulletin, 61, 415–421. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.10.042

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, *43*, 125–130. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023

Visedo, G., & Pecchio, M. (2019). *ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*.

Zhuge, Y., Liu, Y., & Pham, P. N. (2022). Chapter 19 - Sustainable utilization of drinking water sludge. In D. C. W. Tsang & L. Wang (Eds.), *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes* (pp. 303–320). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824004-5.00001-3

Tema 4. Avaliação e modelação da sustentabilidade

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O PREÇO DO COMBATE À POBREZA ENERGÉTICA: O CASO DAS MORADIAS ESTILO EMIGRANTE

João Alpalhão[a]; Rogério Duarte[b]

[a] Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Setúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761 Setúbal, Portugal.

[b] MARE—Marine and Environmental Sciences Centre, Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Setúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761 Setúbal, Portugal. rogerio.duarte@estsetubal.ips.pt

RESUMO

Nas últimas décadas tem-se verificado uma melhoria nas condições de vida da população e uma preocupação crescente com o bem-estar e a saúde dos indivíduos. Observa-se, igualmente, uma crescente consciência de que outros fatores, como o conforto térmico nas habitações, em muito contribuem para a melhoria das condições de vida, e que deve ser reforçado o elo entre políticas relativas aos setores da habitação e da saúde. "Pobreza energética" vem-se destacando como um conceito catalisador e agregador de políticas públicas de saúde, de equidade no acesso à energia e de gestão da energia nos edifícios de habitação. Neste artigo, associa-se este conceito ao estudo de moradias estilo emigrante; moradias construídas até aos anos 1990, sobredimensionadas, que recorrem a soluções construtivas e materiais de fraca qualidade térmica. Usando uma ferramenta de simulação do comportamento térmico, estuda-se uma moradia-tipo. Com base numa análise de investimento, conclui-se ficar a redução da "pobreza energética" em moradias estilo emigrante muito dependente de medidas de incentivo à reabilitação com subsídios ou benefícios fiscais.

Palavras-chave: Pobreza energética, térmica de edifícios, moradia estilo emigrante, simulação, analise de investimento

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se verificado uma melhoria nas condições de vida da população e uma preocupação crescente com o bem-estar e a saúde dos indivíduos. Assegurados os cuidados primários de saúde, em sociedades onde os recursos abundam outros fatores tornam-se objeto de atenção das políticas públicas, nomeadamente, o conforto térmico nas habitações. Desde os anos 1990 que a legislação portuguesa relativa à térmica de edifícios reflete exigências de "salubridade, de higiene e de conforto" nas habitações (RCCTE de 1990 in Decreto-Lei 40/90 de 6 de fevereiro). Esta legislação surge da necessidade de reduzir consumos de energia no setor dos edifícios, mas deixa desde logo antever o elo entre políticas relativas aos setores da habitação e da saúde (Faculty of Public Health, 2023). Com a liberalização dos mercados de energia na Europa a partir do final do século XX, o acesso a energia nas habitações pelos cidadãos adquire progressivo destaque (Matias Santos, 2021), revelando-se o conceito "pobreza energética", introduzido em 1991 por Brenda Boardman (2009), um catalisador e agregador importante de políticas públicas relativas à saúde e relativas à equidade no acesso a energia e gestão da energia (eficiência energética e conforto térmico) nos edifícios de habitação.

A discussão da pobreza energética tem como foco natural os estratos mais pobres da população e a habitação social, contudo, face à fraca qualidade da construção em Portugal entre os anos 1970 e 1980, não é causa de surpresa estar Portugal entre os países europeus onde os cidadãos sentem mais dificuldade em manter as suas habitações aquecidas (DGEG, 2023; Eurostat, 2023). Neste artigo, iremos analisar o caso concreto de moradias ao estilo emigrante (César, 1996); um tipo de moradias muito abundante no norte de Portugal; moradias construídas até aos anos 1990, sobredimensionadas, que recorrem a soluções construtivas e materiais de fraca qualidade térmica.

Usando simulação dinâmica (DesignBuilder, 2023; EnergyPlus, 2023), estuda-se uma moradia-tipo ao estilo emigrante. Caracteriza-se o consumo de energia anual (caso exista aquecimento) e, considerando um indicador "graus-hora de desconforto", caracteriza-se o conforto térmico/ salubridade dos espaços para um ano meteorológico típico (DGEG, 2021). Usando este indicador, comparam-se cenários de reabilitação térmica da envolvente e de aquecimento da moradia. Para compreender o esforço financeiro associado a estes cenários, determina-se o custo total anualizado, contabilizando para além dos custos operacionais, estimativas dos investimentos requeridos.

Os resultados obtidos—os elevados custos totais anualizados associados aos cenários estudados—salientam a elevada probabilidade de pobreza energética em moradias ao estilo emigrante. Com efeito, com a reabilitação térmica da envolvente, com a adoção de sistemas de aquecimento centralizado, reduz-se significativamente o desconforto nas habitações; porém, os elevados custos associados (representando mais de 25% do rendimento mínimo anual em Portugal, Pordata, 2023) tornam improvável a reabilitação térmica, concluindo-se ficar a redução da pobreza energética nesta tipologia de moradias muito dependente de medidas de incentivo à reabilitação com subsídios ou benefícios fiscais.

2 MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA MORADIA ESTILO EMIGRANTE

Para o estudo da arquitetura ao estilo emigrante apoiámo-nos na tese de mestrado de César (1996), que faz uma caracterização arquitetónica da "casa do emigrante português". De acordo com César (1996, pp.14-15), o estilo emigrante "apresenta uma desigualdade aparente, bastante igual na realidade, [com] quase todas [as habitações] se podendo caracterizar por: (...)

- Uma profusão de cores e de materiais não estruturais no revestimento de paredes;

- (…)

- Inclinação excessiva da cobertura, revestida por vezes com telha marselha pintada de cor preta ou de tela asfáltica;

- (…)

-[a] Quase sempre de dois ou três pisos, sendo o piso térreo diferentemente revestido dos outros;

-[b] Caixilharias de alumínio anodizado, por vezes dourado, ou de madeira, com portadas exteriores;

(…)

-[c] Presença inevitável de construções anexas;

-[d] Múltiplas divisões, geralmente mais do que as necessárias;

-[e] Grandes áreas de construção;

-[f] Supremacia dimensional de cozinhas e salas."

Perante a fraca qualidade térmica dos materiais empregues, apesar da 'linguagem' arquitetónica em "rutura com a sobriedade volumétrica, cromática, construtiva e material" das habitações tradicionais, anteriores aos anos 1960 (César, 1996), as moradias ao estilo emigrante ficam desde logo associadas a um elevado desconforto térmico.

Neste artigo, para o estudo do estilo emigrante tem-se em consideração a perspicaz observação de Costa (1996) quando afirma "apresenta[rem as casas de emigrantes] uma desigualdade aparente, bastante igual na realidade", usando-se na definição da moradia-tipo as características por esta investigadora enumeradas, especialmente, aquelas listadas acima com as letras do alfabeto latino [a-f]. Quanto às soluções construtivas e propriedades termofísicas de materiais empregues na moradia-tipo, estas foram selecionadas entre as aquelas do ITE 50 (Pina dos Santos, 2010) que correspondem a soluções típicas anteriores aos anos 1990. A reabilitação térmica da envolvente (elementos opacos e vãos), correspondeu à atualização para soluções e materiais atuais que respeitam o REH (Portaria n.º 379-A/2015 de 22 de outubro). O sistema de aquecimento central adotado consiste em: uma caldeira a "pellets" para produção de água quente e radiadores distribuídos pelos espaços ocupados da moradia. Admitiu-se a moradia localizada em Viseu.

2.2 DETERMINAÇÃO DO INDICADOR "GRAUS-HORA DE DESCONFORTO"

Para avaliar o desconforto térmico com consequente impacto na saúde dos ocupantes determinou-se o indicador "graus-hora de desconforto", Gh,

$$Gh = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} gh(t)\,dt \Leftarrow gh(t) = \begin{cases} 21 - T(t) & \Leftarrow \quad T(t) < 21°C \\ 0 & \Leftarrow \quad T(t) \geqslant 21°C \end{cases}, \tag{1}$$

onde *t* representa um instante (uma hora) de um ano meteorológico tipo (DGEG, 2021) e *T*(*t*) representa a temperatura interior observada nesse instante (nessa hora).

Como referido em Howden-Chapman (2004), Osman (2008) e Ormandy (2012), associam-se temperaturas interiores inferiores a 21ºC a reduções significativas no bem-estar e saúde dos ocupantes; reduções que se tornam mais expressivas quanto mais baixas forem as temperaturas interiores. Estes autores referem patologias crónicas de obstrução pulmonar ao passo que Liddell (2010) e Marmot (2011) concluem, adicionalmente, que o desconforto com frio agrava problemas de artrite e reumatismo.

Para determinar as temperaturas interiores recorreu-se ao "software" DesignBuilder (DesignBuilder, 2023) que funciona como interface gráfica para o programa "EnergyPlus" (EnergyPlus, 2023). O DesignBuilder permite a simulação dinâmica do comportamento térmico de edifícios atendendo à ocupação/ equipamentos, à arquitetura, aos materiais de construção, sua massa térmica, tipo e posição de vãos, sombreamentos e, ainda, às soluções de AVAC.

A Figura 1 apresenta uma vista da moradia-tipo e plantas em perspetiva do rés-do-chão e do 1º piso.

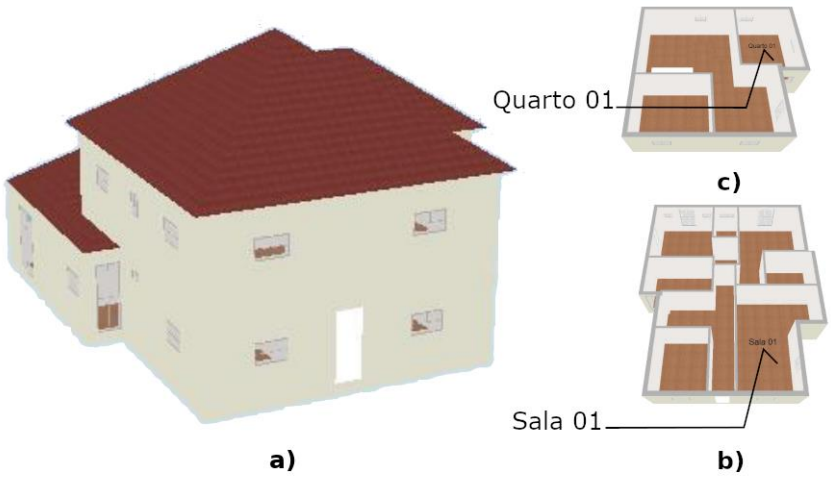


Figura 1 – (a) Vista da moradia-tipo e plantas (em perspetiva) do (b) rés-do-chão e do (c) 1º piso.

2.3 CUSTO TOTAL ANUALIZADO

Para comparar sob o ponto de vista financeiro os cenários (passivos) de reabilitação térmica da moradia, com o caso em que se introduz um sistema de aquecimento central, obteve-se com o "software" DesignBuilder o consumo de energia anual pelo sistema de aquecimento central e, deste consumo, obteve-se o custo operacional $C_{o,i}$ desse sistema. Os investimentos iniciais I_i para os *i* cenários de reabilitação térmica da envolvente e instalação de sistema de aquecimento central foram obtidos da ferramenta Cype (2023) e por consulta de fornecedores. Anualizaram-se os investimentos iniciais usando a expressão,

$$I_{a,i} = I_i \frac{j(1+j)^D}{(1+j)^D - 1} \tag{2}$$

com $I_{a,i}$ o investimento anualizado do cenário *i*, a taxa de juro (líquida de inflação, igual a 5%) representada por *j* e *D* a duração do investimento (15 anos). O custo total anualizado de cada cenário é determinado pela soma $C_{t,i} = I_{a,i} + C_{o,i}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o preço do combate à pobreza energética estudou-se a seguinte solução de reabilitação da envolvente (ReabEnv): Substituição de vãos envidraçados por outros com caixilhos de alumínio com corte térmico e vidro duplo; reabilitação da envolvente opaca com o isolamento térmico usando soluções do tipo ETICS; isolamento da cobertura inclinada e da laje em contacto com o solo.

Estudou-se ainda a solução que considera o uso de um sistema de aquecimento (SistAquec) que acrescenta à anterior reabilitação da envolvente a instalação de aquecimento central com caldeira a "pellets" e radiadores.

A Figura 2 compara graus-hora de desconforto em duas divisões da moradia de referência (quarto 01 orientado a norte no 1º piso; sala 01 orientada a sul no rés-do-chão; ver Figura 1b) sem reabilitação (Ref) e com a reabilitação da envolvente[1] (ReabEnv).

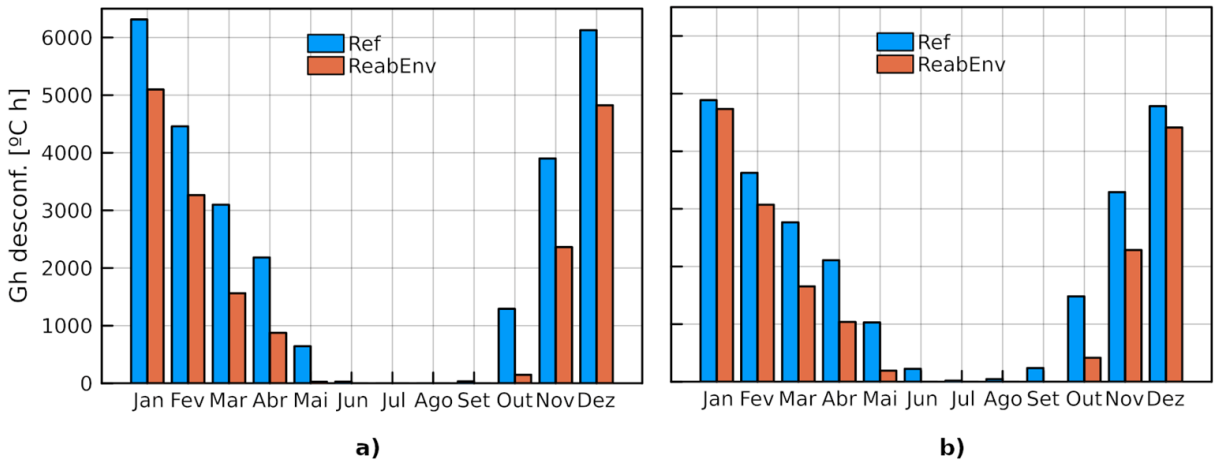


Figura 2 – Graus-hora de desconforto no (a) quarto 01 e na (b) sala 01 sem (Ref) e com (ReabEnv) medidas de reabilitação da envolvente. Resultados obtidos por simulação numérica.

Da Figura 2 conclui-se que, para o quarto 01, situado no 1º piso e virado a norte, a reabilitação térmica da envolvente permite reduzir em média ~1000 °C h de desconforto por mês. A redução média mensal dos graus-hora de desconforto na sala 01, no rés-do-chão e orientada a sul é menor, aproximadamente 500 °C h. Apesar destas reduções, especialmente para os meses mais frios, confirma-se ser indispensável aquecer os espaços.

Na Figura 3 apresenta-se a evolução das temperaturas horárias no quarto 01 e na sala 01 sem e com reabilitação da envolvente.

[1] O sistema de aquecimento garante a temperatura (mínima) de 21ºC nos espaços.

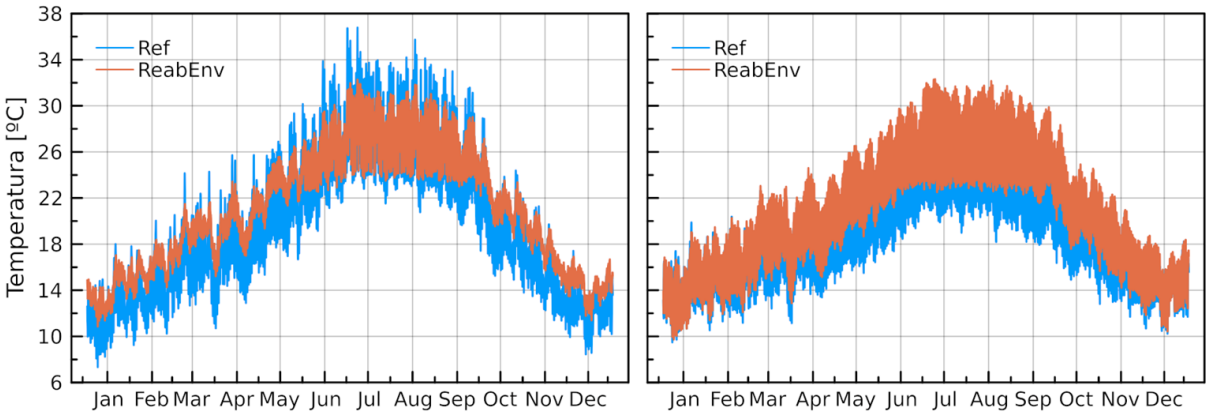


Figura 3 – Série temporal de temperaturas no (a) quarto 01 e na (b) sala 01 sem (Ref) e com (ReabEnv) medidas de reabilitação da envolvente. Resultados obtidos por simulação numérica.

A Figura 3 revela que apesar da reabilitação da envolvente, que conduz a um aumento da temperatura nos espaços, para os meses mais frios as temperaturas interiores mantêm-se muito abaixo dos 21°C.

Numa revisão do método de cálculo do indicador excesso de mortes no inverno (EWD, *Excess Winter Deaths*), Liddell (2016) usa dados de países europeus entre 1980 e 2013 concluindo que os valores mais elevados deste indicador são observados em países do sul da Europa; nomeadamente, em Portugal e Espanha. Liddell refere que este resultado contraintuitivo está relacionado com diferenças na duração da estação de aquecimento entre países. Liddell não associa o elevado número de mortes no inverno em Portugal ao preço da energia (com efeito, ao contrário do centro e norte da Europa, em Portugal não é habitual instalar sistemas de aquecimento central), mas a problemas construtivos nas habitações e à desadequação dos comportamentos dos indivíduos perante o clima (vestuário pouco adequado, hábitos desadequados). As Figuras 2 e 3 apontam, porém, para a necessidade efetiva de sistemas de aquecimento eficientes acarretando custos de investimento e de operação que poderão não estar ao alcance de todos.

O Quadro 1 apresenta reduções percentuais de graus-hora de desconforto relativamente a situação de referência, ou seja, a moradia-tipo sem qualquer reabilitação. Inclui, ainda, investimentos para a reabilitação da envolvente (com e sem o sistema de aquecimento central), custos totais anualizados e, para o caso em que de instala um sistema de aquecimento, custos operacionais devidos ao consumo de energia.

Quadro 1 – Síntese de resultados do estudo. A reduções percentuais de *Gh* são relativas à moradia tipo sem qualquer reabilitação.

	Divisão	**Redução *Gh* desconf.[%]**	**Investimento inicial, *I* [k€]**	**Custos operac., *Co* [k€]**	**Custo total anualiz. *Ct* [k€]**
Reabilitação Envolvente	Quarto 01	35	~29	0	2,8
	Sala 01	27			
ReabEnv + SistAquec	Quarto 01	100*	39,5 (=29+10,5)	0,975	4,8 (=2,8+2,0)
	Sala 01	100*			

(*) O sistema de aquecimento mantém os espaços com temperatura acima dos 21°C.

O Quadro 1 evidencia uma vez mais a incapacidade que uma reabilitação da envolvente tem, por si só, de evitar desconforto térmico com frio e consequentemente de manutenção de condições associadas a bem-estar e ambientes saudáveis. Com a introdução de um sistema de aquecimento torna-se possível assegurar temperaturas interiores superiores a 21°C, mas com um custo associado.

Os valores de investimento e de custos operacionais apresentados no Quadro 1 são, obviamente, indicativos; contudo, são suficientes para concluir que as medidas analisadas, com investimentos da ordem dos 30 e 40 k€, estão longe de ser acessíveis à população em geral. O investimento apenas no sistema de aquecimento no valor de 10,5k€ representa um custo operacional (anual) estimado em 975€; valor este obtido com a reabilitação da envolvente. Caso a envolvente não seja reabilitada, obviamente, este custo aumenta.

Admitindo a duração do investimento de 15 anos e uma taxa de retorno do capital investido de 5%, as medidas de reabilitação analisadas equivalem a custos anuais de 2,8 e 4,8k€; aproximadamente 25 e 45% (respetivamente) do rendimento anual determinado com base no ordenado mínimo nacional (Pordata, 2023). Confirma-se, portanto, tratar-se de valores inacessíveis a uma percentagem significativa da população, inclusive, a proprietários de moradias ao estilo emigrante.

4 CONCLUSÃO

Portugal é um dos países europeus onde no inverno as famílias têm mais dificuldade em manter as habitações quentes (Eurostat, 2023). Os resultados e discussão apresentados neste artigo mostram ser—com forte probabilidade—também este o caso das famílias que residem em moradias estilo emigrante, concluindo-se que a promoção do conforto e salubridade nestas moradias não se deve limitar à reabilitação da envolvente, requerendo aquecimento nos meses mais frios do ano.

O estudo apresentado assenta na análise de uma moradia localizada em Viseu que, representando a arquitetura e as soluções construtivas empregues nas moradias ao estilo emigrante, não caracteriza toda e qualquer moradia deste estilo. No entanto, porque os resultados obtidos apontam para níveis de desconforto extremos, variações na arquitetura, no clima (do norte de Portugal) e nas soluções construtivas (anteriores a 1990) não são, por certo, suficientes para influenciar significativamente as conclusões do estudo. Assim, apesar da aparente desigualdade arquitetónica das moradias ao estilo emigrante deve ser possível encontrar soluções suficientemente genéricas para reabilitar estas moradias. Estas soluções terão de combinar a reabilitação da envolvente com sistemas de aquecimento eficientes. Obviamente, políticas adequadas serão determinantes na promoção destas soluções e no combate à pobreza energética.

A este respeito deve referir-se que existem em Portugal políticas públicas de incentivo à reabilitação de edifícios e à transição energética. O Programa de Apoio a Edifícios + Sustentáveis é disso exemplo, com incentivos financeiros dirigidos a proprietários de edifícios residenciais (unifamiliares/ apartamentos). As medidas elegíveis deste programa incluem janelas eficientes, isolamento da envolvente, equipamentos de aquecimento e arrefecimento, sistemas fotovoltaicos, eficiência hídrica e arquitetura bioclimática. Os critérios gerais de elegibilidade compreendem a melhoria do desempenho energético, o recurso a fornecedores registados e critérios específicos dependentes de cada medida. Este tipo de financiamento baseia-se, contudo, no reembolso de despesas, presumindo a capacidade de investimento do proprietário. Também pressupõe a competência para navegar o procedimento de candidatura eletrónica cuja complexidade não está ao alcance de toda a população.

Para famílias economicamente vulneráveis existe o Programa Vale Eficiência; sucede que a tipologia de moradia analisada neste artigo não pertence, regra geral, ao segmento típico abrangido por este programa.

As políticas públicas de eficiência energética e combate à pobreza energética não precisam estar limitadas ao nível nacional. Iniciativas locais promovidas por câmaras municipais podem, inclusivamente, revelar-se mais adequadas, beneficiando de um conhecimento mais aprofundado da realidade e das necessidades concretas das comunidades. A este respeito, refira-se a necessidade de mais espaços (físicos ou digitais) facultando recursos didáticos e informativos sobre a eficiência energética e boas práticas. A ADENE—Agência para a Energia prevê instalar em Portugal, até ao final de 2025, cinquenta pontos "Espaço Cidadão Energia" para apoiar a população nas temáticas da energia e sustentabilidade energética.

REFERÊNCIAS

- Alpalhão, João, 2022. O preço do combate à pobreza energética: O caso das moradias estilo emigrante. Relatório de Projeto de Mestrado em Engenharia e Gestão de Energia na Indústria e Edifícios, Instituto Politécnico de Setúbal (http://hdl.handle.net/10400.26/42654). Acedido a 6 mar. 2023.

- Boardman, Brenda, 2009. Fixing Fuel Poverty Challenges and Solutions. Routledge.

- César, Ana, 1996. A casa do emigrante português: Caracterização arquitetónica e sua contextualização. Tese de mestrado em construção de edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Cype, 2023. Gerador de preços para a construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A. (http://www.geradordeprecos.info/) Acedido a 6 de mar. 2023.

- Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de fevereiro do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Diário da República: I série, n.º 31 (1990). Acedido a 6 mar. 2023.

- DesignBuilder, 2023. DesignBuilder (Versão 7.0.2.004) [Software de Computador] (https://designbuilder.co.uk/software/product-overview) Acedido a 6 de mar. 2023.

- DGEG (2021). Portuguese Climate Data for Building Simulation. DEIR Studies on the Portuguese Energy System 006. Directorate-General for Energy and Geology, Divison of Research and Renewables, Lisbon, Portugal. February 2021. 29 pp. ISBN 978-972-8268-57-2. (https://www.dgeg.gov.pt/media/zehpf0nk/portuguese-climate-data-for-building-simulation.pdf) Acedido a 6 de mar. 2023.

- DGEG, 2023, Energy Consumer Protection Policies: Energy Poverty. Sítio da Direção Geral de Energia e Geologia (https://www.dgeg.gov.pt/en/transversal-areas/energy-consumer-protection-policies/energy-poverty/) Acedido a 6 de mar. 2023.

- EnergyPlus, 2023. EnergyPlus (Versão 22.2.0) [Software de Computador] (https://energyplus.net/) Acedido a 6 de mar. 2023.

- Eurostat, 2023. Can you affort to heat your home? Official EU website (https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200106-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Feurostat%2F) Acedido a 6 de mar. 2023.

- Faculty of Public Health, 2023. Fuel Poverty and Affordable Warmth. Faculty of Public Health website (https://www.fph.org.uk/media/2593/a6-fph-sig-fuel-poverty-affordable-warmth-final.pdf). Acedido a 6 de mar. 2023.

- Howden-Chapman, P., 2004. Housing standards: A glossary of housing and health. J. Epidemiol. Community Health, 58, pp.162–168.

- Liddell, C.; Morris, C., 2010. Fuel poverty and human health: A review of recent evidence. Energy Policy, 38, pp.2987–2997.

- Liddell, C.; Morris, C.; Thomson, H.; Guiney, C., 2016. Excess winter deaths in 30 European countries 1980–2013: A critical review of methods. J. Public Health, 38, pp.806–814.

- Marmot Review Team, 2011. The Health Impacts of Cold Homes and Fuel Poverty; Friends of the Earth and the Marmot Review Team: London, UK.

- Matias Santos, Filipe, 2021. Reflexões de direito da energia. ERSE. ISBN 978-989-53010-5-8.

- Ormandy, D.; Ezratty, V., 2012. Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies. Energy Policy, 49, pp.116–121.

- Osman, L.M.; Ayres, J.G.; Garden, C.; Reglitz, K.; Lyon, J.; Douglas, J.G., 2008. Home warmth and health status of COPD patients. Eur. J. Public Health, 18, pp.399–405.

- Pina dos Santos, C., Matias, L., 2010. ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. LNEC. ISBN: 978-972-49206-5-8.

- Pordata, 2023. Evolução do salário mínimo nacional. Sítio da Fundação Francisco Manuel dos Santos (https://www.pordata.pt/portugal/evolucao+do+salario+minimo+nacional-74) Acedido a 6 de mar. 2023.

- Portaria n.º 379-A/2015 de 22 de outubro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Diário da República: I série, n.º 207 (2015). Acedido a 6 mar. 2023.

- Rudge, J.; Gilchrist, R., 2005. Excess winter morbidity among older people at risk of cold homes: A population-based study in a London borough. J. Public Health, 27, pp.353–358.

- SGA, 2023. Programa Vale Eficiência, Sítio do Fundo Ambiental, Secretaria-Geral do Ambiente. (https://www.fundoambiental.pt/apoios-prr/c13-eficiencia-energetica-em-edificios/02c13-i01-programa-vale-eficiencia.aspx). Acedido a 6 de mar. 2023.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS: CONTRIBUIÇÕES A PARTIR DE UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Vinícius Capistrano de Paiva Veras[a]; Mauro José da Silva Filho[b]; Madson Lucas de Souza[c]; Lucas Ramiro Burgos[d]; Alexandre Araújo Bertini[e]

[a] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, viniciuscapistrano@alu.ufc.br

[b] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, mauro.filho@alu.ufc.br

[c] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, madsonlucas@alu.ufc.br

[d] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, lucasburgos@ing.unsa.edu.ar

[e] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, bertini@ufc.br

RESUMO

Devido ao avanço da construção no Brasil, as obras têm buscado por baixo desperdício, maior velocidade, redução de trabalhadores e a melhora da qualidade. A industrialização na construção é intensificada pelo surgimento de novos sistemas construtivos. A avaliação dos sistemas construtivos é fundamental para validar o desempenho técnico, ambiental, social e de gestão. O objetivo deste trabalho é realizar uma Revisão Sistemática da Literatura sobre Avaliação de Sistemas Construtivos Industrializados. Os trabalhos publicados foram mapeados através do protocolo de pesquisa e buscados em periódicos no período entre 2018 a 2022. Os artigos foram classificados em categorias distribuídas em sete tópicos: anos de publicação, países e continentes, tipos de avaliação, autores dos artigos, universidades, áreas de pesquisa e palavras-chave. Os resultados demonstraram que houve aumento dos estudos nos últimos anos, principalmente, acerca da avaliação do desempenho e sustentabilidade. As publicações foram mais registradas na Ásia, devido ao avanço da industrialização no continente. Foi destacada a necessidade da pesquisa para Habitações de Interesse Social, pois as publicações selecionadas dedicam-se à análise em edificações isoladas. A relevância deste trabalho é ressaltada por construir um panorama sobre as pesquisas publicadas e oferecer um contexto que permite a visualização do que ainda precisa ser pesquisado.

Palavras-Chave: Avaliação. Construção Civil. Industrialização. Sistemas. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma indústria composta por atividades complexas que se desenvolvem em um ambiente particularmente dinâmico. Os produtos de engenharia são formados por diferentes tipos de serviços e requerem um grande número de profissionais em diferentes áreas, tornando o gerenciamento de uma obra um trabalho complexo (MATOS, 2010). Sabe-se que ainda há muito improviso nos canteiros de obra. No Brasil, muitas obras habitacionais são executadas artesanalmente, sem um planejamento formal e sem garantia do cumprimento do prazo e orçamento previamente estabelecidos (LIMMER, 1997).

O setor da construção civil no Brasil é considerado atrasado nos meios industriais, no entanto, com o crescimento de empreendimentos voltados ao segmento econômico no qual a margem de lucro sobre unidade é muito pequena, o negócio se torna viável economicamente somente com a produção em massa, implicando na industrialização do setor de elementos estruturais e vedação até elementos menores como instalações elétricas e hidráulicas (FARIA, 2008). A industrialização na construção tem como principal objetivo garantir baixo desperdício, maior velocidade de execução, nível de produção de qualidade, reduzir o número de trabalhadores, melhorar a qualidade, diminuir a ocorrência de patologias e melhorar a organização, ou seja, buscar construções cada vez mais enxutas, sendo consideradas o futuro do desenvolvimento construtivo (MOURA; SÁ, 2014).

Nos últimos anos, verificou-se um intenso surgimento de novos sistemas construtivos industrializados, tanto importados de países desenvolvidos assim como os criados pelo setor privado, pelas universidades e instituições de pesquisa. A partir de 1970, houve o surgimento ainda maior de tecnologias em um conjunto habitacional, no Estado de São Paulo, servindo assim, como um laboratório para o desenvolvimento e avaliação dos sistemas construtivos (IPT,1985). Devido à baixa qualidade dos materiais e mão de obra de construção, muitas dessas técnicas não se adaptaram ao ambiente técnico e não foram devidamente observadas durante sua implementação. Com o tempo, o foco na avaliação de desempenho e controle de qualidade começou a surgir no Brasil. A justificativa para isso foi o desenvolvimento dessas tecnologias sem a devida avaliação prévia, diferentemente do que ocorreu no pós-guerra nos países desenvolvidos, onde componentes e sistemas construtivos foram produzidos ao mesmo tempo em que se criava uma mentalidade de produção industrial e, por isso, a necessidade de demonstrar sua eficiência por meio de avaliações de desempenho e qualidade (IPT, 1985).

Como resultado, surgem métodos de avaliação de sistemas construtivos, com o objetivo de validar o desempenho das construções em termos de avaliações técnicas, ambientais, sociais e de gestão. No entanto, a avaliação tecnológica no Brasil dá maior ênfase às questões tecnológicas e ambientais. Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre Avaliação de Sistemas Construtivos Industrializados. Para isso, foram levantados e classificados artigos publicados em periódicos no período de 2018 a 2022, compreendendo um período de 5 anos, destacando os tipos de avaliação de maior interesse de trabalhos recentes, bem como os que ainda precisam ser explorados. Este trabalho é justificado pela necessidade de construir um panorama acerca das publicações sobre o tema.

2 DADOS E MÉTODOS

A RSL é uma pesquisa bibliográfica que utiliza métodos explícitos, contábeis e sistemáticos, sendo consistida na busca, sobre determinado tema, sobre: o que é conhecido, como é conhecido, como isso varia entre os estudos e, da mesma forma, o que não foi estudado em pesquisas anteriores (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012).

Sua importância se faz evidente por diversos fatores: (1) basear-se em pesquisas pontuais é arriscado, porque qualquer pesquisa individual pode ser falha; (2) a RSL fornece um quadro mais forte e abrangente, baseado em muitos estudos ao invés de um único estudo; (3) a tarefa de se manter a par de todas as pesquisas anteriores geralmente é muito grande para um indivíduo; (4) os resultados de uma RSL fornecem um contexto para interpretar os resultados de um novo estudo primário; (5) realizar novos estudos primários sem se informar sobre pesquisas anteriores pode resultar em pesquisas desnecessárias, inapropriadas, irrelevantes ou antiéticas (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012).

As revisões sistemáticas da literatura envolvem três atividades chave a serem realizadas: identificar e descrever pesquisas anteriores (mapear a pesquisa); avaliar criticamente os resultados de forma sistemática; e reunir as descobertas em uma declaração coerente, conhecida como síntese (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012). O Quadro 1 apresenta o protocolo de busca, elaborado a partir do modelo proposto por Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015). Inicialmente, descreveu-se a estrutura conceitual utilizada, definindo o tema central da revisão, descrevendo os critérios de inclusão e exclusão e os termos de busca. A *string* utilizada foi "*Assessment of building systems AND Construction industry"* em inglês, ou "Avaliação de sistemas construtivos AND Indústria da construção civil", em português. Estes termos foram escolhidos para abranger todos os estudos que de alguma forma abordaram a avaliação de sistemas industrializados.

Quadro 1 – Questões de pesquisa para realização da RSL

Protocolo para Revisão Sistemática de Literatura (RSL)	
Estrutura Conceitual	Avaliar o impacto dos diversos sistemas industrializados na construção civil
Contexto	Disseminação do uso de sistemas industrializados na construção civil
Horizonte de pesquisa	Estudos publicados no período de 2018 a 2022 (5 anos)
Idiomas	Inglês e Português
Questão de revisão	Quais as literaturas existentes atualmente que tratem das avaliações dos sistemas industrializados na construção civil
Critérios de exclusão	Artigos não publicados em periódicos, que não tenham relação com o tema, que foram publicados antes de 2018 e que não possuem qualquer tipo de acesso aberto nas bases de dados
Critério de busca	Artigos de periódicos que tratem das avaliações dos sistemas industrializados na construção civil
Termos de busca (*string*)	**Português:** (Avaliação de sistemas construtivos) AND (Indústria da construção)
	Inglês: (Assessment of building systems) AND (Construction industry)

Após a elaboração do protocolo e definidos os termos de busca, com o auxílio da plataforma Periódicos Capes, realizaram-se as buscas nas bases de dados selecionadas*: Web of Science* e *Scopus*. A definição das *strings* partiu de uma análise prévia de artigos relevantes sobre o tema, conforme sugerem Cooper, Hedges e Valentine (2009).

O processo de triagem se iniciou com a análise dos artigos e teve início na leitura dos títulos, do abstract e das palavras-chave, avaliando se estes estavam relacionados ou não ao tema da pesquisa. Na etapa de avaliação dos artigos completos, foram analisadas as questões de pesquisa, objetivos, métodos e resultados. A partir disso e considerando os critérios de seleção citados no Quadro 1, os

artigos foram aceitos ou rejeitados. Além disso, os filtros foram aplicados de forma que as buscas resultaram em artigos publicados nos últimos cinco anos e nos idiomas inglês e português. Como resultado das buscas, obteve-se um total de 1.144 trabalhos: 440 no *Web of Science* e 704 no *Scopus*.

No *Web of Science*, após a busca por título, resumo e palavra-chave, obteve-se um total de 440 trabalhos. Após a filtragem por área de pesquisa e com relação ao tema, 332 trabalhos foram aceitos para a etapa posterior. Seguindo o procedimento, tem-se a exclusão de: 32 trabalhos por não seguirem padrões de artigo, 7 artigos de outros idiomas e 173 artigos por não terem acesso aberto na base de dados. Realizou-se uma triagem por categoria, a qual resultou em 46 artigos. A fim de selecionar apenas os de maior proximidade com o tema, 15 artigos foram selecionados, conforme a Figura 1.

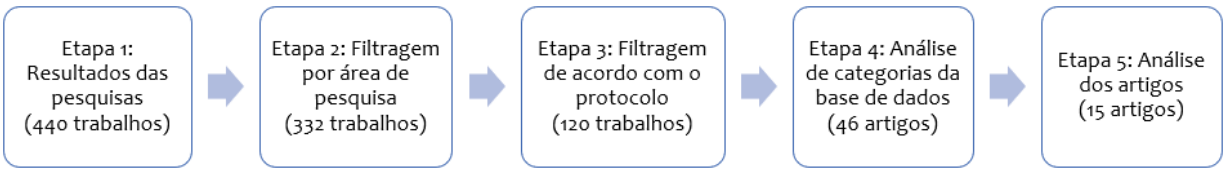


Figura 1 – Fluxograma de seleção dos artigos no Web of Science

Já em relação ao *Scopus*, obteve-se, inicialmente, um total de 704 trabalhos publicados. Após a filtragem por área de pesquisa e com relação ao tema, 419 trabalhos foram aceitos para a etapa posterior. De acordo com o protocolo, tem-se a exclusão de: 175 trabalhos por não seguirem padrões de artigo, 9 artigos por estarem em outros idiomas e 151 artigos por possuírem acesso fechado na base de dados. Tem-se, então, o resultado de 84 artigos. Após a análise completa, restaram 16 artigos a serem selecionados, conforme a Figura 2.

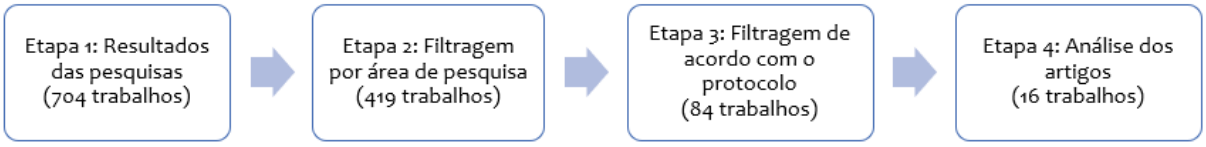


Figura 2 – Fluxograma de seleção dos artigos no Scopus

Dessa forma, obteve-se o total de 31 artigos considerados (15 da *Web of Science* e 16 da *Scopus*), mas verificou-se que 6 estavam duplicados, restando, portanto, 25 artigos para esta RSL. Após a seleção, foi necessária a busca pelo texto dos artigos e iniciou-se a etapa de classificação em relação a seis tópicos: anos de publicação, países de publicação, tipos de avaliação, autores dos artigos, universidades e palavras-chave.

Após a etapa de seleção, foi necessária a busca pelo texto dos artigos. Com isso, iniciou-se a etapa de classificação, no qual os mesmos foram divididos de acordo com os critérios estabelecidos, referentes a sete tópicos: anos de publicação, países e continentes, tipos de avaliação, autores dos artigos, universidades, áreas de pesquisa e palavras-chave.

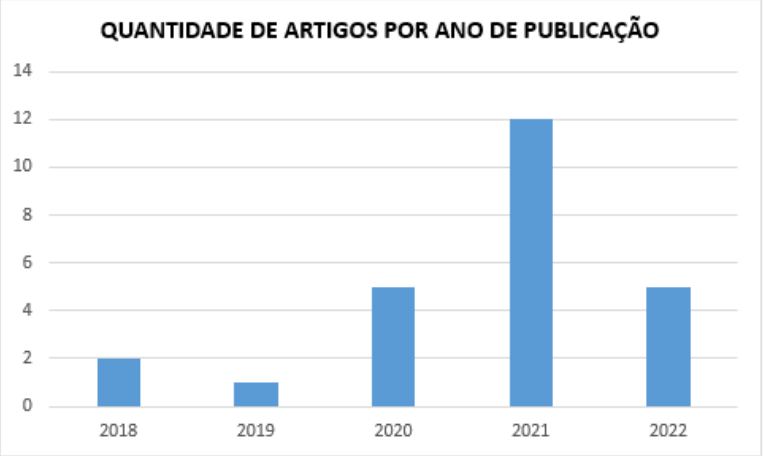
É importante destacar que 1.119 trabalhos foram descartados por não respeitarem o protocolo previamente estabelecido. Desse quantitativo, 393 foram rejeitados por pertencerem à outras áreas de pesquisa, 207 trabalhos por não estarem em formato de artigo, 16 por estarem em outros idiomas, 324 artigos por possuírem acesso fechado nas bases de dado, 74 trabalhos após a filtragem por categoria, 99 artigos após sua análise e, por fim, 6 por estarem duplicados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação a quantidade de artigos por ano de publicação, pode-se observar através do Gráfico 1 que a maior parte ocorreu no ano de 2021 com 12 publicações. Em seguida, destacam-se os anos de 2020

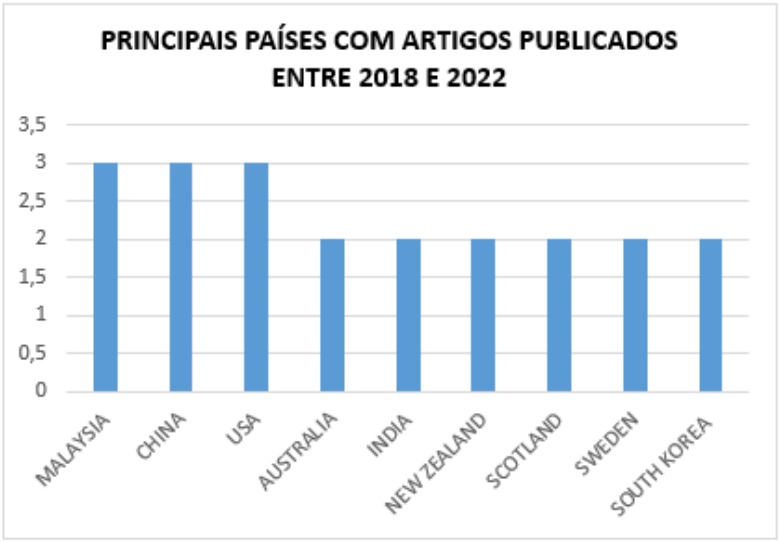
e 2022, com 5 publicações em cada. O ano de 2018 contemplou 2 publicações e, por fim, o ano de 2019, com apenas 1 trabalho publicado. De acordo com essa análise, percebe-se que houve uma tendência de crescimento no número de publicações no período da pandemia do COVID-19.

Gráfico 1 – Artigos publicados por ano de publicação



Em relação ao País de publicação dos periódicos, verificou-se que os artigos considerados foram publicados em 26 nações. Os principais foram destacados no Gráfico 2. Pode-se observar que três países se destacam: Malásia, China e EUA, com 3 publicações no período considerado. Em seguida, com 2 publicações em cada, tem-se os países: Austrália, Índia, Nova Zelândia, Escócia, Suécia e Coreia do Sul. Conforme mostra o Quadro 2, é importante considerar, ainda, que a maioria dos artigos é concentrada no continente asiático, com 10 artigos publicados em 4 países.

Gráfico 2 – Principais países com artigos publicados entre 2018 e 2022

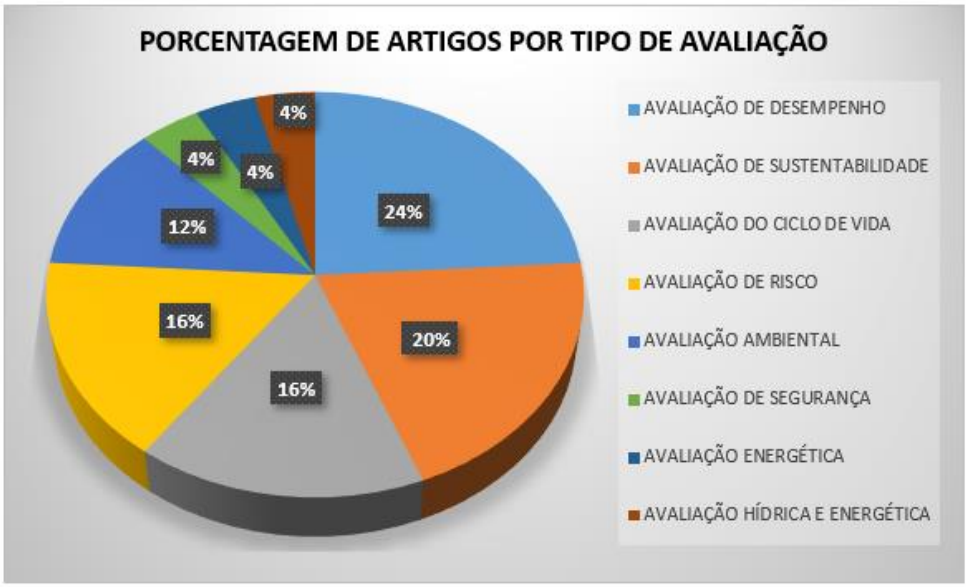


Quadro 2 – Continentes com publicações

WEB OF SCIENCE* E *SCOPUS		
CONTINENTE DE PUBLICAÇÃO	QUANTIDADE DE PAÍSES	QUANTIDADE DE ARTIGOS
Ásia	4	10
Europa	2	4
Oceania	2	4
América do Norte	1	3

Classificando por tipo de avaliação, foram considerados os tipos: Desempenho, Sustentabilidade, Ciclo de Vida, Risco, Ambiental, Segurança, Energética e Hídrica. Através do Gráfico 3, percebe-se que a Avaliação de Desempenho foi a mais encontrada nos artigos, representando 24% do total. Em seguida, tem-se a Avaliação de Sustentabilidade com 20%. Já a Avaliação do Ciclo de Vida e a de Risco representam 16% cada. O quinto tipo mais encontrado nas buscas, a Avaliação Ambiental, representa 12% do total.

Gráfico 3 – Principais países com artigos publicados entre 2018 e 2022



Em relação aos autores dos trabalhos, foi obtido um total de 91 resultados para os 25 artigos considerados, com exatamente 1 artigo publicado por cada. Alguns deles foram mostrados no Quadro 3. Embora comum, é importante destacar que os artigos possuem mais de um autor.

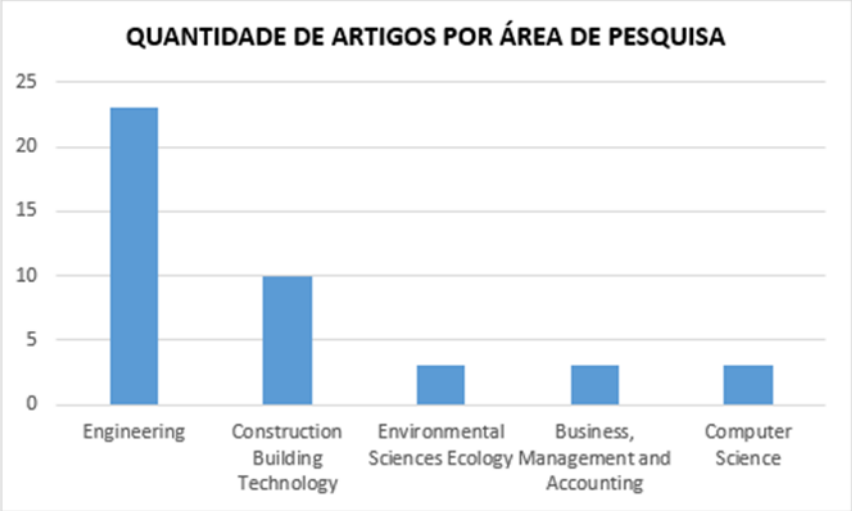
Quadro 3 – Lista dos autores das publicações dos artigos selecionados

Autores					
Abas, N.H.	Barbosa, A.R.	Di Maria, A.	Ghazali, F.E.M	Ju, Y.K.	Laso, J.
Abejón, R.	Chan, D.W.M.	Fang, Z.Y.	Haddad, A.	Junussova, T.	Lazar, N.
Alawneh, R.	Chithra, K.	Finch, G.	Hagentoft, C.E.	Karaca, F.	Lee, D.
Baas, E.J.	Dani, A.A.	Gaido, A.	Hammad, A.W.	Kim, S.	Mañana, M.
Bae, J.	Di Maio, F.	Gebremariam, A.	Jang, A.	Kvande, T.	Mansour, S.

Em relação às universidades das publicações, tem-se o total de 52 instituições, com destaque para duas universidades da Malásia, a Universiti Sains Malaysia e a University of Tun Hussein Onn Malaysia, que acumulam um total de 4 artigos publicados.

Já em relação à quantidade de artigos publicados por principais áreas de pesquisa, como pode-se observar no Gráfico 4, pouco mais de 40% dos artigos estão concentrados na área da Engenharia, seguida da área de Tecnologia da Construção, com 10 artigos publicados. As três últimas principais áreas são: Ciências Ambientais, Negócios, Gestão e Contabilidade e Ciência da Computação, com 3 artigos publicados em cada. É importante destacar que um mesmo artigo pode estar contido em mais de uma área de pesquisa para ambas as bases de dados.

Gráfico 4 – Quantidade de artigos por principais áreas de pesquisa



Além disso, foi criada uma nuvem de palavras, conforme a Figura 3, a respeito das palavras do corpo do texto dos artigos, na qual é possível observar que a mais citada é “Industrialização da construção”, que possui 6 citações. Em seguida, tem-se as palavras “Projeto arquitetônico”, “Desenvolvimento Sustentável”, “Construção Verde” e “Avaliação de Desempenho”, com 2 citações cada. As demais foram mostradas na distribuição da nuvem.

Figura 3 – Nuvem de palavras-chave dos artigos

Este estudo de Revisão Sistemática da literatura analisou 25 artigos sobre o tema "Avaliação de sistemas construtivos industrializados", indexados em periódicos no período de 2018 a 2022. Os resultados apresentados, de acordo com protocolo estabelecido, direcionam as seguintes discussões:

- No período considerado, houve uma tendência de crescimento na publicação de artigos nos anos de 2020 e 2021, fato que pode ter relação com a pandemia de COVID-19, uma vez que as pessoas, na maioria das vezes isoladas em suas residências, possuíam mais tempo livre para desenvolver as pesquisas.

- Foi possível observar que houve um maior número de publicações registradas no continente asiático, fato que pode ter relação com o significativo índice de industrialização da Ásia, que possui os principais países do ranking mundial.

- Observou-se que, no período considerado, houve uma maior atenção dos autores em avaliar os sistemas construtivos industrializados em relação ao desempenho e a sustentabilidade, fato que pode ter relação com a crescente preocupação da sociedade nos últimos anos com esses índices.

- É importante destacar que a palavra-chave "Desenvolvimento Sustentável" foi uma das mais citadas nos artigos. Isso remete a grande importância que o tema desta RSL possui quando relacionada a "Sustentabilidade", área que está sendo amplamente estudada desde a última década, especialmente no que diz respeito à ações sustentáveis com o objetivo de preservar o meio ambiente e os recursos naturais para gerações futuras.

- Embora o número de artigos selecionados da amostra tenha sido relativamente pequena, os mesmos podem constituir uma referência para trabalhos futuros e apontam para uma necessidade de mais pesquisas no tema considerado.

4 CONCLUSÕES

Os resultados e a discussão desta Revisão Sistemática da literatura, baseada na análise de 25 artigos sobre o tema "Avaliação de sistemas construtivos industrializados", levam à conclusão de que apesar da importância dos trabalhos acadêmicos relacionados a esta temática, ainda são poucas as pesquisas que, de fato, abordam esse tema. O número reduzido de resultados na RSL no período considerado indica a necessidade de um número maior de pesquisas que avaliem os sistemas construtivos industrializados com relação a outros tipos, como, por exemplo, a avaliação de custo.

É importante destacar que a metodologia desta RSL, em relação aos periódicos, teve como foco as publicações indexadas e de grande impacto na área. A amostragem considerada, no entanto, pode apresentar diferenças em relação à quantidade e relevância das pesquisas analisadas quando comparadas com o que efetivamente foi produzido.

Foi possível notar também que as publicações relacionadas à avaliação dos sistemas construtivos industrializados dedicam-se, prioritariamente, à análise em apenas uma edificação. No entanto, não deve-se descartar a relevância desse tipo de pesquisa para aplicações em Habitações de Interesse Social, pois são fundamentais para que os resultados possuam um alcance maior, considerando a construção de várias edificações. Dessa forma, verifica-se potencial para melhorar a qualidade das HIS.

Por fim, recomenda-se que as futuras pesquisas sobre este tema tragam novos parâmetros de avaliação, além dos descritos nesta RSL, que possam contribuir com a melhoria da qualidade dos sistemas construtivos industrializados.

REFERÊNCIAS

COOPER, H.; HEDGES, L.V.; VALENTINE, J.C. Handbook of Research Synthesis and Meta-Analysis, Second Edition. New York: Russell Sage Foundation, 2009.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo, Bookman, 2015.

FARIA, R. Industrialização econômica. Revista Téchne, nº 136, Julho de 2008.

GOUGH, D, OLIVER, S, THOMAS, J. An introduction to systematic reviews. London: Sage Publications Ltd,, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). Avaliação de Alternativas Tecnológicas em Habitação. São Paulo: Equipe do IPT, 1985. 29 p.

LIMMER, C. V. Planejamento, orçamentação e controle de projetos e obras. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MATTOS, A. D. Planejamento e controle de obras (1. ed.). São Paulo: PINI, 2010.

MOURA, A.; SÁ, M. V. V. A. Influência da racionalização e industrialização na construção sustentável. Revista Tecnologia & Informação – Revista Científica da Escola de Engenharias e Ciências Exatas. Universidade Potiguar, Natal, Ano 1, n.1, p 64-77, 2014.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS DE UMA CENTRAL DOSADORA

Giovanna Patricia Gava[a]; Stefani Triper[b]; Emily Cristina de Almeida[c]; Eduardo Rigo;[d] Edna Possan[e]

[a] Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitaria 2069, Cascavel, Paraná, Brazil, giovanna.oyamada@unioeste.br; gpgava@gmail.com

[b] Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitaria 2069, Cascavel, Paraná, Brazil, stefanitripergonçalves@gmail.com

[c] Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitaria 2069, Cascavel, Paraná, Brazil, emilyalmeida05@gmail.com

[d] Unila – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, eduardorigo.e@gmail.com

[e] Unila – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, edna.possan@unila.edu.br; epossan@gmail.com

RESUMO

Este estudo avalia os indicadores de ecoeficiência - Índice de Ligante (IL) e Índice de CO_2 (IC) - de concretos de resistência inferior a 50MPa, produzidos em uma central dosadora brasileira. Foram coletadas amostras de concretos das classes C25, C30 e C35, recém misturadas na central, em duas datas distintas. Fez-se a moldagem de corpos de prova para ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias, módulo de elasticidade aos 28 dias e a determinação do proporcionamento real dos concretos. Para o cálculo do IC, os dados de emissões de CO_2 foram obtidos da literatura e do SIDAC – Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. Os concretos produzidos nesta central possuem IC entre 6,1 e 9,7 $kgCO_2/m^3/MPa$ e IL entre 9,1 e 13,7 kg de cimento/m^3/MPa, valores considerados aceitáveis para concretos com resistência inferior a 50 MPa, face os resultados do estudo de *benchmarking* da literatura. Os indicadores de ecoeficiência tendem a melhorar com a elevação da resistência à compressão, sendo influenciados pelo controle de produção da central. O conhecimento destes indicadores contribui para melhorias do processo de produção em central dosadora, permitindo a produção de concretos com menor pegada de carbono e energia incorporada, colaborando para a redução de custos e descarbonização do setor.

Palavras-Chave: Indicadores de desempenho. Emissões de CO_2. Sustentabilidade. Consumo de Ligante. Descarbonização.

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais fontes de emissões de gases efeito estufa (GEE) na construção civil está relacionada ao cimento, que é o material mais utilizado na produção do concreto, representando pelo menos 70% das emissões de GEE na produção do concreto (Habert *et al.* 2020). Grande parte das emissões está associada ao teor de clínquer contido nos cimentos. A produção do clínquer utiliza como principal matéria-prima a rocha calcária, responsável por grande parte das emissões de CO_2, provenientes da calcinação da rocha calcária e do consumo de energia associado ao processo de fabricação do cimento (Costa *et al*. 2013).

A indústria do cimento já adota ações para reduzir as emissões da produção desse material, como fornos mais eficientes, mudanças nos combustíveis utilizados e substituição de parte do clínquer por adições minerais (Machado 2020). Segundo Scrivener, John e Gartner (2018), além da redução do uso de clínquer na produção de cimentos, a utilização eficiente do cimento na produção do concreto é uma alternativa significativa para proporcionar reduções substanciais nas emissões de CO_2. Misturas de concreto com alta eficiência de cimento são aquelas que apresentam desempenho adequado com o menor consumo de cimento possível.

A ecoeficiência consiste em entregar produtos ou serviços com o menor impacto ambiental possível, ao mesmo tempo em que mantém ou reduz seu custo (John 2019). Na construção civil, isso significa a busca por materiais e práticas que reduzam o impacto ambiental, incluindo a pegada de carbono, sem comprometer a qualidade e a segurança das edificações (Damineli *et al.* 2012). Pode-se considerar um concreto ecoeficiente àquele que atende o desempenho requerido no estado fresco e endurecido, produzido com baixa pegada de carbono e custo otimizado, sendo também desejável a promoção da economia circular por meio da incorporação de resíduos no proporcionamento do material (Goulart, 2023). Damineli *et al.* (2010) propõe dois indicadores de desempenho que permitem aos profissionais e às organizações estimarem facilmente a eficiência da utilização do cimento: o índice de ligantes (IL), o qual permite a avaliação da eficiência do cimento no concreto, por meio da relação entre a massa de cimento consumida por metro cúbico de concreto para gerar 1 Megapascal (MPa) de resistência; e o índice de CO_2 (IC), que quantifica o potencial de degradação ambiental do concreto, por meio da determinação da massa de CO_2 emitida para cada metro cúbico de concreto produzido por megapascal de resistência alcançada pelo concreto. Estes indicadores visam favorecer a adoção de estratégias de mitigação, estabelecendo referência e metas viáveis para a medida de ecoeficiência nos concretos de cimento Portland.

A análise da ecoeficiência dos concretos produzidos em centrais dosadoras a partir dos indicadores IL e IC é um tema ainda pouco explorado, sendo que a maior parte do mercado produtor desconhece seus indicadores de produção. O conhecimento destes indicadores é de importância para promoção de melhorias na produção, especialmente para a descarbonização do setor.

Nesse contexto, o presente artigo faz uma análise da ecoeficiência de concretos de classe de resistência C25, C30 e C35 produzidas em uma central dosadora por meio dos indicadores IL e IC propostos por Damineli *et al.* (2010). Busca-se obter um retrato do desempenho atual dos concretos produzidos pela central, quais variáveis afetam esses indicadores e como o processo de produção dos concretos pela central afeta os índices de ecoeficiência. Objetiva-se criar um banco de dados para que futuramente possa ser definido parâmetros mínimos a serem atingidos na produção de concretos ecoeficientes em centrais dosadoras.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 COLETA DO CONCRETO

O trabalho foi desenvolvido em uma central dosadora da cidade de Cascavel-Paraná-Brasil que possui uma capacidade de produção diária de 60 m³ de concreto. A central dosadora é do tipo II (ABNT NBR 7212, 2021) – cimento armazenado em silo e dosado em balança própria e agregados armazenados em caixas individuais e dosados em massa de forma individualizada e os materiais são homogeneizados em caminhão betoneira. As classes de concreto escolhidas, C25, C30 e C35 da classe de abatimento S100 – abatimento entre 100 mm e 160 mm - correspondem a, aproximadamente, 37% do volume de produção mensal da central.

As amostras foram coletadas em duas datas de produção (coleta A e coleta B) para cada classe, para a realização da caracterização dos concretos. Em cada coleta foi supervisionado todo o processo de dosagem dos materiais e mistura do concreto na central e o transporte até a obra. Foram registradas as massas e respectivos teores de umidade de cada material no momento do carregamento e as adições de água realizadas durante as etapas de mistura e até o descarregamento do concreto, permitindo o cálculo da quantidade de cada material colocado no interior do caminhão betoneira com exatidão.

Na obra, no momento de entrega do concreto, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone – *slump test* (ABNT NBR 16889, 2020) e coletadas amostras de volume aproximado de 100L do concreto que foram transportadas até o laboratório da universidade para a realização dos demais ensaios e moldagem dos corpos de prova. Durante o transporte as amostras de concreto foram cobertas por lonas plástica para que possíveis mudanças climáticas não viessem a interferir na composição do concreto.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

No laboratório as amostras de concreto foram homogeneizadas manualmente, sendo realizado o ensaio de massa específica no estado fresco para cálculo do teor de ar incorporado (ABNT NBR 9833, 2008). Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para a determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739, 2018) nas idades de 7, 28 e 63 dias e do módulo de elasticidade estático (ABNT NBR 8522-1, 2021) aos 28 dias.

2.3 CÁLCULO DOS INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA

Para a caracterização da ecoeficiência dos concretos foram calculados o Índice de Ligante (IL) e o Índice de Carbono (IC).

O cálculo do índice de ligante (IL) que relaciona o impacto do concreto com relação ao consumo total de ligantes utilizado na produção do concreto e o seu desempenho medido pela resistência à compressão, é calculado pela relação entre o consumo real de ligante por m³ de concreto produzido e a resistência à compressão do concreto, sendo expresso em kg de cimento/m³/MPa. Para esse cálculo, o consumo real de ligantes foi determinado a partir do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco e da quantidade de materiais colocados na central para a produção do concreto.

O índice de CO_2 (IC) objetiva a medição do desempenho ambiental de concretos, medindo a quantidade de CO_2 emitida em relação a resistência à compressão do concreto, determinado pela relação entre a emissão total de CO_2 para a produção de um m³ de concreto e a resistência à compressão do concreto, sendo expresso em kg de CO_2/m³/MPa.

Para estimar as emissões de CO_2 por m³ dos concretos produzidos, foi realizado o somatório das emissões de cada material componente da mistura (Tabela 1) multiplicado pelo respectivo consumo.

Os materiais utilizados pela central para a produção dos concretos analisados, foram o cimento CP II F 40 – Cimento Portland Composto com Material Carbonático, agregado miúdo natural, agregado miúdo de britagem, agregado graúdo britado da faixa 4,75/12,5 mm e da faixa 9,5/25 mm e aditivo redutor de água.

Para o cálculo das emissões de CO_2 associadas a produção do cimento, foram consideradas apenas as emissões provenientes do processo de produção do clínquer, que consiste nas emissões oriundas da queima dos materiais constituintes para a produção do clínquer somada ao seu consumo de energia elétrica, conforme equação 1.

$$EC = (E_{clínquer} \cdot \%Clínquer_{cim}) + (FE_{energia} \cdot Q_{energia}) \quad (1)$$

Em que:

Ec: emissões de CO_2 pela produção de cimento (kg CO_2/t)
$E_{clínquer}$: emissões de CO_2 pela produção de clínquer (kg CO_2/t)
$\%Clínquer_{cim}$: porcentagem de clínquer no cimento
$FE_{energia}$: fator de emissão da energia elétrica (kg CO_2/kWh)
$Q_{energia}$: consumo de energia elétrica (kWh/t)

Tabela *1*: Emissões de CO_2 associados a produção dos concretos.

Material	Emissão (kg CO_2/t)	Referência
$E_{clínquer}$	832 kg CO_2/t[(1)]	GNR 2.0 (GCCA 2019)
$\%Clínquer_{cim}$	77%[(2)]	NBR 16697 (ABNT 2018)
$FE_{energia}$	0,08 kg CO_2/kWh	(MCTI 2021)
$Q_{energia}$	108 kWh/t	GNR 2.0 (GCCA 2019)
Areia natural	12,5 kg CO_2/t	(Schmalfuss *et al*. 2022) /SIDAC
Agregados britados	4,67 kg CO_2/t	(Schmalfuss *et al*. 2022) /SIDAC
Aditivo	245,83 kg CO_2/t	(EPD 2021)

[(1)] emissão correspondente a descarbonatação e uso de combustíveis fósseis no processo de clinquerização.
[(2)] considerando um teor de material carbonático de 18% e de adição de sulfato de cálcio de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os indicadores de ecoeficiência (IL e IC) são dependentes da resistência à compressão do concreto. A caracterização dos concretos (Tabelas 2 e 3) indicam que a resistência à compressão foi influenciada pelo consumo de cimento e/ou teor de ar e pelas relações água/cimento. Somente em três coletas (uma para cada classe de resistência) os concretos atingiram a resistência à compressão aos 28 dias esperada, os valores inferiores de resistência à compressão em cada faixa de concreto estão associados a maior relação água/cimento (C25-A) ou ao menor consumo de cimento (C30-B e C35-B). Nos concretos da coleta B observa-se elevado teor de ar incorporado (superior a 5%), o que ocasionou aumento no abatimento e diminuição no consumo de cimento por metro cúbico dos concretos.

Tabela 2: Caracterização dos concretos.

Classe do concreto	Coleta	Abatimento (mm)	Teor de Ar (%)	Consumo real (kg/m³)		a/c	fc_{28} (MPa)	E_{28} (GPa)
				Cimento	aditivo			
C25	A	150	<1,0	264,9	2,4	0,86	24,2	30,0
	B	175	5,2	258,3	2,3	0,72	26,5	30,4
C30	A	150	<1,0	299,4	2,7	0,71	31,6	32,9
	B	185	5,2	284,6	2,6	0,69	28,0	31,7
C35	A	135	<1,0	338,1	3,3	0,64	35,1	35,0
	B	145	5,1	310,0	2,8	0,56	33,9	36,2

Ambos os índices de ecoeficiência (Tabela 3) são maiores para os concretos de menor resistência. Apesar de o consumo de ligantes ser maior nos concretos de maior resistência, as resistências maiores compensam esse consumo elevado, fazendo com que o concreto apresente menores índices de ecoeficiência, conforme verificado também no estudo de Damineli *et al*. (2010).

Em idades menores, devido as menores resistências, observa-se os maiores indicadores de ecoeficiência, o que não é desejável. Destaca-se, nos concretos analisados, insignificantes ganhos de resistência à compressão entre os 28 e 63 dias, na maioria dos casos inferior a 4%, o que gerou pequenas mudanças nos indicadores de ecoeficiência entre estas idades.

Tabela 3: Indicadores de ecoeficiência dos concretos.

Classe do concreto	Coleta	Consumo real de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)			Índice de ligantes (kg/m³/MPa)			Índice de CO_2 (kg/m³/MPa)		
			dias								
			7	28	63	7	28	63	7	28	63
C25	A	264,9	19,4	24,2	25,2	13,7	10,9	10,5	9,7	7,7	7,4
	B	258,3	22,3	26,5	25,5	11,6	9,8	10,1	8,2	6,9	7,2
C30	A	299,4	26,6	31,6	32,5	11,3	9,5	9,2	7,9	6,6	6,5
	B	284,6	24,0	28,0	28,0	11,9	10,2	10,2	8,3	7,1	7,1
C35	A	338,1	27,7	35,1	38,4	12,2	9,6	8,8	8,5	6,7	6,1
	B	310,0	30,8	33,9	34,4	10,1	9,1	9,0	7,0	6,4	6,3

O índice de ligante variou entre 9,1 e 13,7 (kg/m³/MPa) e o índice de CO_2 entre 6,1 e 9,7 (kg/m³/MPa) ambos, respectivamente, para o concreto C25 aos 7 dias e para o concreto C35 aos 63 dias. Os valores médios dos indicadores de ecoeficiência para a idade de 28 dias são apresentados na Figura 1.

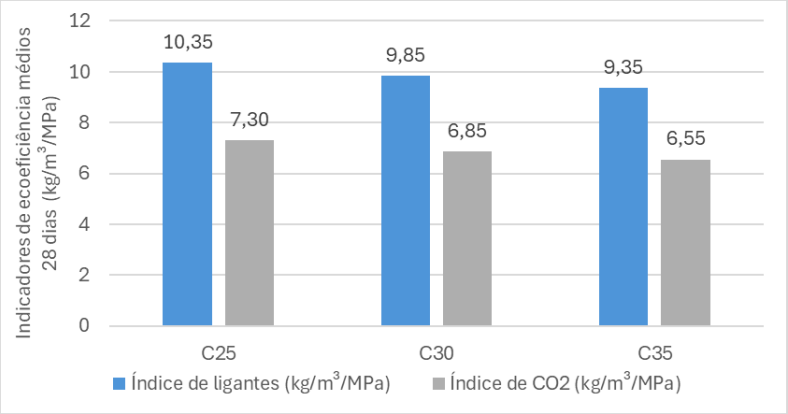
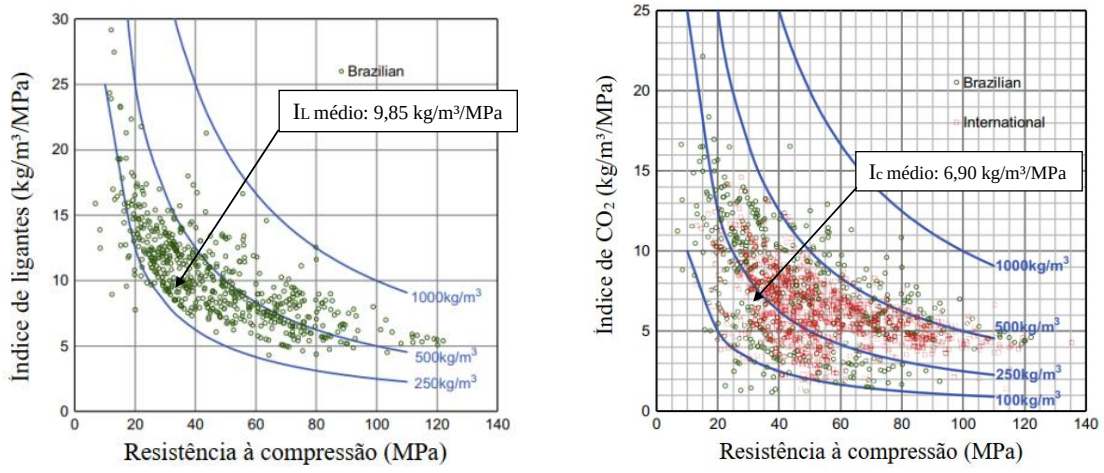


Figura 1 – Indicadores de ecoeficiência médios aos 28 dias por classe de concreto.

Damineli *et al*. (2010) sugerem os valores de 5 kg/m³/MPa para o índice de ligantes e 4,3 kg/m³/MPa para o índice de CO_2 como metas para obter-se concretos ecoeficientes. Os índices encontrados neste estudo de caso estão distantes destas metas, contudo tais metas se mostram otimistas e audaciosas para os concretos de resistência normal, ou seja, inferiores a 50 MPa. Visto que, ao examinar diretamente os resultados obtidos por Damineli *et al*. (2010) para os concretos semelhantes aos analisados nesse estudo, com uma faixa de resistência entre 20 e 40 MPa e um consumo de cimento superior a 250 kg/m³, observa-se que apresentaram índices de ligantes próximos a 10 kg/m³/MPa (Figura 2a). Com relação ao índice de carbono, vários concretos mostraram-se próximos à faixa de 4,3 kg/m³/MPa (Figura 2b), no entanto, conforme o trabalho de Damineli *et al*. (2010) a grande maioria utilizou adições minerais como substituição parcial do clínquer. Assim, os indicadores de ecoeficiência da central de concreto analisada quando comparados diretamente com os índices de Damineli *et al*. (2010) para a faixa de 25 a 35 MPa de resistência, se mostraram satisfatórios, ficando localizados na região inferior dos gráficos (Figuras 2a e 2b).



(a) (b)

Figura 2 – Comparativo dos índices obtidos com os índices de Damineli et al. (2010): (a) IL; (b) IC.

Damineli *et al*. (2010) encontraram, majoritariamente, valores de índice de ligante entre 4,3 e 30 kg/m³/MPa e de índice de CO_2 de 1,5 a 22 kg/m³/MPa para um estudo com dados advindos de trabalhos publicados na literatura nacional e internacional. Medeiros *et al.* (2019) calcularam índices entre 4,2 e 16,69 kg/m³/MPa para o índice de ligante e de 3,59 a 10,31 kg/m³/MPa para o índice de CO_2, enquanto Machado (2020), para concretos com agregados reciclados da construção, obteve

valores de índice de ligante entre 6 e 25 kg/m³/MPa e índice de CO_2 de 2,5 a 21,5 kg/m³/MPa. Deve-se destacar que Damineli *et al*. (2010) e Machado (2020) determinaram as faixas de indicadores a partir de resultados de concretos produzidos em laboratório, em condições controladas de produção. Medeiros *et al*. (2019) determinou os indicadores para concretos produzidos em central dosadora e encontrou índice de ligante médio de 10 kg/m³/MPa e índice de carbono médio de 7,3 kg/m³/MPa.

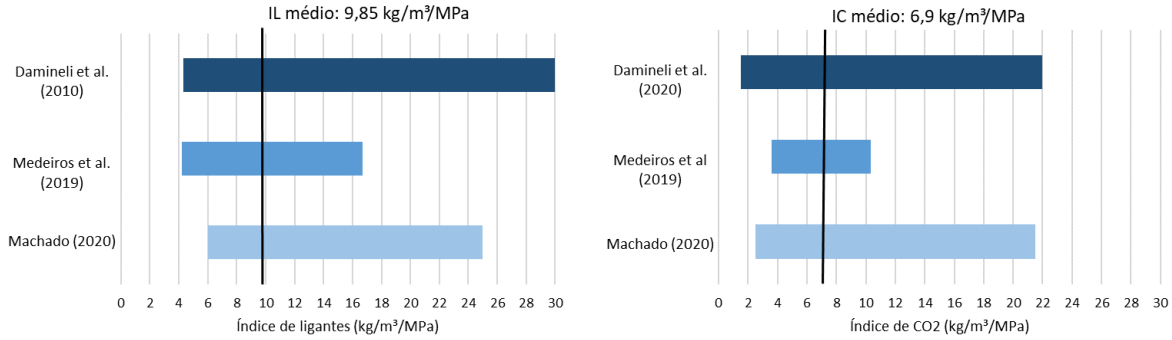


Figura 3 – Comparação entre os indicadores de ecoeficiência determinados com índices da literatura.

Os valores dos índices de ligantes e de CO_2 médios aos 28 dias determinados experimentalmente nos concretos produzidos pela central dosadora em estudo, encontram-se dentro dos intervalos de valores encontrados em estudos de benchmarking da literatura (Figura 3), porém não alcançaram os valores alvos indicados por Damineli *et al.* (2010) de IC inferior a 1,5 kg de CO_2/m³/MPa e IL inferior a 5 kg de cimento/m³/MPa.

Cabe destacar que os valores alvos para o IC e IL geralmente são associados a concretos de elevada resistência mecânica (superior a 50 MPa), que no Brasil ainda possuem baixa comercialização. Como estes concretos possuem maior custo associado, para viabilizar o emprego é necessário visão holística, com otimização de projeto visando reduzir o consumo de material (desmaterialização), contabilização do carbono associado à produção, captura de carbono, entre outros. Assim, estudos que visem coletar e avaliar estes indicadores, com indicação de soluções para o atendimento das metas de ecoeficiência, corroboram para melhorias no setor e para o alcance do net zero.

4 CONCLUSÕES

Os dados levantados neste estudo de caso indicam que a central dosadora apresenta índice de ligantes entre 9,1 e 13,7 (kg/m³/MPa) e índice de CO_2 entre 6,1 e 9,7 (kg/m³/MPa), entre as idades de 7 e 63 dias. Os valores médios dos indicadores para a idade de 28 dias se enquadram nas faixas encontradas na literatura. Deve-se buscar diminuir estes indicadores visto que estão ainda distantes das metas estipuladas para a classificação de concretos ecoeficientes, ou seja, com baixa pegada de carbono e ótimo desempenho mecânico e de durabilidade.

Uma das principais estratégias para melhorar a ecoeficiência dos concretos, é a redução do consumo de cimento, visto que a produção do clínquer, principal componente do cimento, é responsável pela maior parte das emissões de CO_2 na indústria cimenteira. Porém, observou-se neste estudo de caso que os indicadores de ecoeficiência foram prejudicados pelos baixos valores de resistência à compressão dos concretos. Os concretos analisados apresentaram níveis elevados de teor de ar e relação água/cimento, o que contribuiu para os baixos resultados de resistência à compressão.

Percebe-se a necessidade de refinar o controle de dosagem de água e incorporação de ar durante todo o processo de preparo do concreto. Indica-se a adoção de um controle mais rigoroso da umidade de

todos os agregados utilizados no preparo do concreto e não apenas da areia, permitindo ao responsável pela pesagem dos materiais, um melhor controle da quantidade de água necessária para preservar a dosagem do concreto programada pela central. As causas da incorporação de ar no processo de mistura dos componentes devem ser investigadas e o teor de ar controlado.

Buscou-se neste estudo de caso obter uma "fotografia" dos indicadores de ecoeficiência reais dos concretos produzidos por uma central. Torna-se fundamental a continuidade na pesquisa, para aumentar o banco de dados relacionados à central analisada e melhor retratar a ecoeficiência dos concretos produzidos na central dosadora, para refinar as estratégias de produção de concreto e identificar melhor as variáveis do controle de produção que possam influenciar os índices.

Sugere-se estudos de casos semelhantes em outras centrais dosadoras, com diferentes controles de produção. Tal abordagem contribuirá para a proposição de melhorias no controle tecnológico das centrais dosadoras, bem como para o estabelecimento de metas realistas para os concretos utilizados em maior volume, atualmente na indústria da construção civil.

Também podem ser conduzidos estudos aprofundados a fim de considerar no cálculo do índice de CO_2, as emissões referentes aos transportes dos materiais, obtenção dos agregados e a captura de carbono dos concretos, para assim determinar o verdadeiro impacto ambiental desses concretos em termos de emissão de gases do efeito estufa.

AGRADECIMENTOS

À Empresa de Serviço de Concretagem parceira do estudo por permitir a coleta de dados e divulgação os resultados. Ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração pelo apoio na realização dos ensaios. Ao técnico Maxer Antonio Rosa do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2020). ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2018). ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2021). ABNT NBR 7212: Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2021). ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (2008). ABNT NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT.

Costa, E. B.; Nobre, T. R. S.; Guerreiro, A. Q.; Mancio, M.; Kirchheim, A. P. (2013). Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. Ambiente Construído. 13 (2):75-86. https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200007

Damineli, B. L.; Kemeid, F. M.; Aguiar, P. S.; John, V. M. (2010). Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites. 32 (8):555-562. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009

Damineli, B. L.; Pileggi, R. G.; John, V. M. (2012). Eco-eficiência do uso do cimento em concreto: estado atual, possibilidades e tendências. In: Congresso Brasileiro do Concreto. 54. Maceió. Anais [...]. São Paulo: IBRACON.

Environmental Product Declaration (EPD).(2021). The International EPD System: Plasticizing admixture for concrete. Estocolmo. https://www.environdec.com/library. Acesso em: 26 out. 2023.

Global Cement and Concrete Association (GCCA). (2019). GNR 2.0: GCCA in Numbers. https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/. Acesso em: 11 jan. 2023.

Goulart, R. G. de Oliveira. (2023). Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

Habert, G.; Miller, S. A.; John, V. M.; Provis, J. L.; Favier, A.; Horvath, A.; Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment. 1: 559–573. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3.

John, V. M. (2019). Pesquisas para ecoeficiência no uso de materiais. [Entrevista concedida a] IBRACON. Concreto & Construções. 47 (95):16-25.

Machado, L. S. M. (2020). Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes. Dissertação de mestrado, Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana.

Medeiros, M. H. F.; Araujo, E. C.; Medeiros Júnior, R. A.; Pieralisi, R. (2019). Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO_2, resistividade elétrica e migração de cloretos. In: Simpósio Paranaense de Patologia das Construções. 4. Curitiba. Anais [...]. 429-438.

Schmalfuss, L. M., Timm, J., Passsuello, A. C. B. (2022). Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais. São Paulo: SIDAC.

Scrivener, K. L.; John, V. M.; Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, Paris, v. 114, p. 2-26, 2018. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BALANÇO AMBIENTAL, ENERGÉTICO E ECONÔMICO DE PAREDES NO PARAGUAI

Msc. Ing. Héctor Manuel Pérez Monti[a]

[a] Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Asunción – Paraguay, hector_perez@hotmail.com

RESUMO

A indústria da construção ao longo dos anos foi e é uma das atividades humanas que mais causam danos ao planeta, razão pela qual a indústria deve procurar implementar critérios sustentáveis. Este trabalho realiza um balanço ambiental, energético e econômico de cinco tipos de paredes utilizados no Departamento Central, Paraguai. A metodologia de Análise do Ciclo de Vida é utilizada para determinar os potenciais impactos ambientais durante a fabricação de matérias-primas e montagem dos componentes das diferentes paredes. Para a análise energética foi determinada a transmitância térmica das paredes, utilizando estes resultados para determinar as cargas térmicas e o consumo de energia de resfriamento através de simulações. A análise económica baseou-se nos custos que tinham no mercado e no consumo de energia de refrigeração durante 50 anos. Com os resultados obtidos foram realizadas ponderações, obtendo que parede com melhor equilíbrio ambiental, energético e económico é o painel 3D.

Palavras-chave: Análise do ciclo de vida, análise energética, análise económica, custo-investimento.

1 INTRODUÇÃO

A atividade humana no planeta Terra ao longo dos anos resultou em impactos como mudanças climáticas, esgotamento dos recursos abióticos, mudança no uso da terra, danos à camada de ozônio, formação de oxidantes fotoquímicos, entre outros. O setor da construção é um dos setores que mais causa danos à terra. De acordo com dados obtidos do *2023 Global Status Report for Buildings and Construction* da Agência Internacional de Energia (IEA) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o setor de construção Building and Construction é responsável responsável por 37% das emissões globais de CO_2 relacionadas com a energia. Além disso, de acordo com o *Emissions Gap Report 2019* do PNUMA, em 2015 foram gerados 11,5 $GtCO_2e$ na produção de materiais, sendo o setor de construção responsável por 5 $GtCO_2e$ (43,5%) do total.

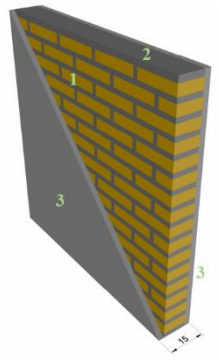
O setor da construção civil deve buscar alternativas para que os impactos diminuam de forma a gerar o menor dano possível. Quando um material for selecionado para uma parede, além dos critérios de funcionalidade, estética ou outros normalmente utilizados, o potencial impacto ambiental que esse material poderia gerar a partir da extração da matéria-prima, através do seu uso, também deve ser considerado como um critério de produção e uso até a disposição final. Além disso, uma boa seleção do material com base no comportamento térmico contribuirá para o conforto dos seus habitantes, proporcionando-lhes uma boa qualidade de vida, e para a eficiência energética do edifício, proporcionando um benefício económico com a poupança que poderá ser obtida no consumo de energia.

2 METODOLOGIA DE TRABALHO E RESULTADOS

2.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

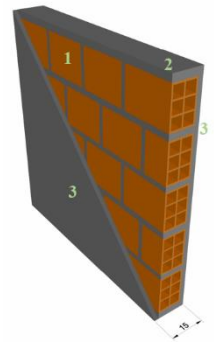
O trabalho estudou 5 tipos de paredes que estão disponíveis no mercado de construção no Paraguai, que funcionam tanto como fechamentos de fachada quanto como paredes internas.As duas primeiras utilizadas há décadas na construção civil e as três últimas são paredes com materiais inovadores no mercado. Foi estabelecido o critério de que as paredes não ultrapassassem a largura de 15 cm, espessura normalmente utilizada nas construções paraguaias. Todas as paredes selecionadas Parede A: Parede de tijolo comum com argamassa e reboco de cimento

2.1.1 Parede A: Parede de tijolo comun com argamassa e reboco de cimento



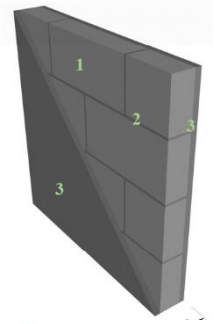
Composto por tijolos comuns de 21 cm de comprimento, 10,4 cm de largura e 4 cm de altura (1). A densidade desse material é de 1.300 kg/m3, portanto, um tijolo pesa 1,14 kg. A argamassa de base é uma dosagem de 1:2:10 de cimento, cal e areia com juntas de 2 cm de espessura (2). O reboco possui dosagem de 1:2:16 de cimento, cal e areia, acrescentando o hidrorrepelente para o reboco exterior (3).

2.1.2 Parede B: Parede de tijolo oco com argamassa e reboco de cimento



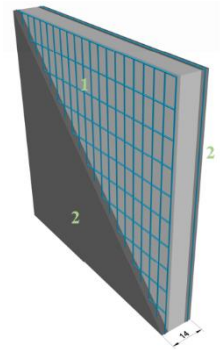
Composto por tijolos vazados de 23 cm de comprimento, 11 cm de largura e 17 cm de altura com densidade de 695 kg/m3 (1). A argamassa de base tem dosagem de cimento, cal e areia na proporção 1:2:8 com juntas de 2 cm de espessura (2). Antes do reboco, polvilha-se uma argamassa de cimento e areia 1:3 para melhorar a aderência. O reboco possui dosagem de 1:2:16 de cimento, cal e areia, acrescentando o hidrorrepelente tanto para os respingos quanto para o reboco externo (3).

2.1.3 Parede C: Parede de blocos de concreto aerado com reboco cimentício



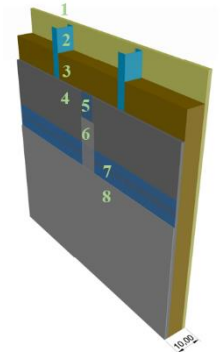
Composto por blocos de concreto celular com 50 cm de comprimento, 10 cm de largura, 25 cm de altura e densidade de 660kg/m3 (1). Recomenda-se a utilização de argamassa colante para elevação das paredes (2). Antes do reboco, polvilha-se uma argamassa de cimento e areia 1:3 para melhorar a aderência. O reboco tem dosagem 1:2:16 de cimento, cal e areia, acrescentando o hidrorrepelente para o exterior (3).

2.1.4 Parede D: Parede de painel 3D com reboco de cimento



Composto por um bloco de poliestireno expandido com 8 cm de espessura e densidade de 12,5 kg/cm3 que cobre todo o comprimento e largura da parede. Em ambos os lados possui uma tela eletrossoldada feita de fio de aço galvanizado com 2,5 mm de diâmetro (1). O reboco tem dosagem de 1:3,5 a 1:4,5 de cimento e areia (3). Deve ser realizada em duas etapas: a primeira camada com espessura de 2 cm e a segunda com espessura de 1 cm, acrescentando sempre o hidrofugante nas camadas externas.

2.1.5 Parede E: Parede de Placa de cimento e placa de gesso cartonado com isolamento



A última parede é a que mais necessita de componentes para sua montagem. Seus principais componentes são placas de gesso com 1,5 cm de espessura (1) e placas de cimento com 1,25 cm de espessura (4). Para além dos materiais mencionados, são também necessários perfis metálicos galvanizados PGU e PGC (2), lã de vidro (3), malha de fibra de vidro (5 e 7) e argamassa para juntas e para exteriores (6 e 8).

2.2 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

2.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo da Análise do Ciclo de Vida (ACV) é comparar o potencial impacto ambiental dos diferentes tipos de paredes utilizadas no Paraguai. O âmbito vai desde a extracção de matéria-prima até à construção em obra antes da pintura da parede, incluindo no estudo o transporte e utilização de combustíveis, electricidade, calor e água. A unidade funcional foi definida como uma parede medindo um metro por um metro e com espessura de até 15 centímetros.

2.2.2 Análise de estoque

Tudo começou com a coleta de dados nas fábricas que forneceram os componentes das paredes para compilar as informações necessárias sobre as entradas e saídas na fabricação do seu produto. Para materiais como cimento, areia, cal, perfis metálicos, lã de vidro, malha de fibra de vidro e argamassa para juntas foi utilizado o banco de dados do programa SimaPro, que são Ecoinvent v3 LCI e Industry Data.

Parede A: Foi visitada uma fábrica na cidade de Tobatí. Para a fabricação do tijolo comum, utiliza-se como matéria-prima a argila, extraída a 10 km da fábrica. Outros recursos necessários à fabricação são água e energia elétrica durante a mistura da matéria-prima e lenha para queima no forno. A moldagem e corte dos tijolos é feita manualmente. É necessária a argamassa de união entre o tijolo e o reboco de cimento.

Material	Unidade	Quantia
Tijolo comum	Kg	74,90
Cimento	Kg	8,74
Cal	Kg	13,53
Areia	Kg	139,50
Água	Kg	4,37
Repelente de água líquido	Kg	0,25
Energia elétrica	kWh	0,37

Parede B: Também na cidade de Tobatí foi visitada uma fábrica de tijolos vazados. Como matéria-prima utilizam argila preta, lama e caulim, provenientes de pedreiras a 10 e 18 km da fábrica. O forno utilizado nesta fábrica possui sistema de recuperação de calor, pois o calor que dele sai vai para o secador, processo anterior à queima. O combustível utilizado no forno é a serragem, proveniente dos resíduos da madeira serrada. Esta parede necessita também da argamassa de união entre o tijolo e o reboco cimentício, acrescentando ao processo um salpico de argamassa cimentícia antes do reboco.

Material	Unidade	Quantia
Tijolo oco	Kg	59,40
Cimento	Kg	10,80
Cal	Kg	9,70
Areia	Kg	108,50
Água	Kg	5,40
Repelente de água líquido	Kg	0,25
Pasta hidrorrepelente	Kg	0,25
Energia elétrica	kWh	0,37

Parede C: Na cidade de Luque são produzidos os blocos de concreto celular, principal componente do Parede C. As matérias-primas para sua produção são areia lavada e cimento com uma pequena adição de espuma de proteína hidrolisada. Água e eletricidade também são utilizadas durante o processo de fabricação. Utiliza-se argamassa colante (klaumix) para unir os blocos e para o acabamento é feito um respingo cimentício e em seguida o reboco final.

Material	Unidade	Quantia
Bloco Hº celular	Kg	62,80
argamassa adesiva	Kg	5,00
Cimento	Kg	9,00
Cal	Kg	8,00
Areia	Kg	93,00
Água	Kg	4,50
Repelente de água líquido	Kg	0,25
Pasta hidrorrepelente	Kg	0,25
Malha de fibra de vidro	Kg	0,15
Energia elétrica	kWh	0,19

Parede D: Seu principal componente é o painel de poliestireno expandido com malha de aço eletrossoldada. Foi visitada uma fábrica na cidade de Capiatá. Grânulos de poliestireno expansível (EPS) e fio de aço galvanizado com seção de 2,5 mm são usados como matéria-prima. A maior parte do processo é realizada com energia elétrica, exceto a caldeira onde são utilizados combustíveis fósseis e água. Para o acabamento da parede são necessárias argamassas com elevado teor cimentício.

Material	Unidade	Quantia
Painel 3D	Kg	4,40
Cimento	Kg	21,84
Areia	Kg	107,88
Água	Kg	10,92
Repelente de água líquido	Kg	0,60
fibra de polipropileno	Kg	0,05
Energia elétrica	Kg	0,19

Parede E: Os componentes da parede são em sua maioria materiais exportados. A placa de gesso é importada da cidade de Mendoza, Argentina e a placa de cimento da Alemanha. Para montar esta parede são necessários perfis e parafusos galvanizados, argamassa de superfície, tela de fibra de vidro e lã de vidro.

Material	Unidade	Quantia
Placa cimentícia	Kg	11,00
Placa de gesso	Kg	10,60
Lã de vidro	Kg	0,46
Parafusos	Kg	0,001
Perfil galvanizado	Kg	2,35
Malha para painel cimentício	Kg	0,16
Argamassa conjunta	Kg	0,11
Argamassa externa	Kg	6,25

2.2.3 Avaliação de impacto

Para avaliar o impacto da ACV foi utilizado o método ReCiPe 2016, cujo objetivo é transformar a lista de resultados do inventário em um número limitado de pontuações de indicadores. O ReCiPe compreende dois níveis de indicadores: ponto médio e ponto final. As categorias de impacto no nível médio são 18 e são classificadas como visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Categorias de impacto de nível médio ReCiPe 2016

Formação de partículas finas	Mudança climática	Acidificação terrestre
Formação de ozônio, saúde humana	Uso de água	Uso de terra
Radiação ionizante	Ecotoxicidade de água doce	Ecotoxicidade marinha
Destruição do ozônio estratosférico	Eutrofização da água doce	Eutrofização marinha
Toxicidade cancerígena humana	Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	Escassez de recursos minerais
Toxicidade humana não cancerígena	Ecotoxicidade terrestre	Escassez de recursos fósseis

Ao nível do ponto final, as categorias de impacto médio são multiplicadas pelos factores de dano e simplificadas em três categorias: Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema e Escassez de Recursos.

A unidade de medida tomada pelo programa SimaPro é Pt (pontos), obtida a partir dos resultados da multiplicação dos fatores de dano ponderados com o inventário. É uma unidade padrão dada em todas as categorias pois o objetivo é a comparação de produtos, o valor em si não é o mais relevante, mas sim a comparação de valores entre as diferentes paredes. Quanto maior a pontuação, maior o impacto ambiental potencial. Os resultados obtidos na ACV para fabricação e montagem das paredes são apresentados a seguir.

Parede A: Na Figura 1 mostra como estão distribuídos os 1,19 pontos do tijolo comum com reboco de cimento. O maior impacto está na fabricação de tijolos comuns, especificamente no processo de queima de tijolos, com impacto de 82,3% do total. O maior impacto se deve à formação de partículas finas, pois nesse processo as emissões produzidas são lançadas diretamente no ar. Além das emissões, o calor produzido também é liberado no ar, ponto que afeta a categoria de mudanças climáticas.

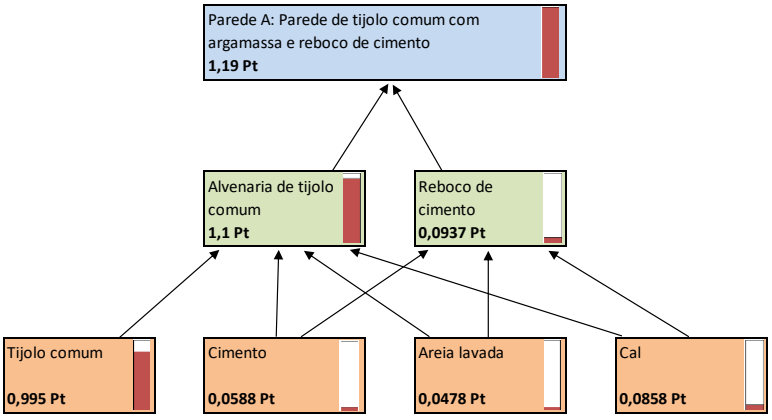


Figura 1 - Fluxo com pontos obtidos na ACV para Parede A.

Parede B: A parede de tijolos vazados com reboco de cimento possui 0,794 pontos de acordo con a Figura 2. Tal como na parede A, o processo que proporciona maior impacto em toda a construção da parede é a queima dos tijolos em forno, sendo esta um pouco menos que a anterior com 75,1%

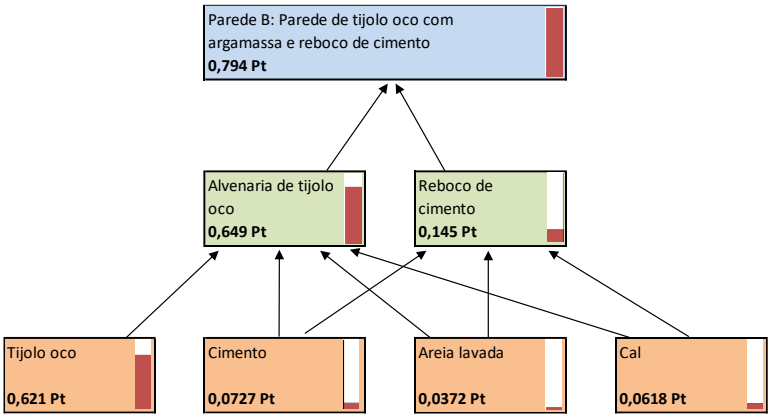


Figura 2 - Fluxo com pontos obtidos na ACV para Parede B.

Parede C: Para esta parede foram obtidos 0,509 pontos, valor inferior aos dois casos anteriores. Ressalta-se que nos 0,269 pontos de cimento da Figura 3 eles contribuem tanto para o reboco cimentício quanto para o bloco de concreto celular. Considerando o alto teor de cimento dessa parede, o processo que mais contribui para os impactos ambientais é aquele que está dentro do seu fluxo produtivo: a fabricação do clínquer, que afeta 47,15% do total de pontos. Para o fabrico de clínquer existem dois fatores de impacto importantes, que são a utilização de grandes fornos para a sua produção e a exploração de pedreiras. Isto é evidente nas categorias intermediárias, uma vez que a utilização de grandes fornos afecta a formação de partículas finas e as alterações climáticas – a saúde humana, e a exploração de pedreiras afecta o uso da terra e as alterações climáticas – os ecossistemas terrestres.

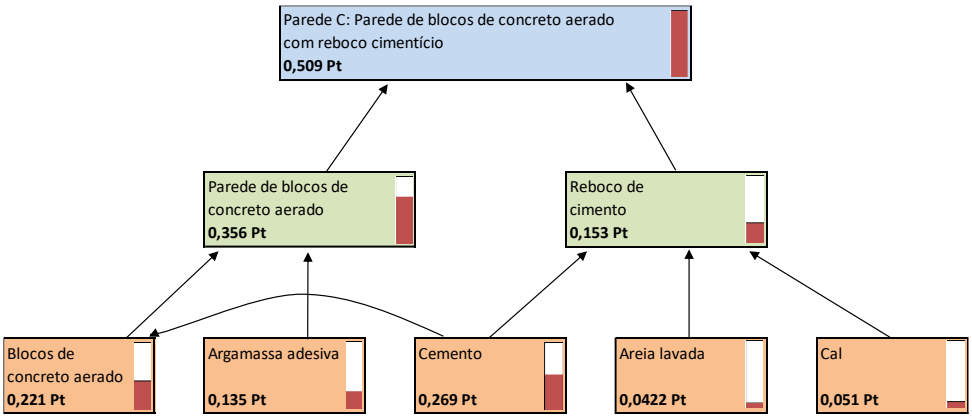


Figura 3 - Fluxo com pontos obtidos na ACV para Parede C.

Parede D: Na Figura 4 da Parede D obteve-se um total de 0,341 pontos, sendo o cimento, o arame de aço galvanizado e o bloco de poliestireno expandido os produtos que mais contribuem com 43,1%, 25,3% e 18,6% respectivamente. A produção de clínquer é o processo que mais contribui com 39% do total devido ao elevado teor de cimento da mistura utilizada para fazer o reboco cimentício desta parede. Nos impactos das categorias de impacto médio obtemos praticamente os mesmos resultados, sendo a Parede D inferior uma vez que a quantidade de cimento utilizada é inferior à da Parede C.

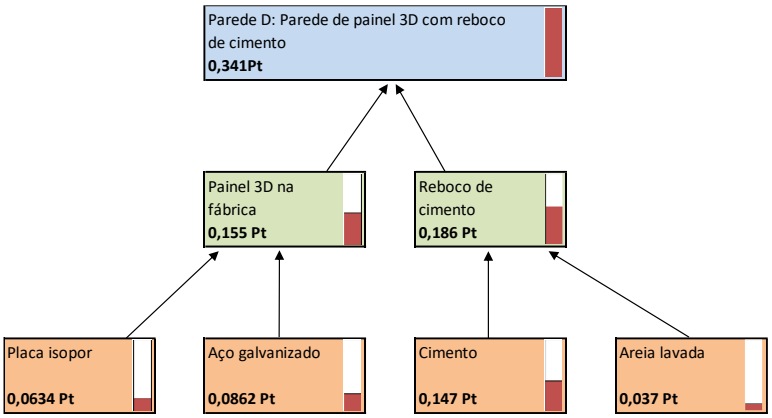


Figura 4 - Fluxo com pontos obtidos na ACV para Parede D.

Parede E: Por ultimo, temos a parede E com um total de 0,401 pontos, como pode ser visto na Figura 5. A distribuição dos danos é mais equilibrada do que nos demais casos, com a placa de gesso e a placa de cimento com pesos maiores. com 35,4% e 34,6% respetivamente, seguindo-se o perfil de ferro galvanizado com 12,1%, a lã de vidro com 10,2% e a argamassa exterior em placa de cimento com 5,5%. Considerando que ambas as placas são fabricadas no exterior, o total de pontos da placa de gesso fabricada na Argentina é de 28,7% e da placa de cimento fabricada na Alemanha é de 27,4%. Isto mostra que o transporte terrestre de placas de gesso afeta 6,7% e o transporte marítimo de placas de cimento afeta 7,2%. Os maiores impactos médios na fabricação de placas de gesso ocorrem na formação de partículas finas, nas mudanças climáticas e no uso da terra, devido à britagem, moagem e calcinação nas fábricas. Para placas cimentícias obtêm-se praticamente os mesmos impactos considerando que no processo também é utilizado cimento, cujo impacto do clínquer já foi descrito.

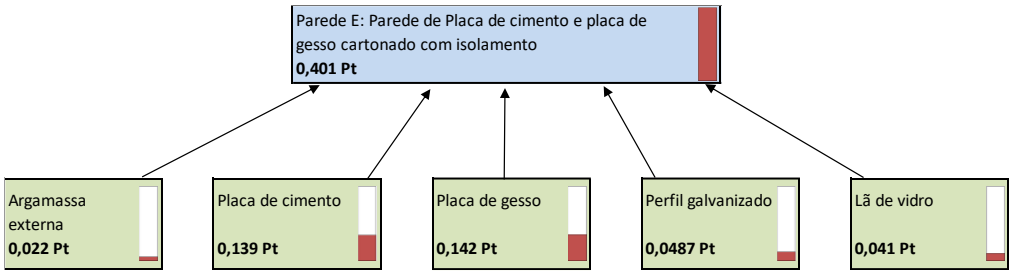


Figura 5 - Fluxo com pontos obtidos na ACV para Parede E.

2.2.4 Interpretação

Para esta última fase da ACV são comparadas as diferentes pontuações obtidas para cada uma das paredes como visto na Figura 6. Aqueles compostas por material cerâmico, como tijolo comum e tijolo vazado, são as que apresentam maior potencial de impacto ambiental. Por outro lado, o Parede D é a que apresenta menor impacto, produzindo 72% menos impacto em relação à Parede A .

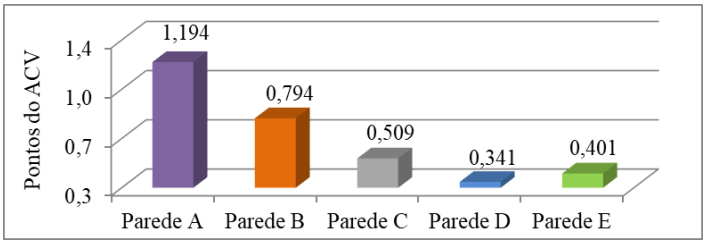


Figura 6 - Pontos obtidos no ACV para cada uma das paredes.

2.3 ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA

2.3.1 Cálculo de transmitância térmica

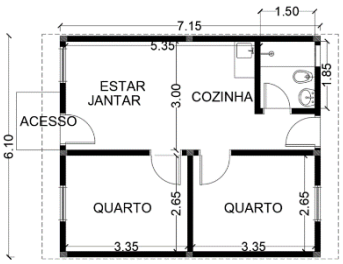
Para calcular a transmitância térmica das paredes foi realizado um teste com calorímetro. Está localizado no Laboratório de Mecânica e Energia da Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional de Assunção e é baseado no método de placa quente conforme ASTM C-518. A configuração utilizada pelo calorímetro é uma placa fria e uma placa quente com dois transdutores que medem os fluxos de calor que passam pela amostra de teste. Os resultados obtidos através do calorímetro são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Transmitâncias térmicas calculadas

Tipo de Parede	Localização	Coeficiente de transmitância térmica (W/m2.k)
Parede A	Fachada	3,345
	Interior	2,571
Parede B	Fachada	2,609
	Interior	2,113
Parede C	Fachada	2,026
	Interior	1,714
Parede D	Fachada	1,463
	Interior	1,293
Parede E	Fachada	0,566
	Interior	0,538

2.3.2 Simulação de energia

Para a simulação energética foram utilizados três softwares: IFC Builder, CYPETHERM LOADS e CYPETHERM EPLUS. A casa modelo faz parte de um programa do Ministério do Urbanismo, Habitação e Habitat. A casa é térrea e tem dois quartos, uma sala de estar-jantar-cozinha e um banheiro.



Simulação em Cargas Cypetherm: Foram selecionados os dados e condições meteorológicas do Aeroporto Silvio Pettirossi de Luque, município mais próximo da área de estudo. Para a simulação, o período de estudo considerado é de um ano completo. Foram inseridas as características dos elementos construtivos do projeto, onde o valor da transmitância térmica para as paredes exteriores e interiores é modificado enquanto os valores dos restantes materiais permanecem inalterados.

O software realiza uma simulação na qual soma todas as combinações de cargas térmicas diárias ao longo do ano e determina os valores máximos de carga de resfriamento simultâneo para cada ambiente e para todo o edifício. A carga térmica máxima de resfriamento foi obtida na Parede A com 8.528 W e a menor na Parede D com 6.170 W, sendo a primeira 38,22% maior que a parede com menor carga térmica. A Parede C com 7.415 W e a Parede E com 6.937 W são outras duas Parede que apresentam melhor desempenho que as paredes de material cerâmico. Esses resultados podem ser comparados na Figura 7.

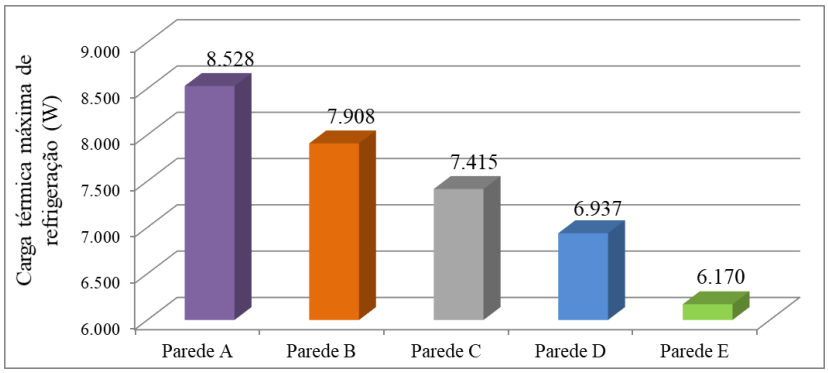


Figura 7 - Cargas térmicas da Casa Modelo de acordo com o tipo de parede.

Simulação no Cypetherm Eplus: Para a segunda simulação foram utilizados os mesmos dados do Cypetherm Loads. A temperatura desejada do ar condicionado durante o dia para cada um dos ambientes foi definida em 24ºC. Para dimensionar os equipamentos de ar condicionado foram utilizados os resultados obtidos da carga máxima de refrigeração simultânea para cada ambiente obtida na primeira simulação. O resultado pretendido obtido com o EPlus é o consumo de energia de refrigeração com cada tipo de parede, para poder comparar a poupança utilizando uma parede e com melhor desempenho térmico.

Na figura 8 observa-se que a Parede E acabou por ser a que apresentou menor consumo de energia elétrica de refrigeração da Casa com 1.464 kWh/ano, seguida da Parede D e da Parede C com 1.591 e 1.670 kWh/ano. Com 26,02% e 19,49% a mais de consumo de energia em relação ao menor consumo, temos as Paredes A e B.

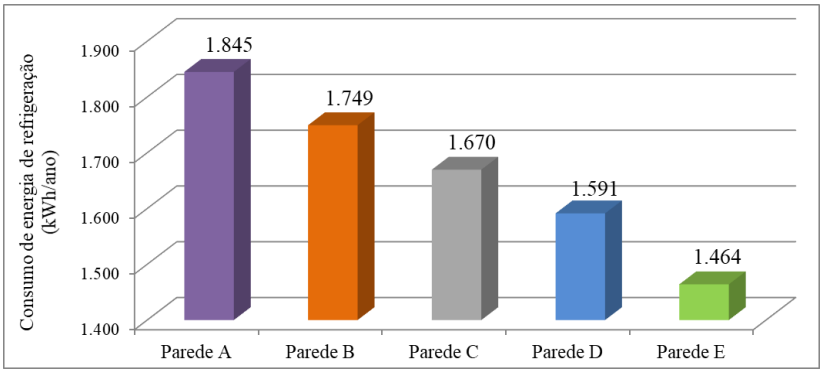


Figura 8 - Energia de resfriamento para Casa Modelo de acordo com o tipo de parede.

2.4 ANÁLISE ECONÔMICA

2.4.1 Custo das paredes

Para este estágio, foram utilizados os preços das revistas de custo de construção do Paraguai e os preços dos diferentes fornecedores, obtendo o custo por metro quadrado de cada uma das paredes e multiplicando pelo número de metros quadrados necessários para abrigar o custo total para Construir as paredes foi obtido.

Há uma grande diferença no custo da Parede E, 88,31€, sendo o seu custo mais do dobro do das restantes paredes. As paredes de menor custo são as paredes cuja matéria -prima é argila, com a

parede de tijolos comuns sendo € 19,49 e a parede de tijolos ocos sendo € 17,27. Com um custo mais alto do que eles, encontramos o Parede C e a Parede D, com um custo por metro quadrado de € 33,80 e € 38,17. Com os custos obtidos, o custo total da unidade é calculado, levando em consideração o total de metros quadrados, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Custo das paredes

Tipo de parede	Custo por m2 (€)	Quantia	Custo total (€)
Parede A	19,49	116,13	2.263
Parede B	17,27	116,13	2.006
Parede C	33,80	116,13	3.925
Parede D	38,17	116,13	4.433
Parede E	88,31	116,13	10.255

2.4.2 Custo por consumo em refrigeração

Foi considerado um custo energético de 0,052 euros para cada kWh, que é o valor da tarifa residencial média em 2022 (ANDE, 2023). Considerando que os edifícios permanecerão usados e habitáveis por pelo menos 50 anos, foram projetados gastos com energia para esse período de tempo. Para esta projeção foi utilizada uma taxa média de crescimento anual de 1,6%, taxa entre 2002 e 2022 (ANDE, 2023). Os custos de resfriamento ao longo de 50 años são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Gastos com energia de refrigeração durante 50 anos em casa

Material	Energia kWh/ano	Custo de resfriamento ao longo de 50 anos (€)
Parede A	1.845	7.306
Parede B	1.749	6.928
Parede C	1.670	6.612
Parede D	1.591	6.302
Parede E	1.464	5.798

Chama-se **Custo - Investimento** à soma dos custos totais de construção das paredes dos edifícios e dos gastos energéticos ao longo dos 50 anos de forma a obter um custo total de acordo com a parede selecionado. Os resultados do custo-investimento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Custo - Investimento das diferentes paredes para casa

Material	Custo muro (€)	Custo de resfriamento ao longo de 50 anos (€)	Custo - Investimento (€)
Parede A	2.263	7.306	9.570
Parede B	2.006	6.928	8.934
Parede C	3.925	6.612	10.538
Parede D	4.433	6.302	10.734
Parede E	10.255	5.798	16.053

2.5 PONDERAÇÃO FINAL

Por fim, nesta metodologia de trabalho é realizada uma normalização e ponderação com os resultados obtidos na ACV e no Custo – Investimento.

Na normalização do ACV, os resultados obtidos são comparados com um valor de referência, que para este estudo será o menor dos resultados. Desta forma, o maior valor entre as cinco paredes indica que

é aquela que irá gerar maiores potenciais impactos ambientais (Tabela 6). O mesmo processo é utilizado para o Custo – Investimento das paredes, o maior valor entre os cinco tipos indica qual é a parede com maior gasto (Tabela 7)

Tabela 6: Normalização dos resultados da ACV

Material	Total de pontos de acordo com ACV	Estandardização
Parede A	1,194	**350**
Parede B	0,794	**233**
Parede C	0,509	**149**
Parede D	0,341	**100**
Parede E	0,401	**118**

Tabela 7: Custo - Investimento habitacional

Material	Custo - Investimento (€)	Estandardização
Parede A	9.570	**107**
Parede B	8.934	**100**
Parede C	10.538	**118**
Parede D	10.734	**120**
Parede E	16.053	**180**

Para a ponderação foram realizados diferentes cenários onde são atribuídos pesos aos resultados obtidos na normalização da ACV e ao Custo – Investimento. Os pesos variam de 100% para o ACV e 0% para o Custo – Investimento até um peso de 0% para o ACV e 100% para o Custo – Investimento, dando saltos de 10%. Diferentes cenários são realizados, pois cada pessoa, seja ele profissional da construção ou cliente final das edificações, tem critérios diferentes sobre qual item deve ser o mais importante.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para Casa. Para este trabalho foram considerados pesos de 60% para o ACV e 40% para o Custo-Investimento, obtendo-se que a Parede D é a que apresenta o melhor equilíbrio, sendo o segundo melhor equilíbrio a Parede C seguida da Parede E. Considera-se um peso maior para a ACV porque devem ser tomadas medidas no sector da construção para aliviar os danos já causados ao ambiente e à saúde humana, o que ajudará a satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras.

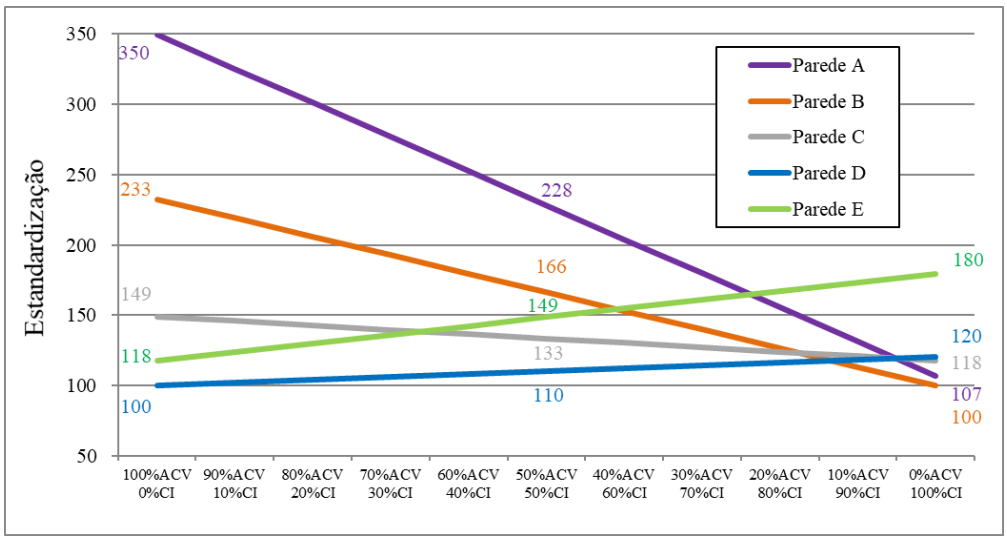


Figura 9 - Resultados da ponderação dos para todos os cenários habitacionais num período de 50 anos

3 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho é realizado um balanço ambiental, energético e econômico dos diferentes tipos de paredes utilizadas no Departamento Central, Paraguai, a fim de promover e incentivar o uso de materiais com menor impacto ambiental e menor consumo elétrico.

Após avaliação dos resultados da Análise do Ciclo de Vida das diferentes paredes, obteve-se que as paredes com maiores potenciais impactos ambientais são a Parede A, a Parede B, a Parede C, a Parede E e a Parede D pela ordem acima mencionada. Além disso, identificou-se que os processos que mais geram impactos são a queima de tijolos nas Paredes A e B, a fabricação de Clínquer para cimento nas Paredes C e D e a fabricação de cimento e placas de gesso na Parede E.

Com as simulações foi possível determinar o consumo de energia de refrigeração da casa variando o tipo de parede. As variações encontradas entre os diferentes tipos de parede são interessantes, havendo uma diferença de 26,02% entre o maior e o menor valor.

Para determinar o benefício económico das diferentes paredes, foi utilizado um custo energético de 0,05€ por kWh com uma taxa anual de 1,60% durante 50 anos. A rentabilidade na utilização de paredes mais eficientes é alcançada no período mencionado em Habitação. Não tem muita importância principalmente pelo baixo custo da energia no Paraguai, sendo um dos mais baratos da região.

De forma a fazer um equilíbrio entre os três factores analisados, ambiental, energético e económico, os resultados obtidos foram normalizados e ponderados com base em vários cenários. À medida que o peso dos resultados da análise do ciclo de vida diminuiu em ponderação, os resultados das Paredes A, B e C aproximaram-se da Parede D, com exceção da Parede D, que tem inclinação oposta às demais paredes.

Este trabalho considera como ótimo um peso de 60% para os resultados obtidos na ACV e 40% para os resultados obtidos no Custo-Investimento. Desta forma, conclui-se que a parede com melhor equilíbrio ambiental, energético e económico é o Parede D.

REFERÊNCIAS

Evans, J. M. y De Schiller, S. (2018). Comportamiento térmico de sistemas constructivos: balance energético y ambiental de muros mejorados. XLI Reunión de Trabajo, Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Córdoba.

Goedkoop, M. et al. (2016). Introduction to LCA with SimaPro. Pré.

Hammond, G.y Jones, C. (2008). Inventory of carbon and energy (ICE), Versión 1.6a. Universidad de Bath, Reino Unido.

International Energy Agency. (2024). 2023 Global Status Report for Buildings and Construction. United Nations Environment Programme.

Na Talang, R. y Sirivithayapakorn, S. (2018). Comparing environmental burdens, economic costs and termal resistance of different materials for exterior building walls. Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University. Bangkok.

Paleari, M. y Miliani, A. (2018). The sustainability of wall solutions: Life Cycle Assessment (LCA) of different solutions for external closures.

United Nations Environment Programme. (2019). Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE BASE BIOLÓGICA NA CONSTRUÇÃO

Livia Cosentino[a]; Claudia Jacinto[a]; Adilson C. Paula Junior[a]; Jorge Fernandes[a]; Ricardo Mateus[a]

[a]ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Alameda da Universidade, 4800-058, Guimarães, Portugal, ricardomateus@civil.uminho.pt

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é fundamental na análise do desempenho ambiental dos produtos de construção, do início ao fim de sua vida útil. Os materiais de construção são responsáveis por impactes consideráveis, representando cerca de 10% das emissões globais. Este estudo compara o desempenho ambiental de materiais de base biológica com materiais convencionais, destacando o potencial da ACV na promoção de um ambiente construído mais sustentável. A metodologia baseia-se na ferramenta de avaliação relativa da sustentabilidade de soluções construtivas (MARS-SC), e na revisão da literatura sobre ACV aplicada a produtos de construção, com o foco em materiais de isolamento térmico, incluindo materiais não-convencionais. Os resultados indicam vantagens significativas dos materiais de base biológica, destacando-se o baixo impacte ambiental de painéis com canas (Arundo donax). Conclui-se a importância de realizar análises de ACV na seleção de materiais, o que permite realçar as vantagens ambientais dos materiais de base orgânica. No artigo identificam-se também desafios futuros, como a disponibilidade de matérias-primas e recomenda-se a inclusão de parâmetros adicionais, como funcionais e económicos, para uma avaliação holística da sustentabilidade dos materiais de base orgânica.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Desempenho ambiental, Biomateriais, Construção sustentável.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um dos maiores problemas que a humanidade enfrenta atualmente, sendo causadas principalmente pela elevada concentração de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do uso de combustíveis fósseis e processos industriais (IPCC, 2022). Em 2022, um dos setores com maior impacte ambiental foi a indústria da construção civil, sendo responsável por 34% do uso global de energia e 37% das emissões globais de GEE (UNEP, 2024).

O ciclo de vida de um produto de construção inclui todos os processos e impactes desde a extração de matérias-primas, produção, construção, uso e manutenção e, por fim, a demolição e o tratamento de resíduos (Figura 1) (ISO 15804, 2012). No caso dos edifícios, a maior parte dos seus impactes ambientais está associada à fase de utilização (Schiavoni *et al*., 2016). No entanto, em edifícios energeticamente eficientes, os impactes ambientais incorporados dos produtos de construção representam cerca de 45-50% do total do ciclo de vida, podendo ultrapassar 90% em casos extremos (Rock *et al*., 2020). Assim, avaliar e compreender os impactes de ciclo de vida é essencial para tomar decisões mais conscientes e informadas no planeamento, construção e gestão de edifícios.

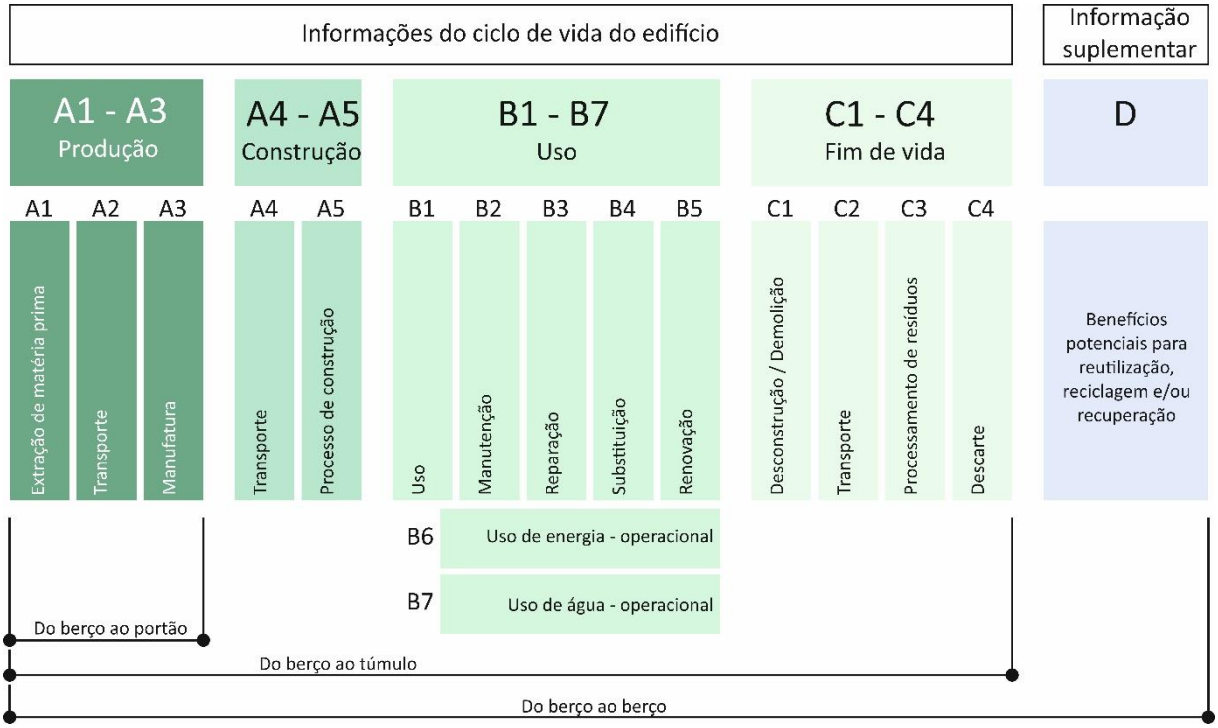


Figura 1 – Etapas do ciclo de vida de um edifício (adaptada de ISO 15804 (2012))

O método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente aceite para avaliar os impactes ambientais que resultam da manufactura de um produto, processo ou serviço ao longo da sua vida útil (IPCC, 2022; Kotula & Kamari, 2020; Schiavoni *et al*., 2016). Este método permite estimar os efeitos totais ou parciais, tanto adversos como positivos, sobre o ambiente natural, considerando diferentes etapas do ciclo de vida de uma construção, como mostra a Figura 1. As suas abordagens metodológicas incluem análise de inventário, avaliação de impacte, normalização, métodos de alocação e análise de incerteza (Barbhuiya & Das, 2023).

Destaca-se o potencial da ACV como um instrumento valioso para que projetistas, construtores e decisores de políticas públicas possam avaliar e comparar o desempenho ambiental dos produtos, promovendo o desenvolvimento de alternativas ecológicas e impulsionando a sustentabilidade global

(Singh *et al*., 2013). Assim, ao integrar as considerações da ACV no processo de design e construção, é possível construir edifícios com um perfil mais sustentável.

A ACV apresenta diversos benefícios na avaliação de materiais de construção, incluindo uma visão holística dos impactes ambientais e a capacidade de identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria ao longo de seu ciclo de vida (Liu *et al*., 2023). Os avanços recentes nessa área abrangem princípios de economia circular, alternativas renováveis, inovações tecnológicas e implicações políticas. Contudo, os desafios e direções futuras na sua implementação envolvem questões como qualidade dos dados, padronização, integração de aspetos sociais e colaboração entre indústria e investigação (Barbhuiya & Das, 2023).

A Organização Internacional de Padronização (ISO) promulgou em 2006 as normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b) com o objetivo de estabelecer os princípios e a estrutura técnica para avaliação do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Já no setor da construção, outras normativas, como a EN15804, surgem como forma de orientar o desenvolvimento e classificação de produtos de modo a contribuir para a conscientização do impacte ambiental, em especial, dos materiais de construção. A Figura 2 exemplifica as normativas referentes ao tema de acordo com sua especificidade.

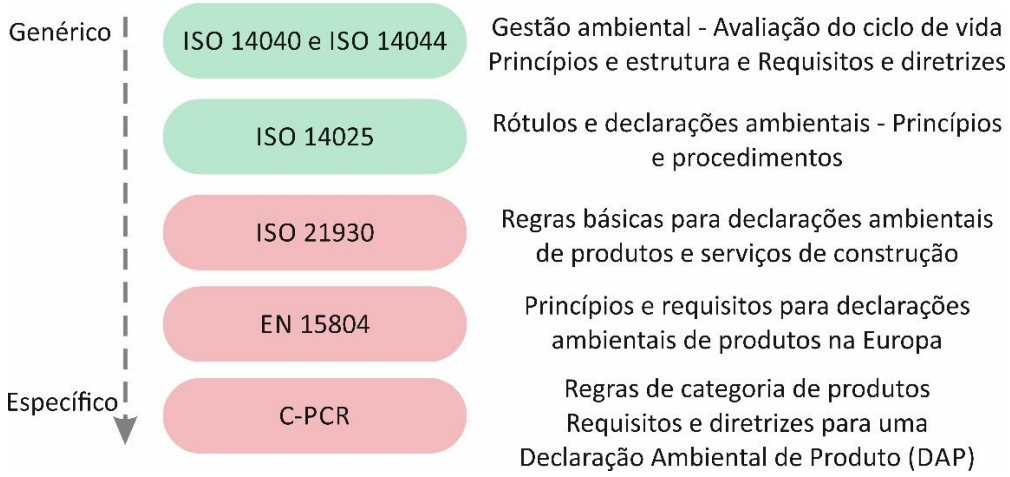


Figura 2 – Organograma de normas que influenciam a classificação de materiais de construção

Embora estudos anteriores tenham abordado os impactes ambientais dos materiais de construção, a bibliografia existente que compare o desempenho ambiental dos materiais de origem biológica com os materiais convencionais ainda é escassa. Isso deve-se à complexidade na análise dos biomateriais, além dos desafios de sua adoção na construção, como a falta de sensibilização e conhecimento, e o custo inicial mais elevado do que materiais convencionais (Garg, 2018). Neste contexto, alguns investigadores e profissionais da área defendem que o custo dos materiais convencionais não são reais, pois excluem o custo ambiental dos mesmos (Rogers ed., 2022).

O principal objetivo deste artigo é contribuir para reduzir esta lacuna a partir de um estudo comparativo do desempenho ambiental de materiais de isolamento de origem biológica com os materiais convencionais. Pretende-se proporcionar uma melhor compreensão dos impactes causados pelos materiais estudados, auxiliando no processo de decisão. Além disso, o estudo evidencia, ao utilizar declarações ambientais de produtos (DAPs), o contributo da ACV para a promoção da sustentabilidade na construção, uma vez que fornece uma base de dados sólida, facilitando comparações entre diferentes soluções construtivas.

2 METODOLOGIA

O método utilizado neste estudo seguiu as fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): definição de objetivo e âmbito, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), a avaliação de impacte de ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados (ISO, 2006a). A análise comparativa e a agregação de indicadores foram desenvolvidas utilizando a ferramenta multicritério de apoio à decisão, nomeadamente, Metodologia para Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC).

A MARS-SC é uma ferramenta multicritério que abrange três dimensões: ambiental, funcional e económica (Mateus *et al*., 2013; Mateus & Bragança, 2006). Com base no desempenho em cada dimensão, a ferramenta indica as opções mais sustentáveis para requisitos específicos, permitindo a seleção de soluções de construção que equilibrem de forma ótima o menor impacte ambiental, melhor desempenho funcional e maior viabilidade económica. Neste estudo, apenas a dimensão ambiental foi considerada.

Ao evidenciar lacunas nas soluções de construção existentes para atingir metas específicas de sustentabilidade, os resultados obtidos com a MARS-SC oferecem orientações para direcionar esforços de investigação e desenvolvimento na criação de novos materiais, tecnologias e processos. Ao usar dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), embora não forneça diretamente soluções de construção prontas, a metodologia orienta a tomada de decisões informadas e impulsiona o desenvolvimento sustentável na indústria da construção. Essa abordagem crítica promove uma reavaliação necessária das práticas existentes, impulsionando avanços no setor da construção como um todo e incentivando a adoção de práticas de construção mais sustentáveis e circulares (Mateus *et al*., 2013; Mateus & Bragança, 2006).

2.1 LIMITES DECLARADOS DA UNIDADE E DO SISTEMA

A unidade declarada foi 1 m^2 de material com resistência térmica de 3 (m^2 K)/W, que serve como base de comparação ao longo do estudo. Os limites desta pesquisa englobam os impactes ambientais incorporados na etapa de produção dos diferentes materiais de isolamento. A opção de limitar o estudo à fase do berço ao portão é justificada porque o uso e descarte dos materiais estão sujeitos a demasiadas suposições e incertezas de valores a depender da localização e aplicação do material, além de não ser a parte mais representativa dos impactes globais.

2.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

A análise de inventário foi utilizada para quantificar as entradas (ex. energia e materiais) e as saídas (ex. emissões e resíduos) do sistema dos produtos. No inventário estão incluídos a extração de matéria-prima, o seu transporte para o local de manufatura e a produção dos produtos de isolamento. Na MARS-SC, a avaliação do desempenho ambiental é baseada nas seguintes categorias de impacte ambiental: potencial de aquecimento global, destruição da camada de ozono, acidificação do solo e da água, eutrofização, criação de ozono fotoquímico e recursos energéticos primários não renováveis como energia (Mateus *et al*., 2013; Mateus & Bragança, 2006).

Para a quantificação dessas categorias de impacte ambiental foram consultadas Declarações Ambientais de Produto (DAP), dando prioridade às referentes ao contexto português. Na ausência de informação ambiental específica, recorreu-se ao programa informático de análise de ciclo de vida SimaPro (v. 9.5.0.0) para a modelação dos produtos para os quais não existem DAPs. Os dados do inventário do ciclo de vida foram convertidos em impactes ambientais potenciais, utilizando os

métodos "EN 15804 +A2 (adapted) v1.00" e presentes no software adotado. O Quadro 1 apresenta os indicadores considerados e respectivas unidades e método de avaliação.

Quadro 1 – Indicadores, unidades e métodos de avaliação do impacte do ciclo de vida (AICV) utilizados

Indicadores ambientais	**Unidade**	**Método de AICV**
Potencial de Aquecimento Global (GWP)	$kgCO_2eq$	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de destruição da camada de ozono (ODP)	kgCFC-11eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de acidificação (AP)	mol H^+ eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de criação fotoquímica de ozono (POCP)	kg NMVOC eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de eutrofização (EP)	kg P eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Uso de recursos naturais	**Unidade**	**Método de AICV**
Recursos energéticos primários não renováveis como energia (NRE)	MJ	Cumulative Energy Demand (LHV) V1.00

2.3 NORMALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO

Para mitigar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros dos diversos indicadores, bem como lidar com a sua variação, sendo que alguns adotam a lógica "quanto maior, melhor" e outros "quanto menor, melhor", foi essencial normalizar os indicadores (Mateus *et al*., 2013). Para isso, é utilizada a equação de Díaz-Balteiro (Bragança *et al*., 2013) :

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}}$$

Nesta equação, $\bar{P}_i$ é o resultado da normalização do parâmetro i, P_i é o valor resultante da quantificação, P_i^* e P_{*i} são os melhores e piores valores (menor e maior impacte, respetivamente) dentre os obtidos na quantificação.

A combinação de cada indicador ambiental num indicador global, que sintetiza o desempenho ambiental geral, foi conduzida conforme metodologia previamente descrita em estudos anteriores (Mateus *et al*., 2013; Mateus & Bragança, 2006). Os resultados são apresentados sob a forma de diagrama "radar", no qual o número de raios correspondeu ao número de indicadores analisados. Cada perfil sustentável permite a monitorização do desempenho geral dos diferentes tipos de isolamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação, foram selecionados oito tipos distintos de produtos de isolamento térmico, abrangendo desde os produtos convencionalmente utilizados até alternativas de base orgânica, não convencionais e de natureza mais inovadora. O Quadro 2 aponta as informações técnicas necessárias para a aplicação do método escolhido. Como apenas a dimensão ambiental será analisada neste

estudo, foi definido para todos os materiais a resistência térmica de 3 (m^2 K)/W uma vez que é a resistência encontrada na placa padrão de 10cm de XPS.

Quadro 2 – Informações técnicas dos materiais analisados

Material	Densidade (kg/m^3)	Condutibilidade térmica (W/(mK))	Resistência térmica ((m^2 K)/W)	Espessura (m)	kg/m^2
XPS	25,95	0,033	3,00	0,10	2,595
EPS	18,50	0,030	3,00	0,09	1,665
Lã de rocha	95	0,037	3,00	0,11	10,545
Lã de vidro	16	0,037	3,00	0,11	1,776
Painel de cortiça	110	0,039	3,00	0,12	13,455
Fibra de cânhamo	35	0,040	3,00	0,12	4,200
Fardo de palha	100	0,052	3,00	0,16	15,600
Painel de Arundo Donax	190,6	0,06	3,00	0,18	34,308

Os dados ambientais e técnicos, nomeadamente os coeficientes de condutibilidade térmica e os dados impactes ambientais dos materiais, foram retirados de DAPs baseadas na normativa EN 15804+A2:2019, com exceção dos dados relativos à cana Arundo Donax. Para este material, as informações técnicas do Quadro 2 foram obtidas através do trabalho de investigação de Malheiro *et al*. (2021) e os dados de impactes ambientais foram obtidos através do software SimaPro 9.5.0.0, como mencionado anteriormente. O Quadro 3 apresenta os impactes referentes a cada material estudado.

Quadro 3 – Dados dos impactes ambientais dos materiais utilizados por kg

Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Ref.
XPS	3,25E+00	2,57E-08	6,54E-03	4,93E-03	4,48E-02	8,72E+01	(The international EPD, 2023e)
EPS	4,54E+00	8,43E-08	1,49E-02	1,15E-02	7,79E-02	9,08E+01	(The international EPD, 2023a)
Lã de rocha	1,01E+00	2,10E-12	1,12E-02	2,57E-03	2,24E-02	1,55E+01	(The international EPD, 2023d)
Lã de vidro	2,36E+00	2,34E-07	2,75E-02	4,97E-02	3,03E-01	2,36E+01	(The international EPD, 2023b)
Painel de cortiça	-1,77E+01	7,83E-08	1,23E-02	1,57E-02	1,64E-01	9,13E+00	(EPD Hub, 2023)
Fibra de cânhamo	-1,77E+00	1,19E-08	1,54E-03	1,14E-03	1,69E-02	5,89E+00	(The international EPD, 2023c)

Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Ref.
Fardo de palha	-1,16E+00	1,05E-08	1,43E-03	4,48E-04	1,65E-02	9,38E-01	(The international EPD, 2022)
Painel de Arundo Donax	-5,39E-01	9,73E-10	3,63E-04	6,01E-04	2,69E-05	8,20E-01	-

Os impactes ambientais foram ajustados com base na quantidade utilizada ao considerar 1m^2 de cada material, como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Impactes dos materiais para 1m^2

Material	Kg/m^2	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE
XPS	2,595	8,44E+00	6,66E-08	1,70E-02	1,28E-02	1,16E-01	2,26E+02
EPS	1,665	7,56E+00	1,40E-07	2,48E-02	1,91E-02	1,30E-01	1,51E+02
Lã de rocha	10,545	1,06E+01	2,22E-11	1,18E-01	2,71E-02	2,37E-01	1,63E+02
Lã de vidro	1,776	4,19E+00	4,16E-07	4,88E-02	8,82E-02	5,38E-01	4,19E+01
Painel de cortiça	13,455	-2,39E+02	1,05E-06	1,66E-01	2,12E-01	2,20E+00	1,23E+02
Fibra de cânhamo	4,200	-7,42E+00	4,99E-08	6,47E-03	4,78E-03	7,10E-02	2,47E+01
Fardo de palha	15,600	-1,81E+01	1,63E-07	2,22E-02	6,99E-03	2,58E-01	1,46E+01
Painel de Arundo Donax	34,308	-1,85E+01	3,34E-08	1,25E-02	2,06E-02	9,24E-04	2,81E+01
Melhor valor (menor impacte)		**-2,39E+02**	**2,22E-11**	**6,47E-03**	**4,78E-03**	**9,24E-04**	**1,46E+01**
Pior valor (maior impacte)		**1,06E+01**	**1,05E-06**	**1,66E-01**	**2,12E-01**	**2,20E+00**	**2,26E+02**

Da análise do impacte de cada categoria nas soluções propostas, observa-se que os produtos derivados de materiais de base biológica são os que revelam um potencial de aquecimento global negativo, devido ao carbono biogénico presente nas plantas. Desta forma, estes destacam-se na categoria do GWP. Nas restantes categorias, estes materiais também exibem, de uma forma geral, um impacte ambiental menor. O painel de cortiça, apesar de apresentar o pior valor em quatro das seis categorias analisadas, continua a destacar-se devido ao seu melhor valor na categoria de potencial de aquecimento global. No caso da fibra de cânhamo, esta é o produto de isolamento com o melhor desempenho nos impactes ambientais de potencial de acidificação (AP) e potencial de criação fotoquímica de ozono (POCP).

Os materiais mais convencionais no mercado, nomeadamente o poliestireno extrudido (XPS) e o poliestireno expandido (EPS), revelam valores de mediano a mau em todas as categorias de impacte, e no que diz respeito ao potencial de aquecimento global, estão entre os três produtos com maior impacte ambiental nesta categoria.

Apenas pelo Quadro 4 é possível fazer uma análise geral de cada material, porém dado que cada categoria tem efeitos únicos na pegada ambiental global, é fundamental aplicar um sistema de ponderação. Os coeficientes de ponderação para cada categoria no MARS-SC foram retirados da Agência de Proteção Ambiental (EPA) (United States Environmental Protection Agency, 1990, 2000) e foram refletidos nos valores do Quadro 5. Foram considerados os seguintes pesos:

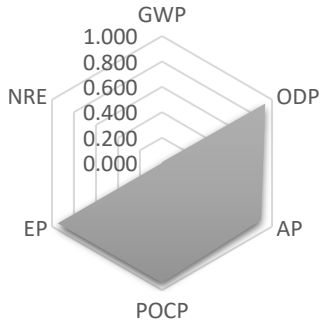
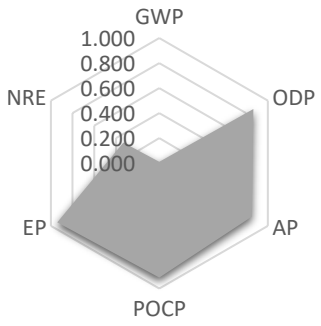
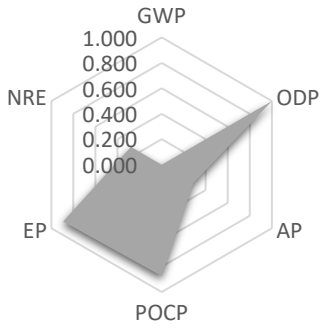
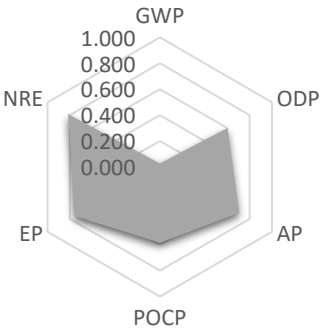
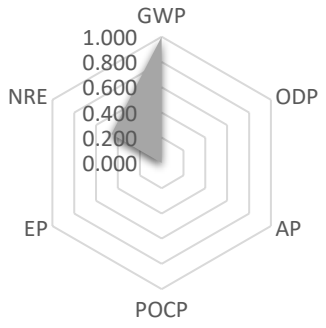
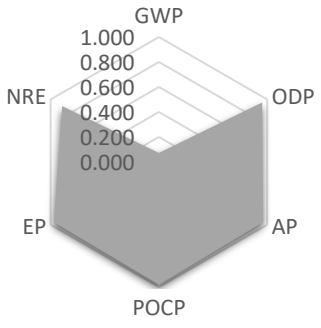
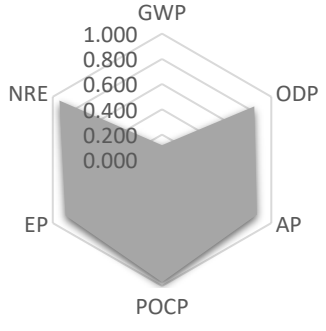
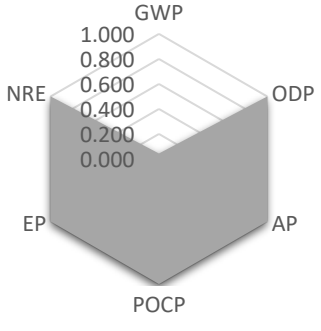
- GWP = 38%;
- ODP = 12%;
- AP = 12%;
- POCP = 14%;
- EP = 12%;
- NRE = 12%.

Quadro 5 – Normalização e ponderação dos impactes

Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Impacte Ambiental (IA)
XPS	0,009	0,937	0,934	0,961	0,948	0,000	0,476
EPS	0,012	0,867	0,885	0,931	0,942	0,354	0,501
Lã de rocha	0,000	1,000	0,298	0,892	0,893	0,297	0,423
Lã de vidro	0,026	0,605	0,735	0,597	0,756	0,871	0,449
Painel de cortiça	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,488	0,439
Fibra de cânhamo	0,072	0,953	1,000	1,000	0,968	0,952	0,632
Fardo de palha	0,115	0,845	0,901	0,989	0,883	1,000	0,618
Painel de Arundo donax	0,117	0,968	0,962	0,923	1,000	0,936	0,638

A análise comparativa dos materiais de isolamento demonstrou que o painel de canas Arundo Donax apresenta o melhor desempenho em termos ambientais. No entanto, devido ao seu peso, há preocupações quanto ao impacte na integridade estrutural das construções. Nesse contexto, a fibra de cânhamo surge como uma alternativa promissora, proporcionando um equilíbrio entre desempenho ambiental e manutenção da estrutura. O peso mais leve do isolamento em fibra de cânhamo atende às necessidades ambientais sem comprometer a estabilidade das edificações. A partir dos valores normalizados, é possível traçar o perfil de sustentabilidade, como visto no Quadro 6.

Quadro 6 – Perfil de sustentabilidade

XPS	**EPS**
	
Lã de rocha	**Lã de vidro**
	
Painel de cortiça	**Fibra de cânhamo**
	
Fardo de palha	**Painel de Arundo donax**
	

4 CONCLUSÕES

Este estudo reforça a importância da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nas decisões de construção sustentável, destacando a sua capacidade de fornecer uma visão geral do desempenho ambiental dos materiais ao longo de todo o ciclo de vida. Ao considerar os impactes desde a extração de matérias-primas até o descarte final, a ACV permite que projetistas, construtores e decisores políticos tomem decisões informadas que promovam a sustentabilidade ambiental.

Além disso, este estudo destaca as vantagens ambientais dos materiais de base orgânica, como os painéis de cana Arundo donax e a fibra de cânhamo. A fim de superar os desafios de disponibilidade e custos dos materiais de base orgânica em comparação com os mais convencionais, são necessárias estratégias que incentivem a produção e adoção desses materiais alternativos.

Embora a abordagem da MARS-SC possa oferecer uma avaliação mais completa da sustentabilidade dos materiais, optou-se por focar exclusivamente nos aspetos ambientais neste estudo. Isso permitiu uma análise mais detalhada dos impactes ambientais dos materiais, sem diluir o foco com outros critérios. Entretanto, nota-se que a fibra de cânhamo, o fardo de palha e o painel de canas precisam, em média, de 50% mais espessura do que o XPS para atingir a mesma resistência térmica, evidenciando uma diferença significativa que poderia ser considerada em avaliações mais abrangentes.

A inovação deste estudo está na comparação dos impactes ambientais de materiais de isolamento térmico de base biológica com materiais convencionais. No entanto, limitações e incertezas na metodologia de ACV, como a variabilidade dos dados e suposições sobre o ciclo de vida, podem influenciar os resultados e devem ser consideradas.

Quanto às perspectivas de trabalhos futuros, há uma necessidade de investigar com maior profundidade os potenciais benefícios e desafios dos materiais orgânicos na construção sustentável. Isso inclui estudos sobre novas tecnologias de produção, análises de custo-benefício a longo prazo e avaliações do ciclo de vida aprimoradas. Além disso, é importante explorar formas de aumentar a consciencialização e a aceitação desses materiais entre os profissionais da indústria da construção e os consumidores. Esses trabalhos futuros serão essenciais para impulsionar ainda mais a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis e promover a transição para uma economia circular e de baixo carbono.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi também financiado por fundos do Fundo Social Europeu (FSE) e do Programa POR NORTE através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia e do Programa MIT Portugal, ao abrigo do contrato de subvenção atribuído ao 1º autor (PRT/BD/152839/2021) e ao 3º autor (SFRH/BD/151345/2021).

REFERÊNCIAS

Kotula, B. M., & Kamari, A. (2020) “Development of a BIM-based LCA Tool to Support Sustainable Building Design during the Early Design Stage”, In The 54th International Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA). Available from: https://anzasca.net/paper/developmentof-a-bim-based-lca-tool-to-support-

sustainablebuilding-design-during-the-early-design-stage/

Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, *19*(June). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326

Bragança, L., Araújo, C., Castanheira, G., Barbosa, J. A., & Oliveira, P. (2013). Approaching sustainability in the built environment. In Proceedings of International Conference SB13 Seoul - Sustainable Building Telegram Toward Global Society.

CEN. (2012). *EN 15804:2012+A1:2013 - Sustainability of Construction Works e Environmental Product Declarations e Core Rules for the Product Category of Construction Products*. European Committee for Standardization.

EPD Hub. Environmental Product Declaration: Cork board insulation Amorim. (2023). Disponível em: http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf

Garg, N., Kumar, A., Pipralia, S., & Kumar, P. (2018). Sustainable Building Materials for Energy Efficiency. In *International Conference on Urban Sustainability: Emerging Trends, Themes, Concepts & Practices (ICUS)*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926.011

ISO 14040. (2006). Environmental Management: Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. (Technical Report)

ISO 14044. (2006b) Environmental Management Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. (Technical Report)

Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2010). An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, *45*(3), 766–775. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.010

Liu, F., Shafique, M., & Luo, X. (2023). Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103343.

Liu, N., Liu, Y., Gong, X. Z., Hao, L. W., Gao, F., Li, X. Q., & Zheng, Y. (2020). Recent Developments on Life Cycle Assessment of Building Materials. Materials Science Forum, 993, 1534–1544. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.993.1534

Rogers, L. (Ed.)(2022). Material Cultures: *Material Reform: Building for a Post-Carbon Future* (1st edition). Mack Books.

Malheiro, R., Ansolin, A., Guarnier, C., Fernandes, J., Amorim, M. T., Silva, S. M., & Mateus, R. (2021). The potential of the reed as a regenerative building material—characterisation of its durability, physical, and thermal performances. Energies, 14(14). https://doi.org/10.3390/en14144276Mateus, R., & Bragança, L. (2006). Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção.

Mateus, R., & Bragança, L. (2009). *Avaliação da construção sustentável : propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis*.

Mateus, R., & Bragança, L. (2011). Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the

methodology SBToolPT-H. *Building and Environment*, *46*(10), 1962–1971. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.023

Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., & Macieira, M. (2013). Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies. *Building and Environment*, *67*, 147–159. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.012

One click LCA. (2023). *Environmental Product Declaration: Cork board insulation Amorim*. http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf

Röck, M., Saade, M.R.M., Balouktsi, M., Rasmussen, F.N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – the hidden challenge for effective climate change mitigation. Appl. Energy 258, 114107. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107.

S. Schiavoni, F. D 'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali. (2016). "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis", Renewable and Sustainable Energy Reviews. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045

Singh, A., Olsen, S.I., Pant, D., 2013. Importance of life cycle assessment of renewable energy sources. In: Singh, A, Pant, D, Olsen, S.I. (Eds.), Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources, Green Energy and Technology. Springer, London, pp. 1–11. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-44715364-1_1.

The international EPD. (2022). *Environmental Product Declaration: Straw, School of Natural Building (SNaB)*. www.environdec.com

The international EPD. (2023a). *Environmental Product Declaration: EPS Kauno silas UAB*.

The international EPD. (2023b). Environmental Product Declaration: Glass wool Ursa. Disponível em: http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf. Acesso em 20/03/2024.

The international EPD. (2023c). *Environmental Product Declaration: Hemp fibre insulation Ekolution AB*. Disponível em: http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf. Acesso em 20/03/2024.

The international EPD. (2023d). *Environmental Product Declaration: Rock wool Knauf insulation*.

The international EPD. (2023e). *Environmental Product Declaration: XPS Styropan*. https://doi.org/10.4324/9780203889565.ch4

United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector", *Global Status Report for Buildings and Construction*. Available from: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095

United States Environmental Protection Agency. (1990). Reducing risk: Priorities and strategies for environmental protection. In *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. https://doi.org/10.2118/24550-ms

United States Environmental Protection Agency. (2000). *Toward integrated environmental decision-making*.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM HABITAÇÕES

Leonardo Rodrigues[abc*]; João Delgado[a]; Adélio Mendes[bc]; Ana Sofia Guimarães[a]

[*]up201306124@edu.fe.up.pt

[a]CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

[b]LEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

[c]ALiCE - Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

1 RESUMO

A humanidade enfrenta neste momento o desafio da transição energética. No setor dos edifícios, responsáveis em Portugal pela emissão de 40 % CO_2, a instalação de sistemas baseados em tecnologias de conversão de energia a partir de fontes renováveis tem aumentado nas últimas décadas, com a redução do custo nivelado de energia destas. Dada a intermitência da energia solar, o acoplamento de painéis fotovoltaicos a tecnologias de armazenamento permite aos utilizadores uma maior independência energética da rede elétrica. Isto traduz-se numa poupança mensal nas despesas de energia na habitação. Além disso, estes sistemas ajudam a mitigar os picos de carga na rede elétrica. No entanto, estas tecnologias têm um investimento inicial elevado, o que não é atrativo para muitos utilizadores. Neste trabalho foi realizada uma otimização do dimensionamento de um sistema de geração e armazenamento de energia para aplicações residenciais. Utilizando dados reais de painéis fotovoltaicos, o desempenho destes foi avaliado ao longo do ano. Juntamente com um perfil de carga residencial, foi feito um balanço horário entre o fluxo energético disponibilizado pela componente de geração e de armazenamento para satisfazer a carga energética da habitação. Caso estes sistemas não consigam satisfazer a carga necessária, o sistema recorreu à rede elétrica. Tendo em consideração o zonamento climático de Portugal, foram consideradas três diferentes localizações - Porto, Bragança e Évora.

Palavras-chave: Modelação Energética de Edifícios, Tecnologias Renováveis, Painéis Fotovoltaicos, Sistemas de Armazenamento, Análise Técnico-Económica

2 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população mundial aumenta também a procura por novos edifícios. O sector da construção contribui significativamente para a utilização de energia e para a emissão de gases com efeito de estufa (Akadiri, Chinyio, & Olomolaiye, 2012). Vários relatórios mostram que os edifícios foram responsáveis por uma parte substancial das emissões de CO2 em 2016 (Ritchie, Roser, & Rosado). Para mitigar estas emissões, o sector da construção adotou soluções para reduzir o consumo de energia e descarbonizar a energia consumida. As políticas governamentais, como a Diretiva Europeia, exigem edifícios com necessidades quase nulas de energia (em inglês, "Nearly zero energy, buildings" - NZEBs), com objetivos adicionais de edifícios com emissões nulas até 2030. Os NZEBs são caracterizados pela sua elevada eficiência energética e o uso de energia renováveis. Incorporam frequentemente soluções passivas na construção, assim como tecnologias como painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia (em inglês, "Energy Storage Systems" – ESS). Esta transição energética requer a consideração do armazenamento de energia para mitigar a intermitência da energia solar. O mercado dos painéis fotovoltaicos tem aumentado significativamente na última década, esperando que se atinga 2.3 TW de capacidade em 2025 (Europe, 2002). Um dos principais motivos para esse crescimento pode ser atribuído à diminuição do custo de fabrico que se tem verificado ao longo dos anos (Mathews, Kantareddy, Buonassisi, & Peters, 2019). Está provado que os ESS são capazes de reduzir os custos da eletricidade doméstica (Emmett & Roberts, 2021), e que a maioria destes se baseiam em baterias (IRENA, 2017; Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

3 DADOS E MÉTODOS

O modelo foi implementado na aplicação Python e é constituído por cinco elementos principais: i) dados meteorológicos, ii) produção fotovoltaica, iii) perfil de carga residencial, iv) balanço energético e v) análise técnico-económica. Em primeiro lugar o modelo obtém os dados meteorológicos de um ano típico meteorológico para uma dada localização, calculando a energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Em seguida, efetua o balanço energético utilizando a energia produzida, a carga energética residencial e a energia disponível no sistema de armazenamento. Finalmente, com os resultados obtidos, é efetuada uma análise de custos.

O modelo é composto por duas partes: a primeira é uma simulação de um único ano utilizando dados meteorológicos do ano meteorológico típico (TMY). A inclinação é variada em incrementos de 5 graus, começando em 10, para efeitos de autolimpeza (Zealand, 2010). O modelo otimiza a inclinação para obter a produção máxima e a independência da rede elétrica. A segunda parte do modelo utiliza dados históricos para simular um período de vários anos para um determinado local. A degradação fotovoltaica é considerada. A simulação é efetuada para um único valor de declive, pré-determinado após análise utilizando a primeira parte. O azimute considerado neste trabalho foi de 160 graus (considerando Norte como zero graus e contando no sentido dos ponteiros do relógio) e mantido constante em todas as simulações.

Neste trabalho, os dados climáticos foram obtidos usando a ferramenta PVGIS (Comission). A modelação fotovoltaica foi feita usando a biblioteca Python pvlib versão 0.10.4 (Anderson et al., 2023; F. Holmgren, W. Hansen, & A. Mikofski, 2018). O modelo calculou o ponto de potência máxima para um determinado painel fotovoltaico utilizando o modelo de díodo único CEC, a temperatura da célula e a irradiância efetiva. O módulo escolhido para as simulações foi o STP550S-C72/Vmh da empresa Suntech (Suntech, 2022), sendo utilizados 8 módulos neste trabalho. O inversor escolhido para as simulações foi o SPH 6000 TL3-BH-UP da Growatt (Growatt). Quanto ao perfil de carga residencial, o

perfil alemão H0 SLP foi escolhido para o balanço energético (BDEW, 2017; VDEW, 1999). Finalmente, a bateria usada na simulação foi a Powerwall 2 da empresa Tesla (Tesla, 2023).

Relativamente ao balanço energético, o modelo limita a produção fotovoltaica total utilizando a potência máxima de carga/descarga do inversor. Se a produção fotovoltaica for suficiente para satisfazer a carga residencial, a energia excedente é enviada para a bateria para a carregar. A energia extra é enviada para a rede se sobrar depois de a bateria estar totalmente carregada. Se a produção fotovoltaica for inferior à procura de carga, o sistema retira energia da bateria. Nos cenários em que a bateria não tem energia suficiente para satisfazer as necessidades do agregado familiar, é utilizada a energia da rede.

Relativamente à análise técnico económica, o modelo determina o custo inicial somando o custo dos equipamentos (painéis fotovoltaicos, inversor, bateria e cabos/acessórios), o custo de instalação, o custo do terreno assim como outros custos associados. O custo anual contempla o custo de operação, o custo de manutenção e o custo da compra de eletricidade à rede elétrica menos os ganhos de venda de eletricidade à rede elétrica. Estes últimos são obtidos durante a simulação. O modelo compara dois cenários: um sem sistema solar e outro com PV com/sem uma bateria adicionada ao sistema. A intersecção de ambas as curvas determina o retorno do investimento.

Finalmente, foram feitas simulações para três localizações em Portugal, visto terem diferentes zonamentos climáticos: Porto (V1, I2), Bragança (V2, I3) e Évora (V3, I1) (Portuguesa, 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que se seguem referem-se a um sistema de oito módulos fotovoltaicos, um inversor e uma bateria, tal como descrito na secção anterior. O local escolhido para a simulação foi o Porto, Portugal. O perfil de carga residencial escolhido foi o H0 SLP. A produção fotovoltaica é mostrada na Figura 1.

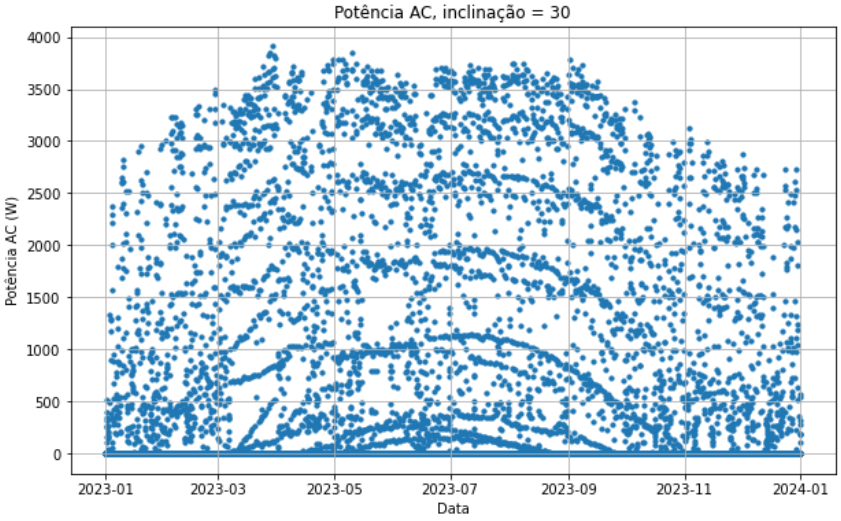


Figura 1 - Produção fotovoltaica horária no Porto, Portugal

O modelo substituiu as datas do TMY para um ano arbitrário, uma vez que os dados meteorológicos incluem meses diferentes. Para uma inclinação de 30 graus, a produção horária máxima observada foi de 3 910 W.

Foi realizada uma otimização da inclinação com duas variáveis: a energia total gerada pelo sistema fotovoltaico e a percentagem de energia importada da rede. Os resultados são apresentados na Figura 2.

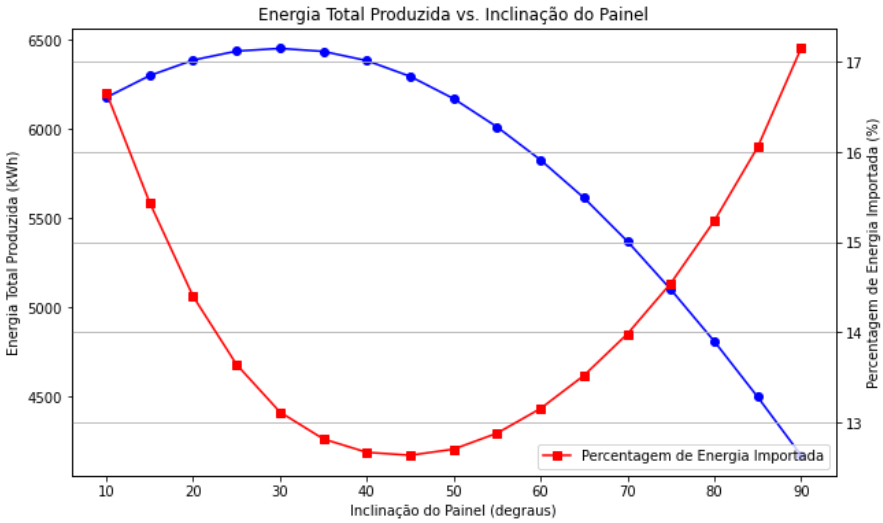
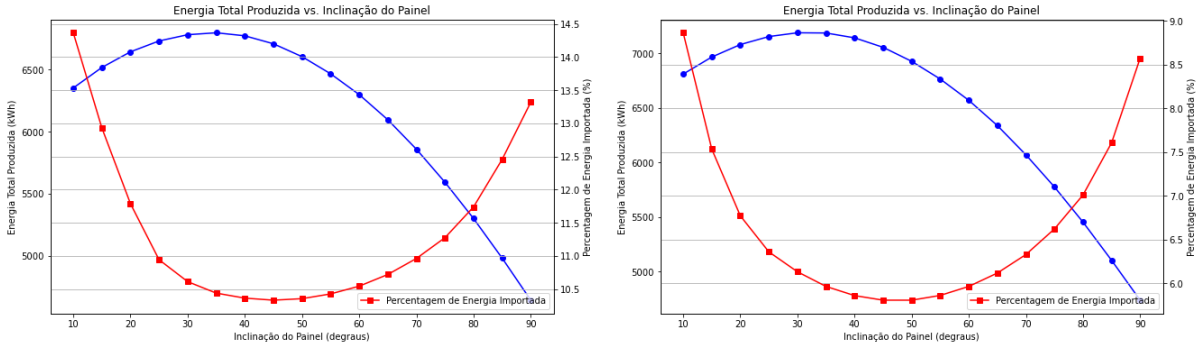


Figura 2 - Energia total produzida (a azul) e percentagem de energia importada (a vermelho) para diferentes inclinações dos painéis fotovoltaicos no Porto.

O modelo otimiza para a máxima produção de energia ou para a minimização de energia importada da rede elétrica (ou a maximização de independência energética). Para o Porto, a inclinação de 30 graus traduziu-se numa produção de 6 453,2 kWh. Desse total, 2 619,9 kWh, ou 40,6 %, foram vendidos diretamente à rede. Apesar da elevada quantidade de energia produzida, o agregado familiar importou 527,9 kWh ou seja 13,2 % da energia que consumiu; isto significa que o agregado familiar tem uma independência da rede de 86,8 %. Para a minimização a fração de energia importada, a inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos é de 45 graus. Com esta inclinação, o sistema fotovoltaico produziu um total de 6 295,9 kWh. 2 436,1 kWh foram vendidos à rede, ou seja, 38,7 % da energia total produzida. Finalmente, o agregado familiar precisou de importar 508,8 kWh ou 12,7 % da energia consumida. Isto melhorou a independência da rede para 87,3%.

Os resultados obtidos para Bragança e Évora encontram-se na Figura 3.



a) Bragança b) Évora

Figura 3 - Energia total produzida (a azul) e percentagem de energia importada (a vermelho) para diferentes inclinações dos painéis fotovoltaicos em a) Bragança e b) Évora.

Como podemos ver pela Figura 3, o sistema fotovoltaico é capaz de produzir mais energia em Évora, sendo que na inclinação ótima de 30 graus o sistema produz 7 187,9 kWh. Desse total, 3 026,4 kWh, ou 42,1 %, foram vendidos diretamente à rede. Foram importados 244,7 kWh, correspondente a 6,1 %, conferindo ao sistema uma independência da rede de 93,7 %. Em Bragança, o máximo produzido foi de 6 797,1 kWh. Desse total, 2 833,8 kWh, ou 41,7 %, foram vendidos diretamente à rede. Foram importados 417,7 kWh, correspondente a 10,5 %, conferindo ao sistema uma independência da rede de 89,5 %.

Comparando as três localidades podemos concluir que o mesmo sistema fotovoltaico mais armazenamento tem um melhor desempenho em Évora, depois Bragança e finalmente no Porto. É preciso realçar que as necessidades energéticas destes locais também são diferentes (nomeadamente nos picos de Verão em Évora e no inverno em Bragança), por isso para esta análise ser mais correta deveriam ser estudados diferentes perfis de carga residencial. No entanto, o modelo permite uma clara análise da quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico e da determinação da percentagem de independência da rede elétrica.

Foi escolhido um período de 20 anos para a simulação de vários anos com os mesmos parâmetros de "referência" (Porto, oito painéis, um inversor e uma bateria). Os resultados da produção fotovoltaica são apresentados na Figura 4.

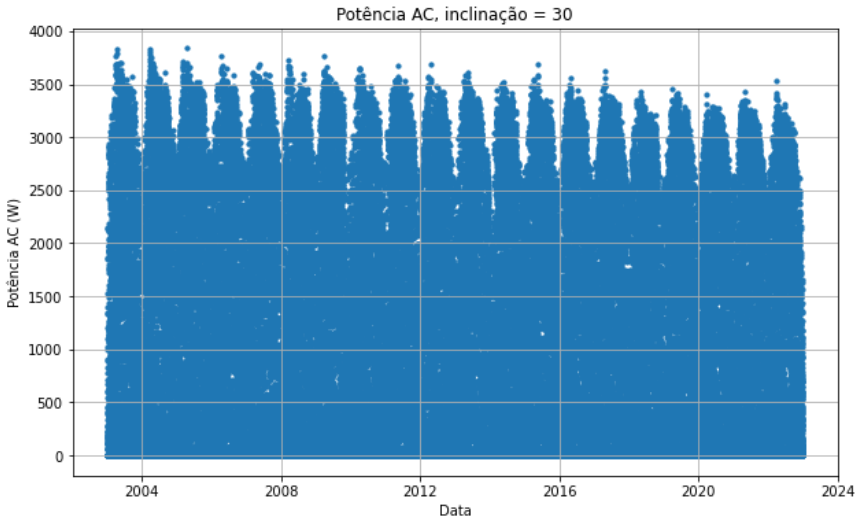


Figura 4 – Produção fotovoltaica horária no Porto, Portugal. Resultados obtidos para uma simulação de 20 anos

O sistema fotovoltaico produziu um total de 119,98 MWh. A degradação do sistema fotovoltaico pode ser observada à medida que a energia total produzida diminui anualmente. O perfil de carga residencial (H0 SLP) foi repetido ao longo dos 20 anos. A carga residencial total foi de 79,90 MWh. 10,9 % foi importado da rede, o que corresponde a 8 679 kWh. A fração de energia vendida à rede foi de 40,1 %, num total de 48 075 kWh.

Finalmente, foi efetuada uma análise de custos. Esta foi feita através do cálculo do custo de investimento inicial, onde foram contemplados os custos dos equipamentos, assim como os custos de instalação. O cálculo de custo anual foi feito utilizando os custos de manutenção, custo de compra e venda de eletricidade e a quantidade de energia importada e exportada para a rede elétrica. Os valores utilizados encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Custos considerados na análise de custos

Custo de importação de eletricidade / €	0,1943
Custo (ganho) da exportação de eletricidade / €	0,04
Custo de um painel fotovoltaico / €	500
Número de painéis	8
Custo da bateria / €	10000
Número de baterias	1
Custo do inversor / €	1800
Custo de instalação / €	200
Custo de manutenção anual / €	150
Outros custos / €	50

Juntado os resultados obtidos da simulação com os valores do Quadro 1, a projeção de custos a 20 anos é apresentada na Figura 5.

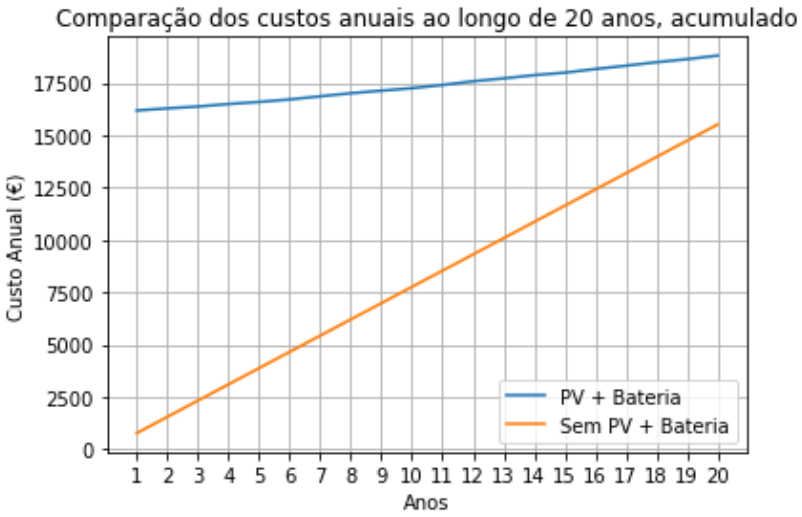


Figura 5 - Análise de custos anuais durante o período de simulação utilizando o perfil H0 SLP

Na Figura 5 é possível ver que para os custos considerados no Quadro 1 o sistema fotovoltaico e bateria (a azul) tem um custo benefício inferior comparado com uma habitação sem este sistema (a laranja). De facto, numa projeção a 20 anos, o sistema não compensa economicamente.

Os resultados fornecidos pelo modelo indicaram que este funcionou corretamente. O balanço energético foi corretamente implementado e o modelo permitiu obter informações sobre os sistemas fotovoltaicos e de armazenamento propostos. Diversas variáveis podem ter um grande impacto no facto de um sistema como este ser ou não desejável. De um ponto de vista económico, o preço da bateria é um dos fatores mais limitantes. Assumindo um custo zero para o sistema de armazenamento, o retorno sobre o investimento diminuiu para 9 anos, conforme demonstrado na Figura 6.

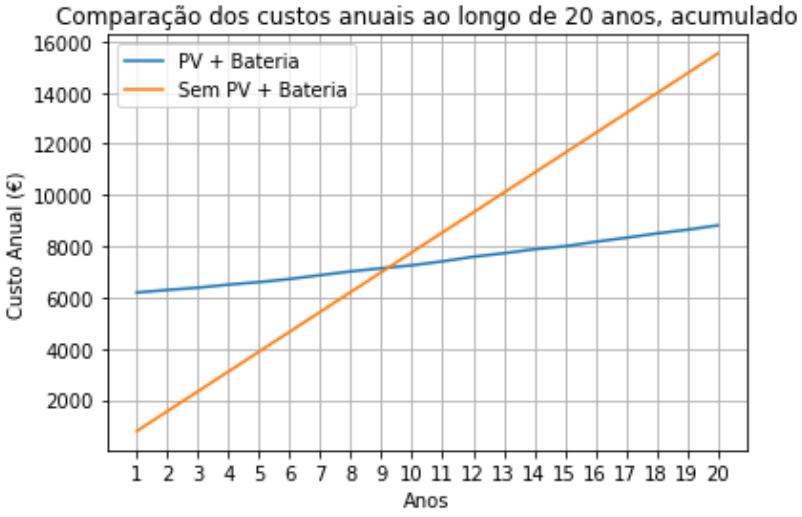


Figura 6 - Análise de custos anuais durante o período de simulação utilizando o perfil H0 SLP e considerando custo zero para o sistema de armazenamento

Dado que a esperança de vida das baterias é de cerca de 10-15 anos, as condições atuais tornam os sistemas PV + Bateria inviáveis. Este facto vai ao encontro dos estudos acima referidos sobre a viabilidade económica das baterias, que concluíram que estas não são rentáveis. Soluções como as baterias de segunda vida dos veículos elétricos podem ajudar a reduzir os custos de armazenamento.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo para sistemas fotovoltaicos e de armazenamento eletroquímico para habitações. O modelo utiliza dados meteorológicos para determinar o desempenho do sistema fotovoltaico. Posteriormente, efetua o balanço energético utilizando perfis de carga residencial, energia fotovoltaica e um sistema de armazenamento. Finalmente, o modelo analisa vários anos do desempenho do sistema, bem como um estudo técnico-económico.

Foram analisadas diferentes inclinações para as cidades do Porto, Bragança e Évora devido aos seus zoneamentos climáticos. Para o sistema escolhido, Évora apresentou o melhor desempenho anual a nível de total de energia produzida – 7 187,9 kWh - e menor importação de energia da rede elétrica (maior independência elétrica) - 93,7 %. O pior desempenho anual foi verificado na cidade do Porto, onde 6 453,2 kWh foram gerados, tendo a habitação uma independência elétrica de 86,8 % para a mesma inclinação. Como futuros resultados deverão ser incluídos diferentes perfis de carga residencial, assim como uma análise de sensibilidade ao número de painéis fotovoltaicos e tamanho da bateria. A análise de custos também mostrou que o sistema apenas teria retorno do investimento baixando significativamente o preço do armazenamento, o que de momento não se traduz na realidade. O modelo levantou muitas questões sobre os diferentes componentes e o seu impacto no desempenho do sistema. Outros desenvolvimentos relativos à degradação da bateria e à criação de perfis de carga residencial mais específicos conduzirão a simulações mais exatas para cenários reais.

REFERÊNCIAS

Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2012). Design of A Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector. *Buildings, 2*(2), 126-152. Retrieved from https://www.mdpi.com/2075-5309/2/2/126

Anderson, K. S., Hansen, C. W., Holmgren, W. F., Jensen, A. R., Mikofski, M. A., & Driesse, A. (2023). pvlib python: 2023 project update. *Journal of Open Source Software, 8*(92), 5994. doi:10.21105/joss.05994

BDEW. (2017). Standard load profiles current. Retrieved from https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/

Comission, E. PVGIS typical meteorological year (TMY) generator. Retrieved from https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-tools/pvgis-typical-meteorological-year-tmy-generator_en

Emmett, R. K., & Roberts, M. E. (2021). Recent developments in alternative aqueous redox flow batteries for grid-scale energy storage. *Journal of Power Sources, 506*, 230087. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230087

Europe, S. (2002). *Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026.* Retrieved from

F. Holmgren, W., W. Hansen, C., & A. Mikofski, M. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software, 3*(29), 884. doi:10.21105/joss.00884

Growatt. Retrieved from https://growatt.tech/product/growatt-sph-6000-tl3-bh-up-hybrid-3-phase-inverter/

IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Retrieved from Abu Dhabi:

Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage, 27*, 101047. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047

Mathews, I., Kantareddy, S. N., Buonassisi, T., & Peters, I. M. (2019). Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells. *Joule, 3*(6), 1415-1426. doi:https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.03.026

Portuguesa, R. (2006). *Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*. Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04, páginas 2468 - 2513: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações Retrieved from https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/80-2006-672456

Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. CO_2 and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*.

Suntech. (2022). STPXXXS - C72/Vmh 530-550W Datasheet. Retrieved from https://www.suntech-power.com/wp-content/uploads/download/product-specification/EN_Ultra_V_STP550S_C72_Vmh.pdf

Tesla. (2023). Tesla Powerwall 2 Technical Specifications. Retrieved from https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/powerwall-2-ac-datasheet-en-na_001

VDEW. (1999). *Repräsentative VDEW-Lastprofile*. Retrieved from https://www.bdew.de/media/documents/1999_Repraesentative-VDEW-Lastprofile.pdf

Zealand, S. N. (2010). AS-NZS 4509-2: Stand-alone power systems - Part 2: System In.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CERTIFICAÇÃO E ETIQUETAGEM DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PORTUGAL E NO BRASIL . MATURIDADE DE APLICAÇÃO

Douglas Barreto[a] Inês Flores-Colen[b]

[a] Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia Civil, Rodovia Washington Luis, km 235 – São Carlos SP-Brasil, dbarreto@ufscar.br

[b] CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, Lisboa, Portugal; ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Atualmente o nível da eficiência energética, no âmbito do edificado, é determinado por Sistemas de Certificação Energética de Edifícios. Em Portugal e no Brasil existem sistemas similares que classificam o nível de eficiência energética dos edifícios. O objetivo desta comunicação é apresentar o SCE – Sistema de Certificação de Energética e o PROCEL - EDIFICA, respectivamente adotados em Portugal e no Brasil, identificando as similaridades existentes e o estágio de maturação da aplicação dos sistemas. Foi realizada uma análise estatística das certificações atestadas pelos dois Sistemas. O resultado aponta que em Portugal, nos últimos três anos, foram certificados aproximadamente 756 mil Edifícios de Habitação e 84 mil Edifícios de Comércios e Serviços, enquanto que no Brasil nos últimos dez anos foram certificados 1.202 Edifícios de Habitação e 180 de Comércio e Serviços. Conclui-se que a diferença deve-se aos aspectos de ordem legal e operacional. Em Portugal a certificação é compulsória, exigida por Leis e Diretivas. No Brasil é voluntária, recomendada em Instruções Normativas. Em Portugal a Certificação é realizada por um grande contingente de profissionais, ao passo que no Brasil é realizada por poucas empresas. Dadas estas diferenças conclui-se pela necessidade de ajustes no modelo brasileiro, ampliando a oportunidade para profissionais também realizarem a Certificação Energética de modo a aumentar a quantidade do edificado certificado.

Palavras-chave: Certificação Ambiental, Certificação Energética, Eficiência Energética, Etiquetagem, Maturidade de aplicação

1 INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris de 2015, UNFCCC (2015), englobando 194 países, firmou compromisso de reduzir as emissões de carbono até 2030, para que o aumento da temperatura média não ultrapasse 2,0 °C e mantenha-se em 1,5 °C, de modo a evitar que as alterações climáticas provoquem eventos catastróficos, conforme o alerta do clima do Intergovernmental Panel on *Climate Change* – IPCC (IPCC,2018).

Dado que em 2030, prevê-se que 80 % da população mundial (UNITED NATIONS, 2021)) estará vivendo no meio urbano, consequentemente habitando edificações para moradia e trabalho, que consomem energia, em diversas formas, sendo o setor de edifícios responsável por 30 % do total de energia consumida no mundo (IEA, 2022), aproximadamente 37 % do total de emissões de CO_2 (UNEP, 2024). Ainda de acordo com a UNEP (2024) existem mais de 60 sistemas de certificação em vários países, os quais tornaram-se instrumentos importantes para identificar e classificar a eficiência energética do uso da energia em edificações. Dependendo da classificação pode-se promover ações de melhoria de eficiência e evitar, ou minimizar, as emissões de carbono.

Tanto em Portugal como no Brasil, já implementaram sistemas de certificação energética de edificações com aplicação por mais de uma década, e que contribuem para aumentar a eficiência energética nos edifícios. Em estudo similar, LOPES et.al.(2016) apontam que o sistema de etiquetagem brasileiro necessita de mais divulgação, ampliação dos consultores habilitados; e de metodologia mais abrangente, em comparação com o SCE (Sistema de Certificação de Edifícios).

Assim, esta comunicação apresenta os resultados de um estudo comparado entre Portugal e Brasil, no âmbito dos modelos de certificação e etiquetagem energética, como no Brasil é conhecida a certificação energética de edificações, para identificar as potenciais melhorias no sistema de certificação do Brasil.

1.1 SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS SCE – PORTUGAL

Segundo a (DGEG, 2024) até o momento foram editadas três Diretivas EPBD (*Energy Performance of Building Directive*) sendo que para cada uma delas há um conjunto de Decretos-Lei, que estão vigorando, e que ordenam as matérias contidas nas Directivas EU, que estão em SCE (2024). Na Figura 1 está apresentada a linha do tempo dos documentos legais de referência que estruturam o sistema de certificação.

Figura 1 – Linha do tempo da emissão das Diretivas acerca da Certificação de Eficiência.

Fonte: (SCE, 2024)

A partir do Decreto -Lei n.º 101 de 2020 ((DRE (A), 2020)) [10] sucedeu-se um pacote legislativo destacando-se o Despacho n.º 6476-H de 2021 (DRE (B), 2021), que aprova o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios – SCE, que contém as diretrizes e critérios de avaliação utilizados na certificação de edifícios.

1.1.1 Manual SCE

A Direção-Geral de Energia e Geologia – DGEG e a Agência para a Energia – ADENE, elaboraram o "Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios" (DGEG-ADENE, 2023) que tem incorporado as alterações dos Despachos n.ºs 9216/2021 e 12935-B/2023 e Declaração n.º 80/2024 (SCE, 2024).

O Manual SCE contém todas as diretrizes incluindo os procedimentos para emissão de um pré-certificado energético (PCE) ou certificado energético (CE), considerando os seguintes aspectos: caracterização do edifício e sua localização; os elementos da envolvente e dos sistemas técnicos; a metodologia de cálculo; a determinação de indicadores e da classe energética do edifício. O Manual também inclui a identificação e estudo de medidas de melhoria (MM) e relatório de avaliação do desempenho energético da edificação (DEE).

Os edifícios novos e os existentes foram avaliados de acordo com o Manual SCE, ao final do processo é emitida Certificação Energética, na qual consta a classe energética do edifício. São dois tipos de certificados energéticos, aplicáveis às tipologias dos edifícios analisados, e a Figura 2, a seguir, apresenta uma imagem dos modelos de Certificado Energético para Edifício Habitação e Edifício de Comércio e Serviços.

Figura 2 – Modelos de Certificado Energético para Edifícios de Habitação e de Comércio e Serviços

Fonte: (SCE(A), 2024).

Estes certificados indicam o nível de classificação energética, que varia do nível menos eficiente (F) ao mais eficiente (A+), além da pegada ambiental (emissão de CO_2 ton/ano) e informações sobre o desempenho energético do edifício.

1.1.2 Roteiro para obtenção do Certificado Energético

Qualquer edificação, por meio de seu proprietário, ou representante legal, pode solicitar o Certificado Energético do edifício – Habitação ou Comércio e Serviços. Para facilitar o processo para os proprietários solicitarem o Certificado Energético, a ADENE dispõe disponibiliza instruções para os cinco passos que devem ser considerados para obtenção do Certificado (ADENE , 2024).

Ao final do processo é emitido o Certificado energético contendo todo o conjunto de informações acerca do Edifício certificado, como a identificação predial; os indicadores de desempenho; a classe energética; os consumos por forma de energia, propostas de medidas de melhoria; e recomendações sobre os sistemas técnicos.

1.2 SISTEMA DE ETIQUETAGEM DE EDIFÍCIOS PROCEL-EDIFICA – BRASIL

O programa Procel Edifica, vigente desde 2003, e em 2005, o Inmetro passou compor o processo através da Comissão Técnica de edificações (CT), que discute o processo de obtenção de etiquetas para edificações, de acordo com os Requisitos de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações - RAC (INMETRO, 2013).

A partir de então, desenvolveu-se os Requisitos Técnicos da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C (INMETRO(A), 2017) e o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais RTQ-R (INMETRO(B), 2014), que estabelecem os requisitos, parâmetros e métodos para a avaliação de uma edificação, ou seja, quais parâmetros são considerados, o que são esses parâmetros e como eles são calculados, e os documentos complementares.

O PBE Edifica, por meio de organismo acreditado pelo INMETRO [4], avalia e classifica o desempenho energético das edificações como um todo, desenvolvido em parceria entre o Inmetro e a Eletrobras/PROCEL Edifica, a Etiqueta de Eficiência Energética.

Deste estão uma série de Portarias e Regulamentos foram publicados de maneira que o processo de etiquetagem pudesse ser implementado. A Figura 1, a seguir apresenta a linha do tempo destas publicações.

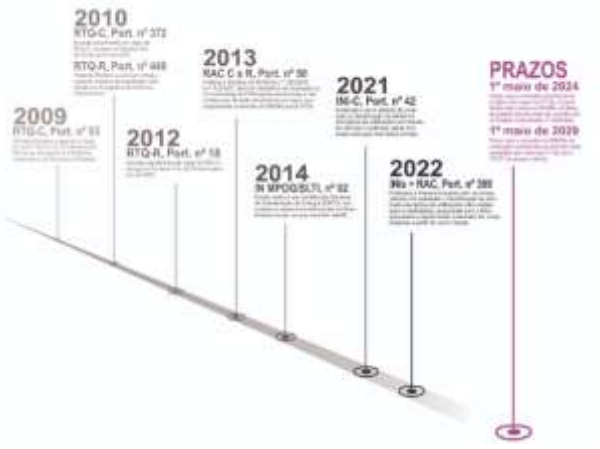


Figura 3 – Linha do tempo das publicações relativas à Etiquetagem

Fonte: (INMETRO(C), 2022) [5]

1.2.1 Manuais RTQ-C e RTQ-R

O RTQ-C, assim como o RTQ-R , contém os conceitos e definições, além de apresentar procedimentos para avaliar os níveis de eficiência de uma edificação, permitindo por meio de bônus elevação do nível de eficiência energética.

Ao fim do processo de avaliação o edifício (projeto ou construído) obtém uma etiqueta com uma classificação que varia de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). A avaliação do nível de eficiência pode ser realizada pelos seguintes métodos contidos nos Manuais:

- Método prescritivo: levanta um conjunto de características da edificação e, através de cálculos, pode-se obter o nível parcial de eficiência da envoltória da edificação, dos sistemas de iluminação e ar condicionado, e também da edificação em geral;
- Método de simulação: mais complexo e utiliza *software* que permite a incorporação de novas tecnologias em termos de materiais (construção e isolamento térmico), estratégias de condicionamento passivo e ativo, entre outras.

Na Figura 4, a seguir, estão apresentados os modelos de etiquetas da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE para os níveis de eficiência previstas nos RTQ-C e RTQ-R, respectivamente, no Brasil

Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

Edificações Residenciais - Autônomas

Figura 4 - Modelos de etiquetas de Eficiência Energética
Fonte: (PROCEL(A), 2006); (PROCEL(B), 2006)

A Etiqueta pode ser concedida nas duas fases das edificações: a de projeto e após a construção. Bem como, a Etiqueta pode ser Completa (Inclui a Classificação Geral e as Parciais da Envoltória e dos Sistemas de Iluminação e Ar condicionado).

Na fase de projeto pode-se avaliar a classificação do nível de eficiência e propor melhorias (nos materiais, orientação solar, equipamentos, etc) de modo a se obter o nível mais eficiente possível. Na fase pós construção, se a Edificação teve a Etiqueta na fase de projeto, é o momento em que se verifica

se as especificações de projeto foram adotadas e se estão de facto surtindo o efeito pretendido. É possível a avaliação para edificação já construída, onde se identifica a classificação do nível de eficiência e a partir deste se procede a um conjunto de intervenções para elevação do nível de eficiência energética, denominado de "retrofit energético".

1.2.2 Roteiro para obtenção da Etiqueta PBE Edifica

A emissão da Etiqueta de Eficiência Energética do PBE é feita por um Organismo de Inspeção Acreditado - OIA (INMETRO(D), 2024)], que realiza as atividades necessárias para a avaliação da edificação e respectiva emissão de Etiqueta de Eficiência Energética (ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia). Um OIA constitui-se de uma Empresa (pessoa Jurídica) com o reconhecimento formal da Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro – Cgcre (INMETRO(E), 2024).

O processo de etiquetagem PROCEL(C) (2006) constitui-se de duas etapas, sendo a primeira a de "Inspeção de Projeto da Edificação", realizada a partir do projeto da edificação determinando o nível de eficiência energética. A segunda etapa é a de "Inspeção da Edificação Construída", onde se confere que os itens definidos no projeto foram de facto implementados de modo a confirmar o nível de eficiência obtido no projeto.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 BASE DE DADOS DO CERTIFICADO ENERGÉTICO - SCE

O Sistema de Certificação de os Edifícios (SCE) disponibiliza um conjunto de informações sobre os Certificados Energéticos registrados em sua base de dados, denominada "Estatística do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios" (SCE(B), 2024). Nesta base de dados pode-se obter todas as informações sobre a certificação desde 2014. Estas informações estão contidas em arquivos de formato CVS (*comma value separated* ou valores separados por vírgulas) com as seguintes informações:

- Mês de Emissão: 1 a 12;
- Região, NUTS III, Distrito, Concelho
- Tipo de Doc./Contexto: Projeto Edifícios Novos, Projeto Renovação Edifícios, Edifícios Concluídos Novos, Edifícios Existentes
- Tipo de Edifício: Habitação, Serviços
- Classe Energética: A+, A, B, B-, C, D, E, F
- Total de Emissões CO_2: ton/ano
- Área Média Útil de Pavimento: em m^2
- Total de Certificados Emitidos: unidades

A base de dados é de acesso público e a partir das informações contidas na base de dados pode-se realizar a organização e compilação da quantidade de Certificados Energéticos emitidos ao longo dos anos.

Também na base de dados pode-se fazer uma consulta sobre os peritos qualificados (SCE(C), 2024) para executar as análises de eficiência energética nas edificações. A consulta permite identificar quais são os peritos registrados em Portugal, continental e ultramarina.

2.2 BASE DE DADOS DA ETIQUETAGEM PROCEL-EDIFICA

O INMETRO disponibiliza um conjunto de informações sobre as Edificações etiquetadas e registradas no sistema por meio de Tabelas de Eficiência Energética (INMETRO(F), 2024) com os produtos aprovados no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e autorizados a ostentar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

Para o caso de Edificações, o INMETRO(G) (2024) disponibiliza o acesso às tabelas de Edificações avaliadas que constituem a listagem das Edificações avaliadas desde 2010, para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas; Edificações residenciais – Áreas Comuns; Edificações residenciais – Multifamiliares; e Edificações Residenciais – Unidade Autônoma. Estas tabelas estão no formato Excel® contendo as informações apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Informações contidas nas Tabelas de Eficiência Energética do Procel - Edifica

Avaliação na fase de Projeto e na fase da Edificação Construída	Empresa/ Grupo solicitante	
	Nome da Edificação	
	Tipo de edificação	
	Endereço da Edificação	
	Zona Bioclimática	
	Orientação principal da UH	
	Organismo responsável pela avaliação do projeto	
	Método Empregado	
	Data da Emissão	
	Classe de Eficiência	Envoltória para verão
		Envoltória para inverno
		Envoltória se refrigerada artificialmente
		Sistema de aquecimento de água
	Bonificações	
	Classificação Geral	Pontuação
		Nível
	Nº ENCEs Emitidas	

As Tabelas de Eficiência Energética são de acesso público, e conforme se observar no Quadro 1, existem muitos campos de informações, sendo necessária a filtragem das informações de interesse para se obter a quantidade de Etiquetas emitidas ao longo dos anos.

Também na base de dados estão registrados os organismos habilitados para realizar as atividades de avalição da eficiência energética das edificações.

2.3 MÉTODO PARA COMPILAÇÃO DOS CERTIFICADOS SCE E ETIQUETAS DO PROCEL EDIFICA

A metodologia adotada neste estudo consistiu em fazer uma filtragem nas bases de dados disponibilizadas pelos dois sistemas, o SCE e o Procel – Edifica, para se obter as quantidades de Certificados e Etiquetas emitidos num determinado período de vigência dos Sistemas.

Ao se obter as informações nos bancos de dados, observou-se que a quantidade de Certificados emitidos pelo SCE em 3 anos, supera em muito as emissões de Etiquetas do Procel – Edifica, no mesmo período, sendo portanto adotado como método de análise as seguintes condições de contorno para cada base de dados:

- Para os Certificados do SCE considerou- se o período de 2020 a 2023;

- Para as Etiquetas do Procel-Edifica considerou-se o período 2010 a 2023.

Este recorte diferenciado de tempo de análise foi necessário devido às quantidades de Certificados e Etiquetas emitidos entre os Sistemas que se apresentaram em patamares muito distintos, como vai ser apresentado no próximo item.

Para a obtenção dos organismos que realizaram as avaliações foi feito um levantamento na base de dados, do SCE e INMETRO, identificando a quantidade e a localidade em que atuam estes organismos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos itens subsequentes apresentam-se os resultados das compilações e análise dos Certificados emitidos no âmbito do SCE de Portugal e do PROCEL-EDIFICA do Brasil.

3.1 SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO DE EDIFÍCIOS SCE – PORTUGAL

3.1.1 Peritos qualificados no SCE

Os Peritos Qualificados são os responsáveis pela avaliação energética do edifício executando o procedimento contido no Manual SCE. Estes profissionais têm formação de nível superior em engenharia ou arquitetura, experiência profissional mínima de 5 anos. De acordo com Decreto-Lei n.º 102/2021 de 19 de novembro (DRE (A), 2020) existem duas categorias de Peritos Qualificados:

- PQ I – identifica e avalia as oportunidades e recomendações de melhoria de desempenho energético dos edifícios; emitir os pré-certificados e certificados energéticos do SCE; e apoiar os proprietários dos edifícios na implementação das oportunidades e recomendações de medidas de melhoria.
- PQ II, realiza as avaliações periódicas dos Grandes Edifícios de Comércio e Serviços (GES) Recolher e submeter, no Portal SCE, a informação sobre os consumos de energia anuais e os planos de melhoria do desempenho energético dos GES.

Atualmente existem 438 Peritos registrados em Portugal, nos Distritos e Concelhos de mesma denominação (por exemplo Distrito Lisboa, concelho Lisboa) sendo que esta quantidade pode aumentar substancialmente quando se considerar todos os Concelhos pertencentes aos respectivos distrito, visto que a os peritos se registram no SCE para atuar nos concelhos e distritos que atuam.

3.1.2 Certificados registrados no SCE

Os resultados foram compilados de SCE(B) (2024) para o período de 2020 a 2023, e para as tipologias de Edifícios de Habitação e de Comércio e Serviços. Os Quadros 1 e 2, apresentam a síntese da compilação.

Quadro 1 – Certificados Energéticos para Edifícios de Habitação emitidos de 2020 a 2023

Classe energética	2020	2021	2022	2023	Total
A+	5.901	11.240	21.464	24.748	63.353
A	28.116	31.719	39.565	45.182	144.582
B	27.043	18.588	11.807	11.935	69.373
B-	13.649	11.944	10.836	11.692	48.121
C	32.770	34.285	34.515	34.060	135.630

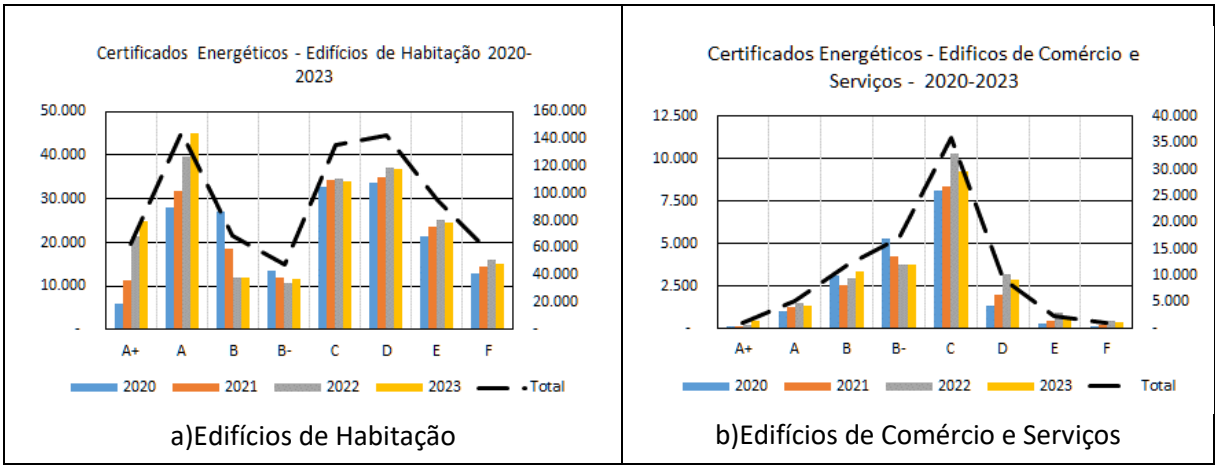
D	33.605	34.858	37.029	36.708	142.200
E	21.440	23.519	25.216	24.564	94.739
F	12.814	14.435	16.089	15.065	58.403
Total	175.338	180.588	196.521	203.954	756.401

Quadro 2 – Certificados Energéticos para Edifícios de Comércio e Serviços – 2020 a 2023.

Classe energética	2020	2021	2022	2023	Total
A+	103	164	247	476	990
A	1.029	1.273	1.548	1.369	5.219
B	3.137	2.574	2.968	3.396	12.075
B-	5.275	4.221	3.812	3.806	17.114
C	8.167	8.383	10.279	9.258	36.087
D	1.340	2.034	3.171	2.868	9.413
E	278	442	952	730	2.402
F	137	234	481	367	1.219
Total	19.466	19.325	23.458	22.270	84.519

Como se pode notar nos Quadros 1 e 2, a quantidade de Certificados emitidos em 3 anos alcança a marca de 756.401 para Edifícios de Comércios e Serviços, e de 84.519 para Edifícios de Habitação, considerando todos os tipos de Certificados para projetos de edifícios novos, projeto de renovação de edifícios, edifícios concluídos novos e edifícios existentes.

A Figura 5, a seguir, apresenta a evolução do número de Certificados emitidos para Edifícios de Habitação (a) e de Comércio e Serviços (b) no período de 2020 a 2023.



a)Edifícios de Habitação

b)Edifícios de Comércio e Serviços

Figura 5 - Certificados energéticos emitidos entre 2020 - 2023

Como se pode observar, segundo a classificação de eficiência energética, no caso de A+ a F, os resultados apresentam uma distribuição normal, para os edifícios de habitação e uma distribuição bi-modal para os edifícios de Comércio e Serviços, ensejando que para o primeiro caso, de edifícios de habitação, a tendência é que muito provavelmente os edifícios apresentam-se na média classificados como B, em termos de eficiência energética, enquanto que para os edifícios de Comércio e Serviços, pode-se identificar que uma parte obtém a classificação A e parte na classificação C e D .

3.2 SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO PROCEL-EDIFICA - BRASIL

3.2.1 Organismos de Inspeção Acreditados (OIA)

O INMETRO(D) (2024) dispõe de uma relação de OIA habilitados para a Inspeção de "Eficiência Energética de Edifícios", e ao se compilar os resultados verificou-se que existem apenas seis OIA registrados no sistema, sendo que destes quatros estão com registro cancelado a pedido e somente dois em atividade no país, sendo um na cidade de São Paulo –SP e outro em Pelotas –RS, o que é muito pouco considerando que o Brasil tem 26 Estados, mais o Distrito Federal (Capital) e 5.570 municípios.

1.1.1 Etiquetas registradas no PROCEL-EDIFICA

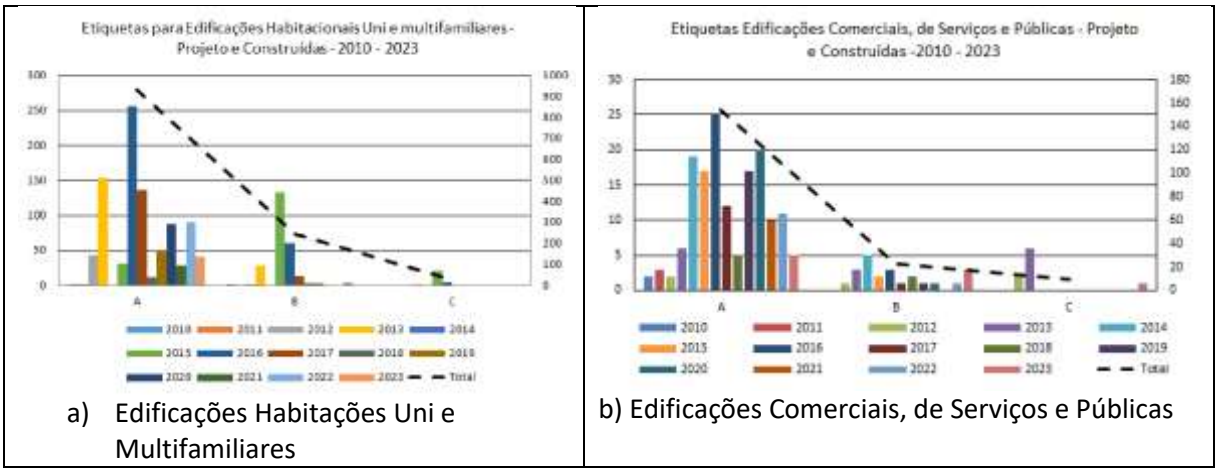
Os resultados apresentados a seguir, foram compilados das ENCEs registradas -(INMETRO(G), 2024). Foi considerado o período de 2010 a 2023, para as mesmas tipologias de edifícios. O Quadro 3, a seguir, apresenta os resultados da compilação de Etiquetas emitidas para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - Projeto e Construídas, e Edificações Habitacionais Uni e multifamiliar - Projeto e Construídas, para os níveis de Eficiência A, B e C.

Quadro 3 – Etiquetas emitidas entre 2010 e 2023 no Brasil

Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - Projeto e Construídas					Edificações Habitacionais Uni e multifamiliares - Projeto e Construídas			
Ano	A	B	C	**Total**	A	B	C	**Total**
2010	2	0	0	**2**	1	1	0	**2**
2011	3	0	0	**3**	1	0	0	**1**
2012	2	1	2	**5**	43	1	0	**44**
2013	6	3	6	**15**	154	28	1	**183**
2014	19	5	0	**24**	0	0	0	**0**
2015	17	2	0	**19**	31	133	21	**185**
2016	25	3	0	**28**	256	60	4	**320**
2017	12	1	0	**13**	137	13	0	**150**
2018	5	2	0	**7**	11	3	0	**14**
2019	17	1	0	**18**	50	3	0	**53**
2020	20	1	0	**21**	88	0	0	**88**
2021	10	0	0	**10**	28	0	0	**28**
2022	11	1	0	**12**	90	4	0	**94**
2023	5	3	1	**9**	40	0	0	**40**
Total	**154**	**23**	**9**	**186**	**930**	**246**	**26**	**1202**

Como se pode notar nos Quadro 3, a quantidade de Etiquetas emitidas em 13 anos alcança a marca de 186 para Edifícios de Comércios e Serviços, e de 1.202 para Edifícios de Habitacionais uni e multifamiliares, considerando todos os tipos de Certificados para projetos e edificações construídas.

A Figura 6, a seguir, apresenta a distribuição das etiquetas emitidas para os edifícios de habitação uni e multifamiliares e para os edifícios de Comércio, de Serviços e Públicos e Serviços considerando o período de 2020 a 2023.



a) Edificações Habitações Uni e Multifamiliares

b) Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

Figura 6 - Etiquetas emitidas entre 2010 – 2023

Como se pode observar nas Figuras 6a e 6b das Etiquetas emitidas, pode-se denotar que há uma grande tendência das Edificações apresentarem o nível A de eficiência energética. A curva do total de etiquetas emitidas, para as Classes de Eficiência A, B, C, apresenta uma distribuição "*skewness*" positiva, ou seja deformada para esquerda, tanto para edifícios uni e multifamiliar como para as edificações de Comércio, de Serviços e Públicos. Em ambos os casos a tendência é que as edificações etiquetadas estejam classificadas no nível A de eficiência energética, muito por causa da busca da maior eficiência, como forma de agregar valor ao Edifício. Pode-se também creditar ao facto de que há poucos Edifícios Etiquetados.

4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que as diferenças entre os sistemas são notórias, pois enquanto que em Portugal se deve cumprir a Lei, obrigatoriamente, no Brasil há um regulamento, que não tem força de lei, e que pode ou não ser adotado ou aplicado dependendo se há voluntários.

Além do que, enquanto a avaliação da eficiência em Portugal é feita por peritos, que por exemplo, considerando como referência apenas os peritos registrados em Distrito e Concelho de mesma nomenclatura, alcançam o número de 438 profissionais registrados e qualificados.

No Brasil a avaliação é feita por apenas 2 empresas, perante todo o conjunto edificado existente nos 26 estados e 5.570 municípios, o que demonstra insuficiência em termos de atender a demanda para a avaliação das Edificações para efeito de Etiquetagem.

As estatísticas consolidaram estas diferenças nitidamente, enquanto em Portugal nos últimos "3 anos" foram certificadas aproximadamente 654 mil Edifícios de Habitação e 74 mil Edifícios de Comércio e Serviços, no Brasil nos últimos "13 anos" foram etiquetadas 585 Edificações de Habitação e 101 de Comércio e Serviços.

Evidentemente, que a enorme diferença numérica tem como base questão estruturante dos sistemas de Certificação Energética, enquanto Portugal tem a Lei e profissionais verificando as prescrições, do outro lado o Brasil, não tem legislação, apenas regulamentos de caráter voluntário no caso das edificações, e uma quantidade ínfima de avaliadores.

Estas diferenças apontam a necessidade de, no Brasil, rever os instrumentos de eficiência energética, acoplando-os a um arcabouço legal, que estabeleça a obrigatoriedade, bem como ampliar a base de avaliadores, por meio da inclusão de uma categoria AIA no Inmetro, ou seja "Avaliador de Inspeção

Acreditado", nos mesmos moldes do procedimento para Perito Qualificado na ADENE, sendo que esta acção pode gerar benefícios em e=termos de eficiência energética, que de certa forma pode disponibilizar o montante de energia de energia economizada para beneficiar as camadas da sociedade que não tem acesso a energia, colaborando para mitigar a pobreza energética no país.

REFERÊNCIAS

ADENE . Ser mais eficiente é Simples Passos para obter o Certificado Energético. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2018/07/afM_Triptico_passos_obter_ce1.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

DGEG. Diretiva da Eficiência Energética. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/diretiva-da-eficiencia-energetica/>. Acesso em: 8 maio. 2024.

DGEG-ADENE. Manual SCE Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2024/02/Manual-SCE-05022023.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

DRE (A). Diário da República, 1.a série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS Decreto-Lei n.o 101-D/2020 de 7 de dezembro. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://files.dre.pt/1s/2020/12/23701/0002100045.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

DRE (B). Diário Da República, 2.a Série PARTE C AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA Direção-Geral De Energia E Geologia. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://files.dre.pt/2s/2021/07/126000002/0006600316.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

IEA. World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO. Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RAC.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(A). MANUAL RTQ-C - Manual Para Aplicação Do RTQ-C. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/Manual_20170411_Notas_T%C3%A9cnicas%2BCapa.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(B). MANUAL RTQ-R Manual Para Aplicação Do RTQ-R 4.2. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/Manual_de_aplica%C3%A7%C3%A3o_do_%20RTQ-R-v01.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(C). Portaria no 309, de 06 de setembro de 2022 | PBE EDIFICA. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/portariaconsolidada>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(D). Organismos Acreditados. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/organismos/resultado_consulta.asp>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(E). Coordenação-geral. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/acreditacao/cgcre/cgcre>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(F). Tabelas De Eficiência Energética — INMETRO. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica>. Acesso em: 8 maio. 2024.

INMETRO(G). Edificações. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/edificacoes>. Acesso em: 8 maio. 2024.

LOPES, A. DO C. P. et al. Energy efficiency labeling program for buildings in Brazil compared to the United States' and Portugal's. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 66, n. 66, p. 207–219, dez. 2016.

PROCEL(A). Etiqueta Nacional De Conservação De Energia (ENCE) Geral. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/documents/storedDocuments/%7BEB3DAE90-58CB-48BF-86E9-1CA876F683B0%7D/%7BAE1F89BF-F50C-40B3-80C5-7CDC9D9E8F6E%7D/C2.jpg>. Acesso em: 8 maio. 2024.

PROCEL(B). Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), de Unidade Habitacional. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/documents/storedDocuments/%7BEB3DAE90-58CB-48BF-86E9-1CA876F683B0%7D/%7B4B128A78-C336-4D81-9A4A-8A98D1F7B1C1%7D/R2.jpg>. Acesso em: 8 maio. 2024.

PROCEL(C). Etiquetagem em Edificações. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3}>. Acesso em: 8 maio. 2024.

SCE. Legislação. Disponível em: <https://www.sce.pt/legislacao/>. Acesso em: 8 maio. 2024.

SCE(A). Consumidores. Disponível em: <https://www.sce.pt/certificacao-energetica-de-edificios/consumidores/>. Acesso em: 8 maio. 2024.

SCE(B). Estatística do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios. Disponível em: <https://www.sce.pt/estatisticas/download-de-informacao-estatistica/>. Acesso em: 8 maio. 2024.

SCE(C). Pesquisa De Técnicos. Disponível em: <https://www.sce.pt/pesquisa-de-tecnicos/#pesquisa_peritos>. Acesso em: 8 maio. 2024.

UNEP. Global Status Report for Buildings and Construction - beyond foundations: Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings sector. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>. Acesso em: 8 maio. 2024.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2024.

UNITED NATIONS. Global Population Growth and Sustainable Development. New York: United Nations Publication, 2021. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2022_global_population_growth.pdf>. Acesso em: 9 maio. 2024.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

'AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DAS CONSTRUÇÕES COM TERRA: ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE AICV PARA O CONTEXTO BRASILEIRO

Beatriz Temtemples de Carvalho[a]; Marcos Martinez Silvoso[b], Reila Vargas Velasco[c]

[a] (Programa de Pós-graduação em Arquitetura - PROARQ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Avenida Pedro Calmon, 550, 27941-901, Cidade Universitária - RJ, Brasil) beatriz.carvalho@fau.ufrj.br

[b] (Programa de Pós-graduação em Arquitetura - PROARQ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Avenida Pedro Calmon, 550, 27941-901, Cidade Universitária - RJ, Brasil) silvoso@fau.ufrj.br

[c] (Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – FAU/UFRJ, Avenida Pedro Calmon, 550, 27941-901, Cidade Universitária - RJ, Brasil), reila@fau.ufrj.br

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método avaliativo que quantifica e permite a análise do impacto ambiental de produtos e/ou processos durante o ciclo de vida. A ACV é composta por quatro fases, quais sejam: definição do objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação. A AICV visa a compreensão da magnitude e relevância dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto com base nos dados colecionados no ICV. Nesse contexto, é importante examinar como diferentes escolhas realizadas tanto na elaboração do escopo quando na fase de ICV, afetam os resultados finais da ACV. Sendo assim, é proposto nesse artigo a realização de uma análise de sensibilidade dos resultados de um estudo comparativo de ACV aplicado a sistemas de bloco de terra comprimida. Para isso, um mesmo escopo será aplicado aos métodos (a) IMPACTWorld+, (b) ILCD, (c) ReCiPe e (d) EN15804 que possuem abordagem midpoint utilizando dados do Ecoinvent. Apesar das diferenças na magnitude do impacto, todas as metodologias apresentaram a mesma tendência de crescimento. Dentre os cinco cenários modelados, o cenário 1 apresenta sempre o menor impacto em relação aos outros quatro, sendo o cenário 5 o mais impactante. A principal conclusão dessa discussão é que os métodos existentes não conseguem contemplar, em sua totalidade, a realidade do contexto brasileiro, o implica na adoção de métodos internacionais. Dessa forma, faz-se necessário a busca por métodos que, de fato, retratem o contexto brasileiro.

Palavras-chave: arquitetura com terra, avaliação do ciclo de vida, ACV, método AICV

1 INTRODUÇÃO

O aumento da conscientização sobre a relevância da preservação ambiental e os potenciais impactos relacionados a produção e consumo de produtos tem aumentado o interesse por método de quantificação e gerenciamento desses impactos. Umas das ferramentas em progresso para esse propósito é a metodologia proposta pela ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), que são utilizadas para avaliar diversos impactos ambientais associados a um produto.

Os documentos normativos mencionados acima versam sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) propõe um método de quantificação e avaliação dos potenciais impactos ambientais de um produto ou processo durante o seu ciclo de vida (ABNT, 2009a). Nos últimos anos, a ACV vem sendo apontada como uma das ferramentas mais utilizadas internacionalmente, podendo, inclusive, ser aplicada aos produtos ou processos no âmbito da construção civil. O método da ACV pode ser implementado em qualquer etapa do ciclo de vida de um produto e, conforme é apontado por Mateus, Fernandes e Teixeira (2016), quando aplicada às fases iniciais, a metodologia apresenta resultados de maior importância, sendo possível avaliar quais são os processos com maior impacto e de que forma, possíveis alterações, podem contribuir para melhorar o desempenho ambiental do produto.

No contexto da construção civil, estima-se que as emissões provenientes da fabricação de concreto, aço e alumínio, materiais bastante utilizados na construção de edifícios, representem mais de 6% das emissões globais e outros materiais, como tijolos e vidro, representem de 2% a 4% das emissões globais. Desse modo, um edifício convencional que apresenta uma vida útil estimada em 50 anos, chega a incorporar, aos materiais de construção, de 6% a 20% da energia total de todo seu ciclo de vida (MATEUS, FERNANDES e TEIXEIRA, 2016). À vista disso, o potencial de mitigação do setor da construção civil é considerável, agregando à arquitetura um papel fundamental nas metas de descarbonização. A quantificação das emissões de carbono incorporado é um caminho importante no contexto do desenvolvimento sustentável, sendo a quantificação dos danos ambientais um fator necessário à compreensão do impacto gerado pelo setor das construções.

No entanto, a diminuição dos impactos ambientais das construções não se resume a quantificação de seus impactos. Segundo Mateus *et al.* (2007), desenvolver um bom projeto de arquitetura, escolher materiais naturais e a adotar de processos construtivos tradicionais pode reduzir significativamente a energia incorporada de um edifício. Dessa forma, as técnicas de construção tradicionais como a taipa de pilão e adobe surgem como um respiro diante desse cenário caótico de crises ambientais. Essas técnicas se destacam não somente pela simplicidade do método executivo, mas, principalmente, por se tratar de técnicas construtivas que utilizam a terra como material de construção. O resgate do saber-fazer das técnicas tradicionais a incorporação da terra como matéria-prima representam uma alternativa para a mitigação dos impactos ambientais gerados pela construção civil no contexto brasileiro.

Nos últimos anos, o Ministério de Minas e Energia do Brasil, em um acordo de cooperação técnica com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, vem desenvolvendo o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) que permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da ACV. Já foram publicados diversos relatórios de coletas de dados para diferentes produtos tais como, agregados, concreto, aço dentre outros, mas ainda não há algum que verse sobre a terra como material de construção.

Ainda que consolidada como importante ferramenta de avaliação de desempenho ambiental, a metodologia da ACV ainda é pouco aplicada nos estudos da produção da arquitetura com terra, principalmente por não existirem dados coletados e organizados nos principais bancos de dados. Portanto, o objetivo desse trabalho é realizar uma análise de sensibilidade para compreender se a utilização de diferentes métodos de AICV pode levar a resultados de impactos distintos, influenciando assim na tomada de decisão por partes dos profissionais.

2 MÉTODO

O objetivo desse trabalho é investigar a implicação da adoção de diferentes métodos de AICV nos resultados da ACV para produção (A1-A3) do bloco de terra comprimida (BTC) sem função estrutural em diferentes cenários de produção. Conforme já mencionado, ainda não há um relatório de coleta de dados em bases como Ecoinvent ou SIDAC, que verse sobre a produção do BTC nem sobre outro produto que utilize a terra como material de construção. Dessa forma, para tornar possível a elaboração de um escopo de ACV para o estudo em questão, foi necessário levantar dados primários referente aos processos de produção do BTC. Esses dados foram levantados e organizados seguindo o método de coleta de dados de inventário previstos no SIDAC (BELIZARIO-SILVA, 2022). Para isso, foi necessário estabelecer algumas etapas metodológicas para o desenvolvimento dessa investigação

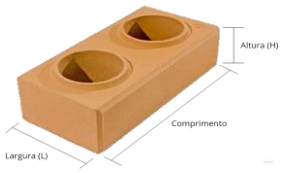
que está dividida em três partes, a saber: (A) coleta de dados de inventário, (B) quantificação do impacto ambiental do BTC utilizando diferentes métodos de AICV e (C) análise comparativa dos diferentes métodos de AICV. (A) A coleta de dados consiste na apresentação dos dados do produto e do fluxograma do processo elementar da produção do BTC, na definição das fronteiras do sistema e cenários de produção, na descrição dos processos elementares e no inventário do processo elementar. (B) A quantificação do impacto ambiental do BTC é realizada seguindo a metodologia de ACV, em conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT, 2009a) e ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações (ABNT, 2009b). Os métodos empregados foram (a) IMPACTWorld+, (b) ILCD, (c) ReCiPe e (d) EN15804, e o software utilizado foi o SIMAPRO. (C) A comparação dos diferentes métodos de AICV foi realizada aplicando-os ao mesmo escopo de ACV, sendo os dados obtidos normalizados considerando sempre como valor de referência o resultado com maior impacto ambiental para as categoria de impacto passíveis de comparação. A categoria Mudanças Climáticas recebeu um destaque considerando sua importância no contexto das discussões acerca da sustentabilidade.

2.1 COLETA DE DADOS DE INVENTÁRIO

2.1.1 DESCRIÇÃO DO PRODUTO

A coleta de dados foi realizada considerando dados de literatura. Os BTC devem atender aos requisitos da NBR 8491 – Tijolo de solo-cimento - Requisitos (ABNT, 2012b) que define o produto como um componente de alvenaria constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água em proporções que permitam atender aos requisitos previstos no documento normativo supracitado. A norma ainda prevê que o BTC deve apresentar uma altura (H) que seja menor que sua largura (L), podendo ser maciço ou furado. Com relação ao desempenho mecânico, o BTC não pode apresentar desempenho inferior a 2 MPa e sua absorção não pode ser maior do que 20% aos 7 dias. As características do BTC estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos blocos de terra comprimida

Unidade Funcional				
	Largura	Comprimento	Altura (H)	Resistência
	12,5 cm	25 cm	6,25 cm	2 MPa

2.1.2 DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO SISTEMA E CENÁRIOS DE PRODUÇÃO

De acordo com a ABNT NBR 14040 (ABNT, 2009a), fronteiras do sistema é conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto, ou seja, refere-se a quais processos, fluxos de materiais e energias que estão inclusas no estudo. Definiu-se que o escopo desse estudo inclui as fases de extração de matéria prima (A1) até a produção do produto fábrica (A3).

São admitidas para as fronteiras do sistema estabelecidas acima, cinco cenários diferentes, conforme descritos a seguir e apresentados na Figura 1:

(a) Cenário 1: reproduz as condições necessárias para a produção dos BTC no canteiro de obras, levando em consideração que as etapas extração (A1) e produção (A3) são realizadas manualmente e que não existe a etapa de transporte de matéria prima (A2) já que o solo utilizado para a produção dos BTC é retirado do próprio terreno.

(b) Cenário 2: reproduz as condições necessárias para a produção dos BTC no canteiro de obras, levando em consideração que a etapa de extração (A1) é realizada de forma mecanizada, a etapa de produção (A3) é realizada manualmente e que não existe a etapa de transporte de matéria prima (A2) uma vez que o solo utilizado para a produção dos BTC é retirado do próprio terreno.

(c) Cenário 3: reproduz as condições necessárias para a produção dos BTC no canteiro de obras, levando em consideração que a etapa de extração (A1) é realizada de forma manual, a etapa de produção (A3) é realizada de forma mecanizada e que não existe a etapa de transporte de matéria prima (A2) uma vez que o solo utilizado para a produção dos BTC é retirado do próprio terreno.

(d) Cenário 4: reproduz as condições necessárias para a produção dos BTC no canteiro de obras, levando em consideração que a etapa de extração (A1) e produção (A3) são realizadas de forma mecanizada e que não existe a etapa de transporte de matéria prima (A2) uma vez que o solo utilizado para a produção dos BTC é retirado do próprio terreno.

(e) Cenário 5: reproduz as condições necessárias para a produção dos BTC na indústria, levando em consideração que a etapa de extração (A1) e produção (A3) são realizadas de forma mecanizada e a etapa de transporte de matéria prima até a fábrica (A2) é realizada por um caminhão com capacidade de carga de 3,5T a 7,0T. Não foram consideradas as etapas de transporte até o canteiro de obras (A4) pois as fronteiras do sistema foram definidas em A1 até A3.

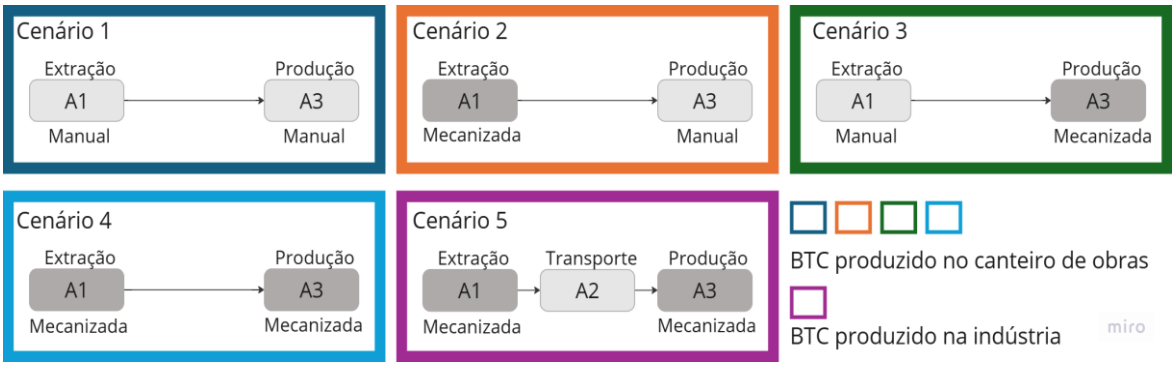


Figura 1 - Cenários considerados para a ACV

2.1.3 FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS ELEMENTARES

O fluxograma dos processos elementares associados à produção dos blocos de terra comprimida para os cenários de produção no canteiro de obras e para o cenário de produção na indústria é apresentado na Figura 2.

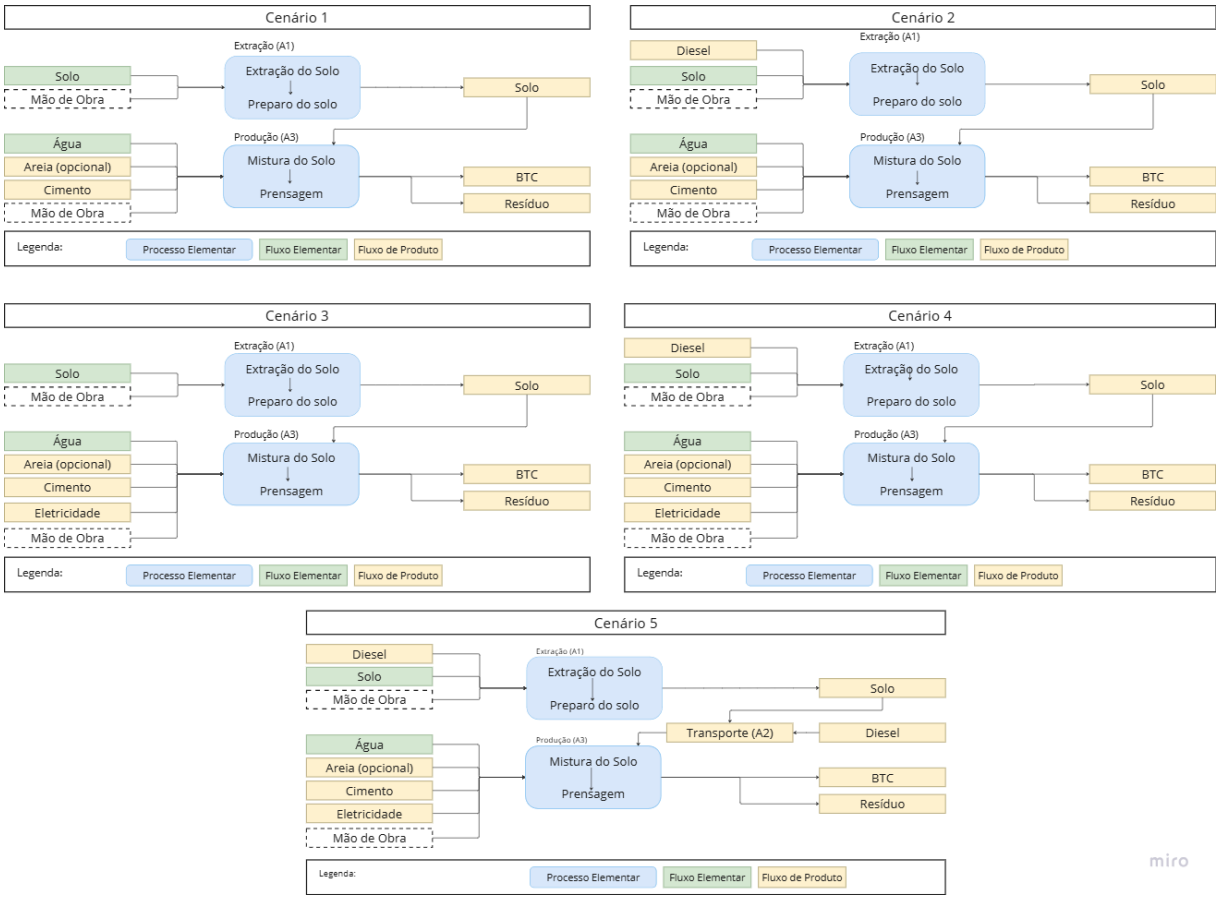


Figura 2 - Fluxograma dos processos elementares - Cenário 1, 2, 3, 4 e 5

2.1.4 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES

Aqui serão apresentados os processos elementares necessários à produção do BTC. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT, 2009a), o processo elementar é o menor elemento considerado na AICV para o qual dados de entrada e saída são quantificados.

EXTRAÇÃO (A1): Para a etapa de extração foram consideradas um conjunto de atividades que, após realizadas, geram como fluxo de produto o solo já preparado para ser utilizado na fabricação do BTC. A atividades são (A) decapeamento, (B) extração, (C) destorramento, (D) peneiramento e (E) quarteamento, que serão apresentadas a seguir.

O (A) decapeamento consiste na remoção da vegetação e da camada superficial do solo uma vez que a existência de matéria orgânica pode prejudicar a hidratação do cimento (ABNT, 2012a). Recomenda-se o descarte de 20 cm a 30 cm da camada superficial do solo para, então, realizar a extração do material. O processo de (B) extração pode acontecer manualmente, quando são utilizadas ferramentas manuais como "Pá Cortadeira Vanga de Bico com Cabo Longo" não sendo atribuídos custos energéticos a esse processo, e mecanicamente, quando são utilizados equipamentos como retroescavadeiras sendo o custo energético calculado a partir do tempo de uso no equipamento e volume de material extraído. Recomenda-se evitar a extração do material em buracos pequenos e profundos pois o solo apresenta características diferentes de acordo com sua profundidade. Isto significa que, se a extração for realizada em uma área reduzida e profunda, a probabilidade de se obter um material mais heterogêneo é maior, o que implica em maiores desafios no preparo e estabilização do material. Para reduzir a heterogeneidade, recomenda-se limitar a profundidade de escavação e priorizar a intervenção em uma área maior do terreno.

Em seguida, é necessário realizar o preparado do solo antes de ele ser prensado para a produção dos blocos. A preparação do solo começa com o (C) destorroamento que consiste no processo de desagregação dos grãos de argila aglomerada, areia e pedregulhos. O destorroamento tem como finalidade facilitar o processo de peneiramento posto que auxilia na identificação das frações do solo, distinguindo, por exemplo, o que é pedregulho e o que é argila aglomerada. Quando esse processo não é realizado antes do peneiramento, as frações finas que estão aglomeradas porque estão úmidas, acabam sendo descartadas já que ficam retidas na peneira. O descarte das frações finas como a argila, gera problemas na etapa de estabilização dos blocos. De acordo com NBR 10833 (ABNT, 2012a), o processo de destorroamento pode ser realizado manualmente sem atribuição de custos energéticos ou mecanicamente utilizando trituradores elétricos sendo atribuído custos energéticos de acordo com tempo de uso no equipamento e o volume de solo destorroado.

Em seguida é realizado o (D) peneiramento que consiste no processo de separação das frações do solo utilizando uma peneira. Segundo a ABNT NBR 10833 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica (ABNT, 2012a), o solo para fabricação de BTC deve apresentar as seguintes características: (i) 100% do material passante na peneira com abertura de malha de 4,75mm e (ii) 10% a 50% de material passante na peneira com abertura de malha de 75 µm de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). O material retido deve ser descartado pois prejudica o processo de estabilização mecânica. O peneiramento pode ser realizado manualmente, sem atribuição de custos energéticos, ou mecanicamente, atribuindo custos energéticos de acordo com tempo de uso no equipamento e o volume de solo peneirado. O (E) quarteamento deve seguir os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004) que consiste no processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado. Não são atribuídos custos energéticos para essa etapa.

PRODUÇÃO (A3): A etapa de produção do BTC é composta pelas atividades de (F) mistura, (G) prensagem e (H) cura. A (F) mistura deve ser realizada seguindo as atividades previstas na ABNT NBR 10833 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento (ABNT, 2012a). A norma prevê que o solo preparado deve ser depositado em uma masseira e, a ele, deve ser adicionado o estabilizante químico. Caso o solo necessite de alguma correção granulométrica, é nesse momento que deve ser adicionada areia ao solo. É importante garantir a homogeneidade da mistura seca antes de adicionar água ao sistema. Sendo assim, uma vez homogênea, é adicionada água no material seco com o auxílio de um regador ou ferramenta similar enquanto é realizada a mistura de todos os materiais com o auxílio de uma enxada ou pá. A (G) prensagem deve ser realizada seguindo as atividades previstas na ABNT NBR 10833 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento (ABNT, 2012a). De acordo com a norma, é possível realizar a prensagem do BTC de forma (i) manual ou (ii) mecânica. Após a prensagem do

BTC é necessário garantir a (H) cura adequada para que BTC apresente a resistência esperada, durante os sete primeiros dias após a prensagem, é importante manter o BTC úmido e recomenda-se sua utilização somente 14 dias após a produção. Para a prensagem do BTC, podem ser utilizadas diferentes modelos de prensas, sendo que as diferenças de cada equipamento influenciam, principalmente, na qualidade do BTC e na escala de produção. Considerando isso, esse trabalho limitou seu escopo de investigação na produção do BTC utilizando a prensa manual e prensa hidráulica.

2.1.5 MÉTODO DE CÁLCULO

A seguir, são apresentadas as considerações de cálculo para cada um dos fluxos elementares, que representam entradas da natureza ou saídas para a natureza, sem nenhuma outra ação antropogênica envolvida, e fluxos de produtos, que correspondem a todos os produtos que passam por algum tipo de ação antropogênica para beneficiamento ou tratamento, que compõe os processos elementares da produção de BTC. De modo geral, os fluxos foram calculados em kg (quilograma), com exceção do transporte que foi quantificado em tkm (tonelada-quilômetro) e da eletricidade que foi quantificada em kWh (quilo-watt-hora). Para a quantificação dos fluxos, tomou-se como base o consumo do solo, areia e cimento apresentado por Carvalho, Silvoso e Alberto (2021) e apresentados na Tabela 2. Destaca-se que os autores optaram por realizar a correção granulométrica do solo, a partir da adição de 30% de areia em relação ao volume de solo utilizado para a produção de 1 BTC.

Tabela 2 – Consumo de material para produção de 1 BTC – solo-cimento – traço 1:10

Fluxo Elementar		
Solo	kg	1,38
Areia	kg	0,56
Água	L	0,20
Fluxo de Produto		
Cimento CP II	kg	0,17

ÁGUA (KG): A quantidade de água se refere especificamente à água que entra na composição da mistura para produção do BTC e não inclui o consumo de água referente às atividades de limpeza dos equipamentos e ferramentas. Ressalta-se que o consumo da água para a produção depende da composição do solo, do tipo e da quantidade de estabilizante que é adicionado à mistura. Nesse sentido, a estimativa do consumo de água para a produção de um BTC foi realizada a partir de dados de literatura sendo considerado um consumo de 10% de água (kg) em relação ao consumo de solo (kg). Dessa forma, se o consumo de solo para a produção de um BTC corresponde a 2kg, o consumo de água será de 200g, a partir da massa específica, é possível inferir que o consumo de água corresponde a 0,2 litros.

TRANSPORTE (TKM): O transporte é considerado um fluxo de produto e seu consumo é calculado a partir da distância percorrida e a quantidade de carga transportada. Tendo em vista que são analisados aqui, cinco diferentes cenários, cabe ressaltar que o custo energético de transporte foi considerado apenas para o cenário 5 que investiga os custos de energia para a produção de um BTC em que a extração e produção é mecanizada. Portanto, foi adotado um valor genérico, que contemplasse um cenário desfavorável (pior cenário), correspondente a 50km de distância entre jazida de solo e a indústria de BTC.

Além disso, considerou-se que o tipo de caminhão utilizado no transporte do material apresenta uma capacidade de transportar de 3,5 ton a 7,5 ton de material. Sendo a distância percorrida equivalente a 50km, o custo do transporte para a produção de um BTC corresponde a 0,07tkm.

ELETRICIDADE (KWH): O consumo de energia elétrica foi calculado a partir do tempo de uso do equipamento em relação a capacidade de produção (A3), tendo em vista os equipamentos elétricos utilizados nos processos elementares já apresentados. Dessa forma, para os cenários 2, 4 e 5 que considera a realização da etapa de produção (A3) de forma mecanizada, foi calculada a produtividade de uma prensa hidráulica e um triturador considerando o método a seguir:

Foi escolhido um modelo de triturador elétrico que apresenta uma potência de 0,735kW e que tem a capacidade de beneficiar 2,5m³ de terra em até 1 hora. Dessa forma, o consumo de energia necessário para triturar 1m³ corresponde a 0,294kWh. Sendo o consumo de solo para produção de um BTC o equivalente a 0,00096m³, o consumo de energia para a produção de um BTC corresponde a 0,0003kWh.

Para o cálculo do consumo elétrico da prensa hidráulica, foi escolhido um equipamento que apresenta uma potência correspondente a 2,2kWh e que tem a capacidade de produzir 250 BTC em 1 hora. Dessa forma, o consumo de energia necessário para produzir um BTC corresponde, aproximadamente, a 0,009kWh.

DIESEL (KG): O fluxo de produto do diesel refere-se ao consumo de combustível necessário para a realização da etapa de extração (A1) de forma mecanizada, que ocorre no cenário 2, cenário 4 e cenário 5. Portanto, deve-se calcular o consumo de combustível necessário ao processo elementar de extração (A1) do solo durante o período de uma hora, atividade realizada por uma escavadeira pequena. O consumo específico de combustível (l/kWh) para escavadeiras compactas varia de 0,2 a 0,3 litros por quilowatt-hora (l/kWh). A escavadeira compacta utilizada como equipamento de extração padrão para esse estudo, apresenta uma potência líquida do motor de 17,6 kW. O consumo de combustível por hora pode ser estimado a partir da seguinte equação:

$$Consumo\ de\ Combustível\ por\ Hora = Potência\ do\ Motor\ (kW)\ x\ Consumo\ Específico\ do\ Motor\ (L/kWh)$$

Sendo a potência do motor da escavadeira compacta correspondente a 17,6 kW e o consumo específico do motor correspondente a 0,25 l/kWh (valor médio), tem-se que o consumo de combustível é de 4,4 L/hora.

A definição da produtividade da escavadeira compacta, foi realizada a partir da seguinte relação:

$$Produtividade = Capacidade\ do\ Balde\ x\ Ciclos\ por\ Hora\ x\ Eficiência\ de\ Operação$$

Considerando que a capacidade do balde correspondente a 0,2m³, no período de uma hora, realiza 12 ciclos de trabalho, sendo a eficiência do operador do equipamento de 70% aproximadamente, tem-se que a produtividade da escavadeira compacta é 1,68 m³/h. Dessa forma, é possível inferir que o consumo de diesel para a extração de 1,68m³ de solo corresponde a 4,4L.

Nesse momento, cabe quantificar a quantidade de combustível necessário para a produção de um BTC. Considerando que, para a produção de um BTC, o consumo de solo corresponde a 1,38kg, a partir da massa específica do solo estimado em 1440 kg/m³ é possível inferir que o volume de solo para a produção de um BTC corresponde a 0,00096m³ e o consumo de combustível para a produção de um BTC corresponde a 0,0025 litros.

2.1.6 INVENTÁRIO DO PROCESSO ELEMENTAR

O objetivo do inventário de processo elementar é fornecer a base de dados detalhada e precisa que permita a análise do impacto ambiental do sistema do produto em estudo. É nessa etapa que são documentados e quantificados todos os fluxos de entrada e saída associados a um sistema de produto. Para esse estudo, os dados aqui apresentados e quantificados referem-se ao sistema do produto descrito no item 2.1. As tabelas a seguir apresentam os inventários elaborados.

Tabela 3 - Produção de bloco de terra comprimida – solo-cimento – traço 1:10

Fluxo	Unid.	Fluxo de Inventário - Quantidade (média ponderada)				
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Entradas						
Solo	kg	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Areia	kg	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Cimento CP II	kg	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Água	kg	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Eletricidade	KWh	-	-	0,009+0,0003	0,009+0,0003	0,009+0,0003
Diesel*	kg	-	0,00021	-	0,00021	0,00021
Transporte**	tkm	-	-	-	-	0,07
Saídas						
BTC	Unid.	1	1	1	1	1

** densidade do diesel 840 kg/m³*

*** distância de transporte do solo até a fábrica – 50km*

2.2 QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

A quantificação dos impactos ambientais referentes a produção (A1-A3) do BTC, foi realizada utilizando o software SIMAPRO v.9.1 para a modelagem do produto nos cinco cenários propostos. Para a elaboração desses modelos foi utilizada a base de dados do ECOINVENT v.3.6. Cabe aqui alguns esclarecimentos acerta da escolha dos *dataset* utilizados para representar os fluxos de produtos e fluxos elementares da produção do BTC nos diferentes cenários.

A primeira consideração é sobre a escolha da utilização da categoria "cut-off" para os materiais que compõem a cadeia de produção do BTC. O método "cut-off" refere-se a uma abordagem de alocação de fluxo e impactos ambientais em que a responsabilidade do impacto ambiental do resíduo, que é gerado pela cadeia produtiva do produto em questão, não é atribuída ao produto original, mas sim ao novo produto que será feito com o resíduo reciclado. Tendo em vista que esse trabalho busca a quantificação dos impactos apenas da etapa de produção do BTC, não faria sentido a adoção de uma abordagem que prevê a compensação dos impactos ambientais

gerados pelo resíduo. Uma hipótese em que essa escolha seria válida é se estivesse sendo feito aqui uma avaliação de todo ciclo de vida do BTC, desde a extração de matéria-prima (A1) até descarte (C4) e reuso, reciclagem ou recuperação (D).

A segunda consideração é sobre a escolha do "system level process" como nível de detalhamento mais adequado para a modelagem dos processos e fluxos do ciclo de vida do produto. Esse modelo de agregação de processos trabalha com a consolidação de várias etapas em um único processo que, apesar de levar a uma menor precisão dos dados, simplifica os métodos de cálculo. Portanto, a adoção de um nível de detalhamento mais simplificado facilita a modelagem e a análise pois consolida várias atividades em uma única descrição de processo, reduzindo assim o tempo necessário para realizar a modelagem.

Outra consideração importante a se fazer é referente a modelagem o material "solo" dentro do software SIMAPRO. No banco de dados utilizado, não existe o material "solo" e, portanto, foi necessário utilizar os dados de outros materiais de forma a compor um material que representasse o "solo". Dessa forma, os dados da argila e areia foram utilizados para a modelagem no SIMAPRO. O solo utilizado nessa pesquisa apresenta a mesma granulometria do solo utilizado no trabalho de Carvalho (2019) o qual é composto por 34% de argila, 25% de silte e 41% de areia. Outro problema encontrado é a inexistência de dados de inventário para o silte, sendo necessário a utilização de dados da argila para representar o silte na modelagem no SIMAPRO. Na Tabela 4, estão apresentadas as quantidades e os *dataset* utilizados na modelagem do solo. Cabe, também, destacar que unidade funcional adotada para a modelagem dos produtos nos diferentes cenários é o "BTC" com as dimensões apresentadas na Tabela 1. Os diferentes cenários consomem, além do solo, outros materiais conforme apresentado na Tabela 3, e para a modelagem de cada cenário foram utilizados os *dataset* apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Dados para a modelagem do material solo no SIMAPRO

Composição real do solo				Entradas utilizadas no SIMPARO	
Solo	1,38 kg	Argila	0,47 kg	0,82 kg	Clay {RoW}| market for clay | Cut-off, S
		Silte	0,35 kg		
		Areia	0,56 kg	1,12 kg	Sand {BR}| market for sand | Cut-off, S
Correção Granulométrica	0,56 kg	Areia	0,56 kg		

Tabela 5 - Entradas utilizados na modelagem da ACV

Cimento Portland	Cement, Portland {BR}| market for cement, Portland | Cut-off, S
Argila	Clay {RoW}| market for clay | Cut-off, S
Areia	Sand {BR}| market for sand | Cut-off, S
Água	Water, decarbonised {BR}| market for water, decarbonised | Cut-off, S
Eletricidade	Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid} | market for electricity, low voltage | Conseq, S
Combustível	Diesel {RoW}| market for | Cut-off, S
Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO1 {BR} | Cut-off, S

2.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DIFERENTES MÉTODOS DE AICV

A realização de uma análise de sensibilidade contribui para a compreensão do impacto de variáveis no resultado final de um estudo. Nesse trabalho, investigou-se a variação dos resultados de uma ACV a partir da adoção de quatro métodos de AICV, a saber IMPACTWorld+, ILCD, ReCiPe e EN15804.

O primeiro critério adotado para a escolha dos métodos foi métodos de abordagem *midpoint* por abarcarem indicadores de categorias de impacto de nível intermediário, isto é, são métodos que apresentam uma abordagem orientada ao problema. Essa escolha foi norteada pela tentativa de evitar as aproximações previstas pelos métodos de abordagem *endpoint* que, apesar de apresentarem resultados mais fácies de interpretar apresentam, também, resultados agregados e, portanto, mais imprecisos. Outro critério foi a escolha por métodos que tivessem uma abrangência de aplicação europeia ou global uma vez que métodos com abrangências restritas a um único país poderiam retratar realidades diametralmente opostas a realidade brasileira. Os métodos escolhidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Métodos de AICV escolhidos

Métodos	País	Abordagem	Abrangência de Aplicação
ILCD 2011	Europa	Midpoint	Europa
IMPACT World+ 2019	Canadá, Estados Unidos, Dinamarca, Suíça e França	Midpoint	Global
EN 15804 2019	Europa	Midpoint	Europa
ReCiPe 2016	Holanda	Midpoint	Global e Europa

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de sensibilidade foi direcionada para a comparação dos resultados de determinadas categorias de impacto, desde que estivessem contempladas pelos quatro métodos escolhidos e apresentassem a mesma unidade de quantificação dos impactos, sendo elas, (a) Mudanças Climáticas, (b) Destruição da Camada de Ozônio, (c) Eutrofização Marinha. Devido a sua importância no contexto dos impactos ambientais, também foram apresentados os dados de algumas categorias de impactos tais como (d) Eutrofização de Água Potável, (e) Ecotoxicidade de Água Potável, (f) Acidificação, (g) Eutrofização Terrestre e (h) Uso de Energia Fóssil e Nuclear, apesar de não estarem contempladas por todos os métodos. Algumas categorias consideradas relevantes, apesar de serem contempladas por todos os métodos de AICV, apresentam unidades de quantificação diferentes e não puderam ser comparadas, entretanto seus dados absolutos encontram-se apresentados na tabela, como é o caso da categoria, (i) Esgotamento dos Recursos Hídricos, e (j) Mudança e Uso do Solo. Com relação as categorias de impacto (g) Acidificação e (h) Eutrofização Terrestre é necessário um esclarecimento acerca das unidades de medida pois, ainda que exista uma diferença de unidade entre os métodos qual seja, mol e mol de carga, os valores são passiveis de comparação, já que é possível adotar o procedimento de transformação de unidades, os dados apresentados na tabela já estão convertidos.

A Tabela 7 mostra o resultado da análise de sensibilidade comparando os métodos de AICV a partir dos dados normalizados, sempre considerando como valor de referência o resultado com maior impacto ambiental para em cada categoria de impacto. A análise foi realizada para a mesma unidade funcional de “um bloco de BTC”.

De acordo com os resultados apresentados, é possível observar que apesar de existirem diferenças na magnitude dos impactos, todas as metodologias apresentaram a mesma tendência de crescimento. Dentre os cinco cenários modelados, em todas as categorias de impacto comparáveis, o Cenário 1 apresenta sempre o menor impacto ambiental enquanto o Cenário 5 apresenta sempre o maior. Provavelmente isso ocorre porque não são atribuídos custos energéticos aos processos elementares no Cenário 1, já que corresponde a força de trabalho humana, e no Cenário 5 os custos energéticos dos processos elementares apresentam uma alta energia incorporada já que são processos que dependem de energia elétrica e diesel. O cenário que apresenta o maior impacto ambiental permanece o mesmo em todos as metodologias de AICV analisadas.

Com relação a categoria (a) Mudanças Climáticas, foi possível observar que a diferença dos dados obtidos pelos métodos IMPACTWorld+ e ReCiPe corresponde a 0,02%, sendo considerada irrelevante. O método EN15804, apresentou o maior resultado para todos os cenários. Na categoria (b) Destruição da Camada de Ozônio, observou-se que o método ILCD apresentou o menor resultado enquanto o método ReCiPe apresentou o maior resultado, ambos para todos os cenários. Ainda com relação a categoria (b) Destruição da Camada de Ozônio, observa-se que os dados obtidos para o ReCiPe foram destoantes em comparação aos outros três métodos, para todos os cenários, sendo a variação entre os dados máximos e mínimos crescente a cada mudança de cenário, do 1 ao 5.

Na categoria (c) Eutrofização Marinha, a diferença entre os maiores e menores resultados foi expressiva, variando de 0,0099 a 0,8846, no cenário 1 e 0.0187 e 1.0000, no cenário 5. Os maiores valores correspondem aos métodos ILCD e EN15804 que apresentaram os mesmos resultados para todos os cenários. Na categoria (d) Eutrofização de Água Potável, foi possível comparar apenas os dados dos métodos ILCD, EN15804 e ReCiPe. Em todos os cenários, os métodos ILCD e EN15804 apresentaram valores bem próximos, sendo também os menores valores comparados àqueles obtidos pelo método ReCiPe. Similarmente, acontece com a categoria (e) Ecotoxicidade de Água Potável, em que foi possível comparar apenas os dados dos métodos ILCD, IMPACTWorld+ e EN15804, sendo os resultados dos métodos ILDC e EN15804, bem próximo, porém, ambos, bem distantes dos valores obtidos pelo método IMPACTWorld+.

Para as categorias (f) Acidificação, (g) Eutrofização Terrestre e (h) Uso de Energia Fóssil e Nuclear, em que foi possível comparar apenas dois métodos, essa análise comparativa fica prejudicada pois é dificultado o procedimento de identificação do método destoante. No entanto, para a categoria (g) Eutrofização Terrestre, os valores obtidos, em todos os cenários, para os métodos IMPACTWorld+ e EN15804 são exatamente os mesmos. Com relação a categoria (h) Uso de Energia Fóssil e Nuclear, apesar de os valores não serem exatamente os mesmos, são bem próximos, variando de 0,04 a 0,06, em todos os cenários. O mesmo não acontece na categoria (f) Acidificação, uma vez que os dados apresentaram valores bem distantes entre si, apresentando uma variação de 0,20.

Dentre as categorias de impacto comparáveis, foi possível observar que quanto mais simples forem os cenários, ou seja, quanto mais simples for a cadeia produtiva vinculada aos fluxos de produtos atrelados aos cenários,

menor é a diferença entre eles. Isso pode ser verificado a partir da análise dos dados, em que a variação dos resultados dos Cenário 1 para o Cenário 2 foi mínima, entre 0,01% 0,30%, enquanto a variação do Cenário 4 para o Cenário 5 varia de 0.01% a 20%. Atribui-se essa diferença aos fluxos de produtos contemplados nesses cenários, já que a diferença entre o 4 e 5 é a inclusão da etapa de transporte (A2) que, de acordo com os dados, apresenta uma alta energia incorporada por conta do diesel como fluxo de produto.

Tabela 7 - Análise de sensibilidade de diferentes métodos de AICV

	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
(a) Mudanças Climáticas						
ILCD 2011 Midpoint+	kg CO^2 eq	0.8717	0.8722	0.8755	0.8869	0.9874
IMPACT World+ Midpoint	kg CO^2 eq	0.8540	0.8545	0.8582	0.8658	0.9649
EN 15804	kg CO^2 eq	0.8821	0.8826	0.8864	0.8978	1.0000
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg CO^2 eq	0.8542	0.8547	0.8584	0.8660	0.9653
(b) Destruição da Camada de Ozônio						
ILCD 2011 Midpoint+	kg CFC-11 eq	0.1536	0.1557	0.1540	0.1583	0.1761
IMPACT World+ Midpoint	kg CFC-11 eq	0.2031	0.2059	0.2036	0.2094	0.2326
EN 15804	kg CFC11 eq	0.1934	0.1960	0.1938	0.1993	0.2214
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg CFC11 eq	0.7084	0.7114	0.7209	0.8180	1.0000
(c) Eutrofização Marinha						
ILCD 2011 Midpoint+	kg N eq	0.8846	0.8852	0.8869	0.8923	1.0000
IMPACT World+ Midpoint	kg N eq	0.0491	0.0491	0.0493	0.0496	0.0545
EN 15804	kg N eq	0.8846	0.8852	0.8869	0.8923	1.0000
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg N eq	0.0099	0.0099	0.0100	0.0105	0.0187
(d) Eutrofização de Água Potável						
ILCD 2011 Midpoint+	kg P eq	0.3512	0.3517	0.3616	0.3660	0.5142
EN 15804	kg P eq	0.3471	0.3475	0.3569	0.3606	0.5081
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg P eq	0.7713	0.7768	0.7844	0.7918	1.0000
(e) Ecotoxicidade de Água Potável						
ILCD 2011 Midpoint+	CTUe	0.0011	0.0011	0.0013	0.0012	0.0015
IMPACT World+ Midpoint	CTUe	0.7673	0.7678	0.8363	0.8284	1.0000
EN 15804	CTUe	0.0022	0.0022	0.0023	0.0023	0.0028
(f) Acidificação						
ILCD 2011 Midpoint+	mol H+ eq	0.6912	0.6927	0.6943	0.7051	0.7928
EN 15804	mol H+ eq	0.8984	0.8999	0.9015	0.9122	1.0000
(g) Eutrofização Terrestre						
ILCD 2011 Midpoint+	mol N eq	0.9059	0.9065	0.9086	0.9137	1.0000
EN 15804	mol N eq	0.9059	0.9065	0.9086	0.9136	0.9999
(h) Uso de Energia Fóssil e Nuclear						
IMPACT World+ Midpoint	MJ	0.7648	0.7728	0.7730	0.7975	1.0000
EN 15804	MJ	0.7171	0.7247	0.7251	0.7470	0.9371
(i) Esgotamento dos Recursos Hídricos*						
ILCD 2011 Midpoint+	m^3 water eq	4.709E-05	4.706E-05	4.772E-05	4.733E-05	6.048E-05
IMPACT World+ Midpoint	m^3 world eq	7.555E-03	7.558E-03	8.135E-03	8.104E-03	9.732E-03
EN 15804	m3 depriv.	7.518E-03	7.520E-03	8.078E-03	8.062E-03	9.740E-03
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	m^3	9.818E-04	9.819E-04	1.166E-03	1.180E-03	1.251E-03
(j) Mudança e Uso do Solo*						
ILCD 2011 Midpoint+	kg C deficit	1.449E+00	1.451E+00	1.452E+00	1.453E+00	1.509E+00
IMPACT World+ Midpoint	m^2yr arable	1.190E-04	1.192E-04	1.213E-04	1.200E-04	1.760E-04
EN 15804	Pt	2.848E+00	2.849E+00	2.875E+00	2.856E+00	3.125E+00
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	m^2a crop eq	1.936E-02	1.937E-02	1.974E-02	1.958E-02	2.344E-02

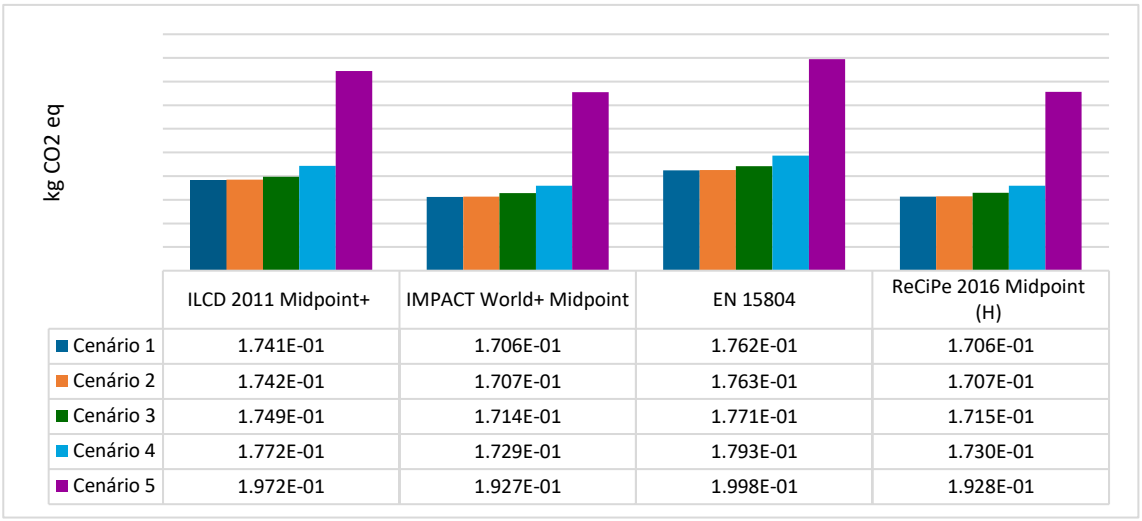
** Categorias que não puderam ser normalizadas já que seus dados estão apresentados com diferentes fatores de caracterização, sendo seus dados apresentados em valores absolutos.*

Os resultados acima podem ser explicados tendo em vista o escopo previsto para o cenário 5, em que são considerados na modelagem do produto, os custos energéticos do transporte do solo até a fábrica de BTC. Certamente, o custo energético referente ao transporte varia de acordo com a distância entre a jazida e a fábrica, também com a capacidade de transporte do caminhão e com o tipo de combustível. Caso alguns desses parâmetros fossem alterados, como por exemplo a substituição do diesel por energia elétrica, o impacto ambiental referente ao cenário 5 seria alterado significativamente.

Destacam-se aqui as categorias de impacto (c) Eutrofização Marinha e (e) Ecotoxicidade de Água Potável que, quando são considerando os mesmos cenários e comparados os diferentes métodos de AICV, apresentam resultados em ordens de grandeza muito distantes. Esse fato contribui com a hipótese de que é possível obter melhores resultados dependendo do método de AICV escolhido, fazendo com que, aparentemente, um produto tenha melhor desempenho ambiental que outros.

Ao calcular o desvio padrão entre os quatro métodos, foi possível observar que a variação entre os métodos, dentro de cada cenário, é pouco expressiva, salvo a categoria (e) Ecotoxicidade de Água Potável que apresentou um desvio padrão médio de 29621%. Dessa forma, ao utilizar essa categoria na quantificação do impacto ambiental do produto é faz-se necessário compreender as bases de cálculo utilizadas, pois, com um desvio padrão da ordem de 10^4, é notória a falta de convergência entre os métodos para essa categoria. Desse modo,

Levando em consideração o escopo e objetivo desse trabalho, dentre todas as categorias de impactos analisadas, destaca-se a categoria (a) Mudanças Climáticas por ser frequentemente considerada uma das mais importantes na ACV. Essa categoria apresenta uma relevância global tendo em vista os impactos por ela quantificados que versam sobre diferentes áreas tais como ecossistemas, biodiversidade, comunidade humanas etc. Além disso, a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é uma prioridade em diferentes políticas ambientais em todo o mundo e os fatores de caracterização dessa categoria são utilizados para converter essas emissões de GEE em uma unidade comum de equivalentes de dióxido de carbono. Dessa forma, essa categoria de impacto foi escolhida para uma análise mais aprofundada de seus resultados, sendo apresentado, no Gráfico 1, seus valores absolutos.



	ILCD 2011 Midpoint+	IMPACT World+ Midpoint	EN 15804	ReCiPe 2016 Midpoint (H)
Cenário 1	1.741E-01	1.706E-01	1.762E-01	1.706E-01
Cenário 2	1.742E-01	1.707E-01	1.763E-01	1.707E-01
Cenário 3	1.749E-01	1.714E-01	1.771E-01	1.715E-01
Cenário 4	1.772E-01	1.729E-01	1.793E-01	1.730E-01
Cenário 5	1.972E-01	1.927E-01	1.998E-01	1.928E-01

Gráfico 1 – Mudanças Climáticas

É possível verificar que a diferença entre os dados obtidos a partir dos quatro métodos, conforme foi dito anteriormente é mínima sendo, então, desprezadas. A convergência desses dados é justificada pela similaridade dos fatores de caracterização utilizados em cada método.

Ao comparar os cinco cenários, observa-se que do ponto de vista da produtividade e eficácia do produto, é mais vantajosa a produção no cenário 4 visto que os processos são auxiliados por equipamentos mecânicos que aumentam a produtividade, tanto da etapa de extração quanto da etapa de produção dos BTC. Além disso, sendo os blocos produzidos com a prensa hidráulica, a estabilização mecânica alcançada pelo equipamento é muito superior àquela realizada com a força humana. Assim, é possível vislumbrar, a depender do solo e estabilizante utilizado, a incorporação de menos cimento no traço, possibilitando uma economia de energia incorporada.

4 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi realizar uma análise de sensibilidade para compreender se a utilização de diferentes métodos de AICV pode levar a resultados de impactos distintos, influenciando assim na tomada de decisão por partes dos profissionais. Para isso, foram comparados os métodos ILCD, IMPACTWorld+, EN15804 e ReCiPe, sendo eles aplicados a um escopo de ACV de produção (A1-A3) do BTC sem função estrutural em cinco cenários de produção.

Neste contexto, a principal conclusão é que a escolha de um determinado método de AICV pode influenciar os resultados da ACV, dependendo de dois fatores quais sejam, a categoria de impacto a ser analisada e a complexidade de seu sistema. No entanto, foi possível observar que para a maioria das categorias de impacto analisadas, a variação dos dados obtidos é muito pequena e, portanto, desprezível.

A variação dos resultados entre os diferentes métodos é decorrente das diferenças nos modelos de caracterização que apresentam diferentes fatores de caracterização. As categorias (a) Mudanças Climáticas e (g)

Eutrofização Terrestre, por exemplo, possuem os mesmos fatores de caracterização para os métodos ILCD e ReCiPe, e por isso, apresentam os mesmos dados.

Os métodos de AICV aplicados nessa investigação apresentam um escopo regional europeu e global, portanto, não é possível assegurar que os procedimentos de cálculo e fatores de caracterização desses métodos são capazes de representar a realidade produtiva tampouco, avaliar os impactos ambientais no contexto brasileiro.

Os resultados de qualquer ACV são influenciados pela escolha do banco de dados utilizado. Na medida que acontecem atualizações nesses bancos de dados, os resultados da ACV estão passíveis de alterações, podendo influenciar o perfil ambiental dos produtos analisados. Como esse trabalho focou na análise comparativa entre os métodos de AICV, destaca-se que foi utilizada a mesma base de dados Ecoinvent v3.6 para a quantificações dos impactos em todos os métodos.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NM ISO 3310-1 - Peneiras de Ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1:** Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1; 2000, IDT). Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10833 - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012b.

BELIZARIO-SILVA, F. et al. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia**. 1ª. ed. São Paulo: SIDAC, 2022.

CARVALHO, B. T. **Arquitetura com Terra na Construção Sustentável: Blocos de Terra Comprimido para Produção de Habitação**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura Urbanismo, Programa de Pós-Graduaçao em Arquitetura - FAU/UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.

CARVALHO, B. T.; SILVOSO, M.; ALBERTO, E. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de sistemas de alvenaria de blocos de solo-cimento com diferentes dosagens**. Salvador: Universidade Federal da Bahia-UFBA, Faculdade de Arquitetura - FAUFBA. 2021.

MATEUS, R. et al. Sustainability assessment of an energy efficient optimized solution. In: SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Proceedings of the 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century**. [S.l.]: Santamouris, M., Wouters, P. (Eds.), 2007. p. 636–640.

MATEUS, R.; FERNANDES, J.; TEIXEIRA, E.R. Environmental Life Cycle Analysis of Earthen Building Materials. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, 2016.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O PAPEL DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira[a]; Lucas Rosse Caldas[b]; Thiago Melo Grabois[c]

[a]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon, 550, Rio de Janeiro, Brasil, ana.tostes@fau.ufrj.br

[b]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon, 550, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.caldas@fau.ufrj.br

[c]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon, 550, Rio de Janeiro, Brasil, grabois@fau.ufrj.br

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a contribuição da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no que diz respeito aos objetivos de desenvolvimento sustentável. A metodologia consistiu na busca de documentos científicos que empregam a ACV no campo da arquitetura em busca de um ou mais objetivos de desenvolvimento sustentável na base de dados Scopus, publicados nos anos de 2003 a 2023. Os resultados mostram que a maioria dos estudos se concentram na escala do edifício (64,6%), enquanto 14,6% trabalham com a ACV na escala urbana e 20,7% na escala do material de construção. Os estudos mostraram que a ACV pode contribuir direta ou indiretamente para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 e 15. É possível apontar a falta de estudos que considerem todo o tripé da sustentabilidade, incluindo aspectos ambientais, sociais e econômicos, como uma lacuna de pesquisa. Este trabalho apresenta o estado da arte do uso da ACV como uma ferramenta que auxilia nos objetivos de desenvolvimento sustentável, assim como destaca métodos e abordagens complementares utilizados em diversos cenários.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida, desenvolvimento sustentável, impactos ambientais, ODS, revisão da literatura

1 INTRODUÇÃO

O movimento pelo desenvolvimento sustentável, de acordo com Barbieri (2020), tem início em 1959, com a criação da Primeira Década das Nações Unidas para o Desenvolvimento. O autor argumenta que desde o princípio, o movimento tem um caráter multidisciplinar que busca em consideração não apenas o crescimento econômico, como também os impactos na sociedade e no ambiente (Barbieri, 2020). Por outro lado, Boff (2017) defende que o conceito de sustentabilidade teria surgido quatro séculos antes, na Província da Saxônia, com o surgimento da preocupação pelo uso racional de florestas e do termo alemão *Nachhaltigkeit*, que significa sustentabilidade.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentados como parte da Agenda 2030, são parte importante da iniciativa das Nações Unidas em prol do desenvolvimento econômico e bem-estar humano (Onat *et al.* 2021). Diferente dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), iniciativa sucesso na década de 2000, os ODS foram elaborados com um envolvimento significativo da sociedade, incluindo metas de implementação, mecanismos de revisão e correção de rumos (Barbieri 2020). Para continuar o progresso pelo desenvolvimento sustentável na construção civil, é necessário avaliar principalmente as emissões de gases de efeito estufa (GEE), o uso de energia em edificações e o impacto do aquecimento global nos materiais (IPCC, 2023).

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ajudar a responder essas lacunas, sendo uma das ferramentas mais utilizadas para mitigar o impacto das edificações. As emissões de GEE relacionadas à construção de edificações representam cerca de 39% das emissões globais relacionadas a energia (IEA 2019). De acordo com Backes e Traverso (2022), ainda não existe uma relação direta qualitativa e quantitativa entre a ACV de edifícios e os ODS, mas a necessidade da combinação entre os dois assuntos é clara, principalmente nos setores que envolvem intensivamente recursos, energia e emissões, como é o caso da construção civil.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é responder a seguinte questão: como a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida vem contribuindo para o desenvolvimento sustentável? Neste sentido, foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL), a fim de apontar o estado da arte das pesquisas em ACV aplicada a arquitetura e sua relação com a minimização dos impactos ambientais, econômicos e sociais. Os resultados demonstraram que a ACV pode ser incorporada em estudos de diferentes escopos e contextos geográficos, e pode ter ligação direta ou indireta com os objetivos de desenvolvimento sustentável. Também foi possível identificar métodos, ferramentas e abordagens utilizadas de forma complementar à ACV nesse contexto.

2 MÉTODO

O método utilizado envolveu análises quantitativa e qualitativa da literatura. A análise quantitativa buscou identificar os países e periódicos que mais publicaram trabalhos sobre uso de ACV na arquitetura para objetivos de desenvolvimento sustentável. A qualitativa teve o objetivo de identificar as tendências de métodos e ferramentas associados a essas pesquisas, bem como a contribuição da metodologia de ACV para os objetivos sustentáveis.

Para identificar o estado da arte do tema, foi feita uma busca na base de dados Scopus, considerando um horizonte temporal de 20 anos, compreendido entre 2003 e 2023 (até a data da pesquisa: setembro de 2023). A Figura 1 mostra os critérios adotados para a pesquisa e seleção dos artigos científicos considerados na RSL.

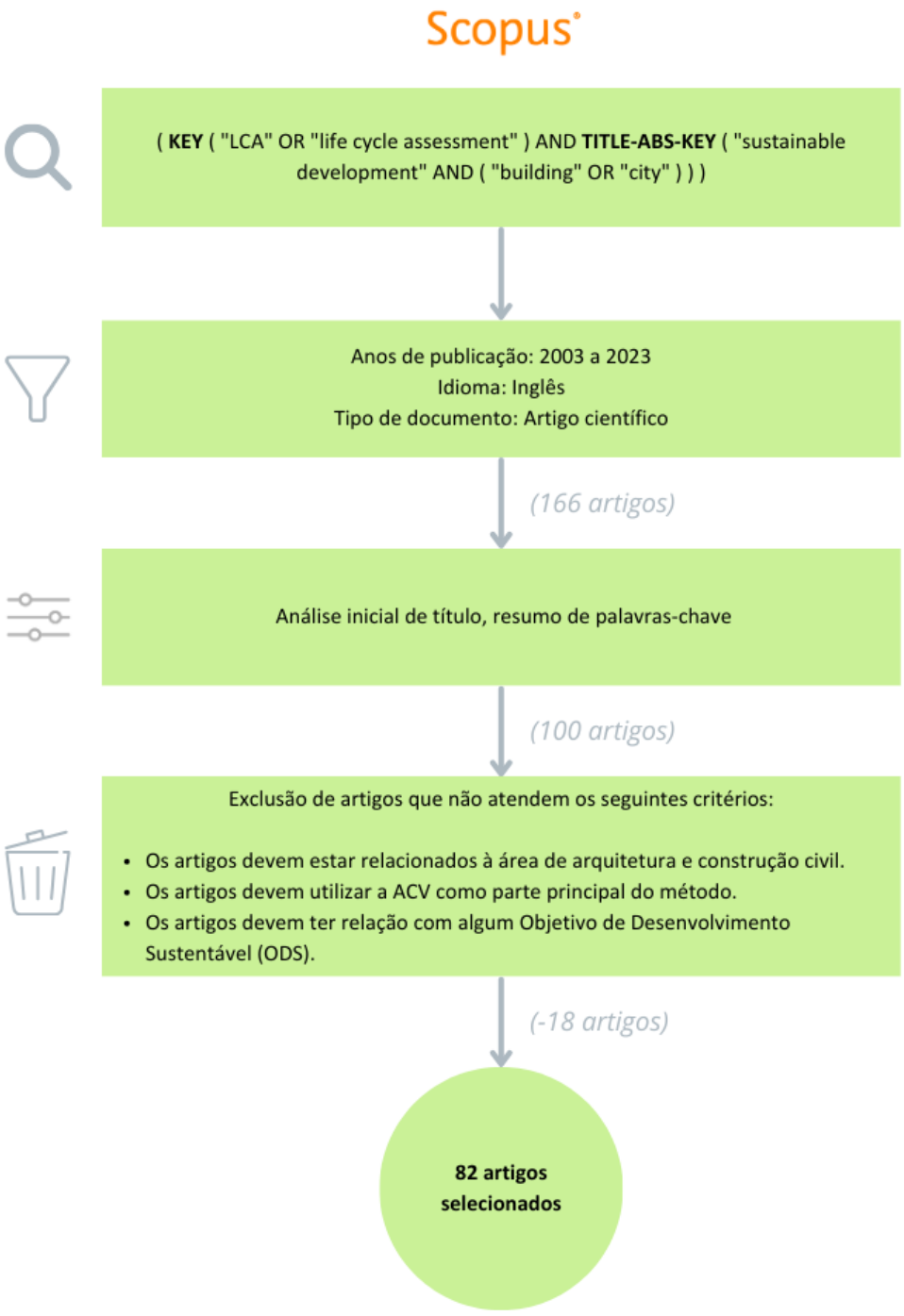


Figura 1 – Fluxograma dos critérios de pesquisa

Foram considerados artigos de revista científica, publicados em língua inglesa, publicados entre 2003 e 2023 (incluindo estes), que incluíssem “LCA” ou “life cycle assessment” como palavra-chave, além de “sustainable development” e “building” ou “city” no título, resumo ou entre as palavras-chave.

A busca definida pelos critérios de Figura 1 resultou em 166 artigos científicos, que foram reduzidos a 100 após uma análise inicial de título, resumo e palavras-chave. Após a leitura na íntegra dos artigos, 31 foram excluídos por não atender aos seguintes critérios de inclusão:

- Os artigos devem estar relacionados à área de arquitetura e construção civil.
- Os artigos devem utilizar a ACV como parte principal do método.
- Os artigos devem ter relação com algum objetivo de desenvolvimento sustentável.

Durante a leitura integral dos artigos selecionados, buscou-se responder aos seguintes questionamentos de pesquisa: 1) Quais os países e periódicos que mais publicaram esse tipo de estudo? 2) Quais as tendências de métodos, ferramentas e abordagens utilizados em conjunto a ACV, em estudos que objetivam atingir metas de desenvolvimento sustentável? 3) Como a ACV vem contribuindo para o desenvolvimento sustentável?

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Essa seção do trabalho busca responder ao primeiro questionamento de pesquisa apontado na seção Método: Quais os países e periódicos que mais publicaram esse tipo de estudo?

A análise quantitativa demonstrou que, no recorte deste estudo, os Estados Unidos lideram no número de publicações (9), seguidos por Espanha (7), França (6), China e Portugal (5) – considerando todas as publicações dos últimos vinte anos selecionadas para este estudo. A relação do número de artigos por país pode ser encontrada na Figura 2.

Com exceção da China, que é considerada uma economia em desenvolvimento, é possível dizer que os países que lideram em número de publicações sobre o tema são países de economia desenvolvida. Destaca-se que o Brasil, com duas publicações, é o único representante da América Latina, tendo publicado tanto quanto Suíça, Nova Zelândia, Alemanha, Finlândia e Singapura.

É possível reconhecer uma tendência de crescimento no interesse pelo assunto entre 2012 e 2014, com um aumento significativo nas publicações, que foram de 1 a 9 por ano, respectivamente. A mesma coisa acontece entre 2019, ano com 2 publicações no tema, e 2021, com 11 publicações por ano. O número de artigos dentro do escopo estudado manteve-se em 11 durante o ano de 2022, enquanto as sete publicações do ano de 2023 representam um quantitativo parcial, visto que o presente estudo levou em consideração artigos publicados até setembro do mesmo ano.

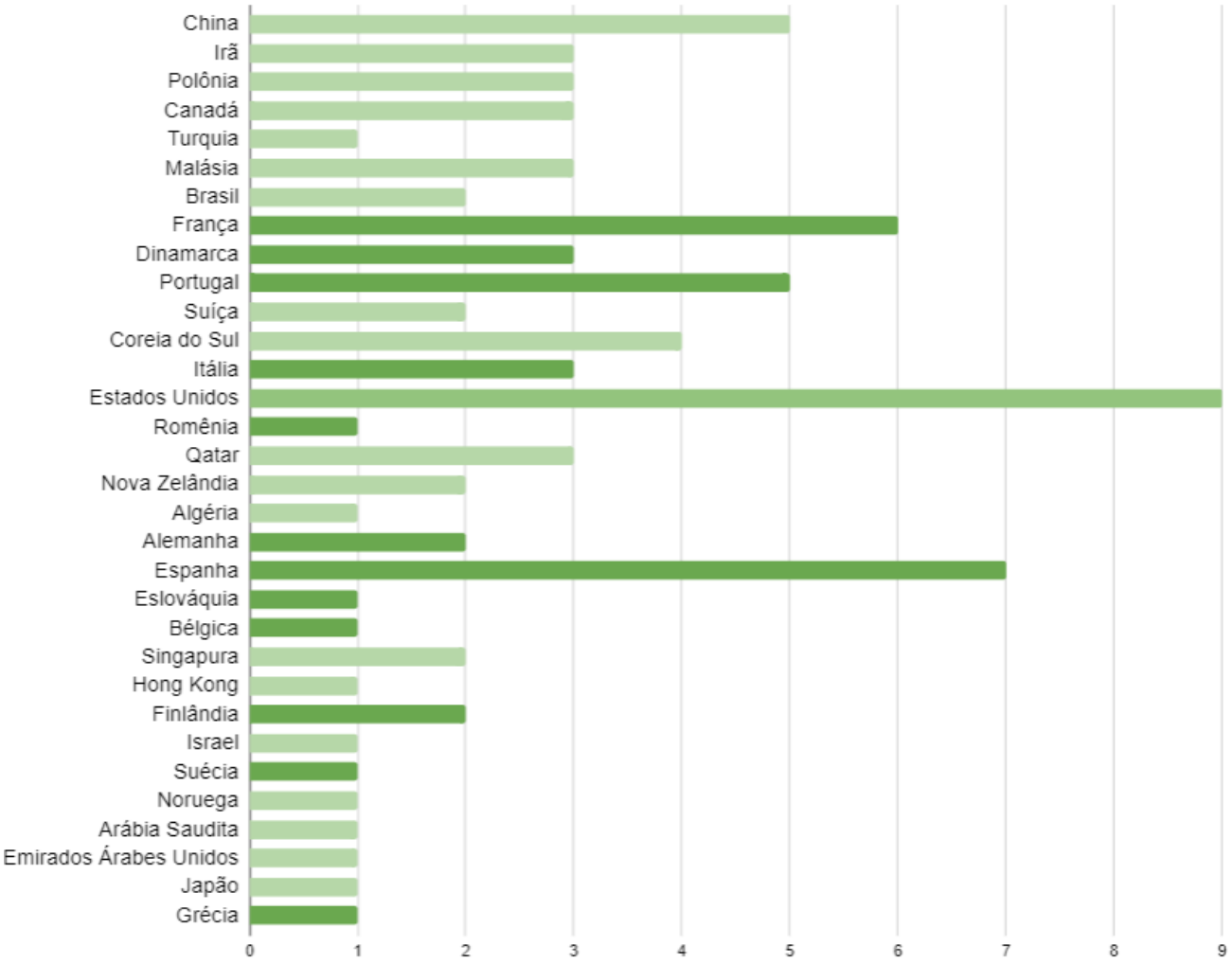


Figura 2 – Número de artigos por país

Em relação aos periódicos que mais publicaram sobre o tema, destaca-se a revista Building and Environment com a maior parte (53,7%) dos artigos selecionados, seguida pela Sustainable Cities and Society com 15,9% e pela Sustainability (Switzerland), que representa 11%. Um panorama do número de publicações por revista científica pode ser visto na Figura 3.

Nesse âmbito, destaca-se que o periódico Building and Environment é o único no qual podem-se encontrar publicações sobre o tema estudado pelo menos uma vez a cada dois anos, desde 2007. Já o periódico Sustainable Cities and Society, que tem um fator de impacto significativamente maior, tem o artigo mais antigo dentro da seleção proposta neste trabalho publicado em 2017. Desde então, publicou ao menos um artigo científico por ano dentro deste escopo. O terceiro periódico mais relevante para essa RSL, Sustainability (Switzerland), apesar de menos impactante que os anteriores, publica sobre o assunto desde 2015.

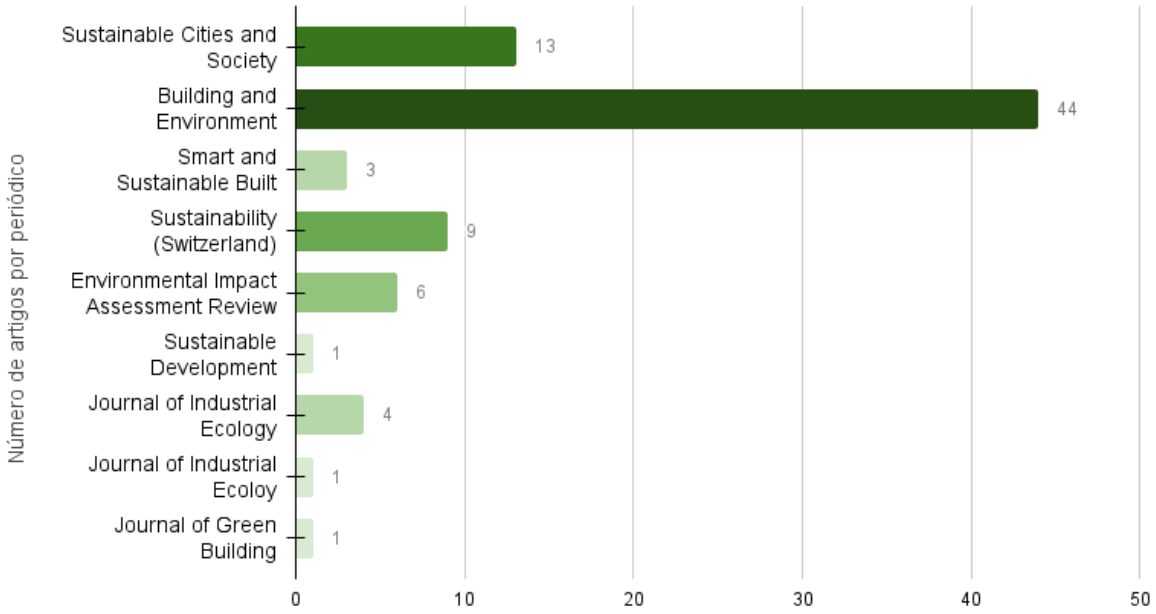


Figura 3 – Número de artigos por períodico

3.2 MÉTODOS E FERRAMENTAS UTILIZADOS

Essa seção do trabalho busca responder ao primeiro questionamento de pesquisa apontado na seção Método: Quais as tendências de métodos, ferramentas e abordagens utilizados em conjunto a ACV, em estudos que objetivam atingir metas de desenvolvimento sustentável? Para isso, foi realizada a leitura na íntegra dos artigos e levantadas as principais ferramentas e/ou métodos utilizados como complemento à ACV nos artigos selecionados. Neste estudo, estes métodos e ferramentas variaram de acordo com a escala da avaliação de ciclo de vida proposta.

Em estudos de escala urbana (que representam 14,6% dos artigos selecionados), o método de Análise de Fluxo de Material (AFM) foi utilizado em estudos de caso em Madrid (González-García *et al*. 2021), em Santiago de Compostela (García-Guaita *et al*. 2018), e na cidade de Montreuil (Dorr *et al*. 2022), mostrando-se eficaz para uma análise de impacto ambiental satisfatória e um método recomendado na criação de novas abordagens multicritério. Os mesmos estudos também utilizaram o conceito de Metabolismo Urbano, anteriormente explorado por Pincetl *et al*. (2014). Os softwares SimaPro, eLCA, LEGEP, ALCYONE, ArcGIS e COMFIE-Pleiades destacam-se como os mais utilizados para estudos nessa escala, que em sua maioria buscaram avaliar mais de uma categoria de impacto.

Já nos 20,7% de estudos que trabalharam na escala dos materiais, incluindo estudos de caso cujo objeto de avaliação é um componente construtivo, utilizou-se da análise estrutural e de desempenho mecânico em estudos que buscaram avaliar a energia incorporada como uma categoria de impacto (Hay e Ostertag 2018; Navarro-Rubio, Pineda e García-Martínez 2019). Alguns destes trabalhos ainda abordam aspectos sociais (Khoshnava *et al*. 2018; Rocha *et al*. 2022; Sinoh, Othman e Onn 2023) e econômicos (Khoshnava *et al*. 2018; Navarro-Rubio, Pineda e García-Martínez 2019; Rocha *et al*. 2022) atrelados aos objetos estudos, que variam entre materiais tradicionais cimentícios a biomateriais ou sistemas híbridos.

Os resultados mostram, entretanto, que a maioria dos artigos (64,6%) se concentram na escala do edifício. Nesse caso, o método de destaque na complementação da ACV é o BIM, utilizado em estudos

na Europa, Ásia e América do Norte (Basbagill *et al.* 2013; Amoruso e Schuetze 2022; Kamari, Kotula e Schultz 2022; Lu e Deng 2023; Santos *et al.* 2020; Zhu e Feng 2023). Entre os softwares, percebeu-se uma predominância no uso do SimaPro, que junto ao GaBi e ao OneClick LCA foram os mais utilizados para avaliação do ciclo de vida. Simulações térmicas, sísmicas e acústicas também foram utilizadas em estudos que, além de considerar aspectos ambientais, tocam em análises econômicas (Pozza *et al.* 2021; Tavares *et al*. 2021) ou socioeconômicas (Invidiata, Lavagna e Ghisi 2018; Phillips *et al.* 2020).

3.3 CONTRIBUIÇÃO DA ACV

No geral, a ACV vem sendo utilizada em estudos de caso em diferentes escalas (material, urbana ou da edificação), associada diretamente (Bordbar *et al.* 2023; Genta *et al*. 2022; Hafner, Slabik e Storck 2020; Keles e Yazicioglu 2023; Kucukvar *et al*. 2021; Onat *et al.* 2021) ou indiretamente a objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). No entanto, existem lacunas de pesquisa no que diz respeito aos aspectos da sustentabilidade abordados por estes estudos, uma vez que apenas 20 dentre os 82 artigos selecionados demonstram resultados baseados no tripé ambiental-social-econômico.

Destacam-se as abordagens que buscam estimar impactos em outras categorias que não o potencial de aquecimento global, principalmente as que investigam a relação entre ambiente construído e saúde humana (González-García *et al*. 2021; Khoshnava *et al*. 2018; Kucukvar *et al*. 2021), estabelecendo relação direta com o ODS 3. No geral, além do ODS 11, que está relacionado a todos os estudos abordados por este trabalho devido aos critérios de busca utilizados, e além do ODS 3 já mencionado, foram reconhecidas contribuições do método da ACV para os ODS 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 e 15.

Por fim, os resultados demonstram que uma grande contribuição da ACV se dá pela integração do método na proposição de novas abordagens científicas (Chandrakumar *et al.* 2020; Pozza *et al.* 2021) e ferramentas (Kamari, Kotula e Schultz 2022; Lu e Deng 2023; Santos *et al*. 2020) voltadas para propósitos alinhados com o desenvolvimento sustentável e metas de ação climática.

4 CONCLUSÕES

A utilização da Avaliação do Ciclo de Vida como metodologia para atingir objetivos de desenvolvimento sustentável mostrou-se de relevância cientifica, podendo a ACV ser realizada em conjunto com outros métodos de avaliação desenvolvidos nas últimas décadas. Em relação ao recorte temporal adotado (2003-2023), destaca-se a falta de estudos sobre o tema até o ano de 2007, com exceção do artigo de Erlandsson e Borg (2003), que tratou do estado da arte da aplicação genérica de ACV naquele momento. É possível afirmar que, dentro do escopo dos últimos cinco anos, a maioria dos estudos de ACV tem relação com mais de um objetivo de desenvolvimento sustentável, sendo os ODS 3, 11 e 13 os citados mais frequentemente nos trabalhos selecionados.

Em resposta as lacunas de pesquisa encontradas, recomenda-se a avaliação de edificação completa ou a inclusão de todo o ciclo de vida no escopo da ACV. Ainda, para atingir objetivos de desenvolvimento sustentável, é preciso explorar categorias de impacto para além do potencial de aquecimento global, sendo imprescindível a correlação entre as emissões de gases de efeito estufa e suas consequências socioeconômicas nos mais diversos contextos geográficos. São reconhecidos como positivos os esforços pela aplicação da ACV em tipologias não-residenciais, como em escritórios (Bullen *et al*. 2021; Phillips *et al.* 2020; Santos *et al*. 2020), estádios (Al-Hamrani *et al*. 2021; Kucukvar *et al.* 2021), *campi* (Leon, Oregi e Marieta 2018; Xue *et al.* 2019) ou escolas (Jang, Hong e Ji 2015).

O presente trabalho busca contribuir com a evolução do conhecimento científico, apresentando o estado da arte do uso da ACV como uma ferramenta que auxilia nos objetivos de desenvolvimento

sustentável, bem como destacar seu potencial impacto na tomada de decisões projetuais dentro da indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

Al-Hamrani, A., Kim, D., Kucukvar, M., Onat, N.C. (2021). Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022™. Environmental Impact Assessment Review, 87:106543. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106543

Amoruso, F.M., Schuetze, T. (2022). Life cycle assessment and costing of carbon neutral hybrid-timber building renovation systems: Three applications in the Republic of Korea. Building and Environment, 222:109395. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109395

Barbieri, J. C. (2020). Desenvolvimento sustentável: das origens à agenda 2030. Petrópolis: Editora Vozes.

Backes, J. G.; Traverso, M. Life Cycle Sustainability Assessment – A Survey Bases Potential Future Development for Implementation and Interpretation. Sustainability 2021, 13(24):13688. https://doi.org/10.3390/su132413688

Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. Building and Environment, 60:81-92. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009

Boff, L. (2017). Sustentabilidade: o que é - o que não é. Petrópolis: Editora Vozes.

Bordbar, B., Khosravi, A., Abdollahi, F., Hashemifard, S.A., Karagöz, S. (2023). An insight into environmental footprints of emerging air-conditioning systems towards sustainable cities. Sustainable Cities and Society, 98:104830. http://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104830

Bullen, L., McLaren, S.J., Dowdell, D., Chandrakumar, C. (2021). Absolute sustainability of New Zealand office buildings in the context of climate targets. Building and Environment, 205:108186. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108186

Chandrakumar, C., McLaren, S.J., Dowdell, D., Jaques, R. (2020). A science-based approach to setting climate targets for buildings: The case of a New Zealand detached house. Building and Environment, 169:106560. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106560

Dorr, E., François, C., Poulhès, A., Wurtz, A. (2022). A life cycle assessment method to support cities in their climate change mitigation strategies. Sustainable Cities and Society, 85:104052. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104052

Erlandsson, M., Borg, M. (2003). Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs. Building and Environment, 38(7):919-938. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00031-3

García-Guaita, F., González-García, S., Villanueva-Rey, P., Moreira, M.T., Feijoo, G. (2018). Integrating Urban Metabolism, Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment in the environmental evaluation of Santiago de Compostela. Sustainable Cities and Society, 40:569–580. http://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.027

Genta, C., Sanyé-Mengual, E., Sala, S., Lombardi, P. (2022). The Consumption Footprint as possible indicator for environmental impact evaluation at city level. The case study of Turin (Italy). Sustainable Cities and Society, 79:103679. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103679

González-García, S., Caamaño, M.R., Moreira, M.T., Feijoo, G. (2021). Environmental profile of the municipality of Madrid through the methodologies of Urban Metabolism and Life Cycle Analysis. Sustainable Cities and Society, 64:102546. http://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102546

Hafner, A., Slabik, S., Storck, M. (2020). Urban Site Development as Temporal Carbon Storage—A Case Study in Germany. Sustainability, 12(14):5827. https://doi.org/10.3390/su12145827

Hay, R.; Ostertag, C. P. (2018). Life cycle assessment (LCA) of double-skin façade (DSF) system with fiber-reinforced concrete for sustainable and energy-efficient buildings in the tropics. Building and Environment, 142:327–341. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.024

Invidiata, A., Lavagna, M., Ghisi, E. (2018). Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. Building and Environment, 139: 58–68. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.041

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2023: Synthesis Report. 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

Jang, M., Hong, T., Ji, C. (2015). Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. Environmental Impact Assessment Review, 50:143-155. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.010

Kamari, A., Kotula, B.M., Schultz, C.P.L. (2022). A BIM-based LCA tool for sustainable building design during the early design stage. Smart and Sustainable Built Environment, 11(2):217–244. http://doi.org/10.1108/SASBE-09-2021-0157

Keles, C., Yazicioglu, F. (2023). Analyzing the environmental sustainability of primary schools' facades within the scope of life cycle assessment in Turkey and recommendations for improvement. Smart and Sustainable Built Environment, 12(2):298-324. https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0072

Khoshnava, S.M., Rostami, R., Ismail, M., Rahmat, A.R. (2018). A cradle-to-gate based life cycle impact assessment comparing the KBFw EFB hybrid reinforced poly hydroxybutyrate biocomposite and common petroleum-based composites as building materials. Environmental Impact Assessment Review, 70: 11–21. http://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.02.002

Kucukvar, M., Kutty, A.A., Al-Hamrani, A., Kim, D., Nofal, N., Onat, N. C., Al-Ansari, T., Al-Thani, S. K., Al-Jurf, N. M., Bulu, M., Al-Nahhal, W. (2021). How circular design can contribute to social sustainability and legacy of the FIFA World Cup Qatar 2022™? The case of innovative shipping container stadium. Environmental Impact Assessment Review, 91:106665. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106665

Leon, I., Oregi, X., Marieta, C. (2018). Environmental assessment of four Basque University campuses using the NEST tool. Sustainable Cities and Society, 42: 396–406. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.007

Lu, K.; Deng, X. (2023). OpenBIM-based assessment for social cost of carbon through building life cycle. Sustainable Cities and Society, 99: 104871. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104871

Navarro-Rubio, J.; Pineda, P.; García-Martínez, A. (2019). Sustainability, prefabrication and building optimization under different durability and re-using scenarios: Potential of dry precast structural connections. Sustainable Cities and Society, 44: 614–628. http://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.045

Onat, N.C., Abdella, G.M., Kucukvar, M., Kutty, A. A., Al-Nuaimi, M., Kumbaroğlu, G., Bulu, M. (2021). How eco-efficient are electric vehicles across Europe? A regionalized life cycle assessment-based eco-efficiency analysis. Sustainable Development, 29(5): 941–956. https://doi.org/10.1002/sd.2186

Pincetl, S., Chester, M., Circella, G., (...), Reyna, J., Sivaraman, D. (2014). Enabling Future Sustainability Transitions: An Urban Metabolism Approach to Los Angeles Pincetl et al. Enabling Future Sustainability Transitions. Journal of Industrial Ecology, http://doi.org/10.1111/jiec.12144

Phillips, R., Troup, L., Fannon, D., Eckelman, M.J. (2020). Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings. Building and Environment, 182: 107057. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107057

Pozza, L., Esposti, A.D., Bonoli, A., Talledo, D., Barbaresi, L., Semprini, G., Savoia, M. (2021). Multidisciplinary Performance Assessment of an Eco-Sustainable RC-Framed Skin for the Integrated Upgrading of Existing Buildings. Sustainability, 13(16):9225. https://doi.org/10.3390/su13169225

Rocha, J.H.A., de Siqueira, A.A., de Oliveira, M.A.B., Castro, L. S., Caldas, L. R., Monteiro, N.B.R., Toledo Filho, R.D. (2022). Circular Bioeconomy in the Amazon Rainforest: Evaluation of Açaí Seed Ash as a Regional Solution for Partial Cement Replacement. Sustainability (Switzerland), 14(21):14436. https://doi.org/10.3390/su142114436

Santos, R., Costa, A.A., Silvestre, J.D., Vandenbergh, T., Pyl, L. (2020). BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. Building and Environment, 169: 106568. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568

Sinoh, S. S.; Othman, F.; Onn, C. C. (2023). Circular economy potential of sustainable aggregates for the Malaysian construction industry. Sustainable Cities and Society, 89:104332. http://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104332

Tavares, V., Gregory, J., Kirchain, R., Freire, F. (2021). What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets? Building and Environment, 206: 108382. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108382

UNITED NATIONS: Department of Economic and Social Affairs. World Economic Situation and Prospects 2024. https://www.un.org/development/desa/dpad/wp-content/uploads/sites/45/WESP_2024_Web.pdf

Xue, Z., Liu, H., Zhang, Q., Wang, J., Fan, J., Zhou, X. (2020). The Impact Assessment of Campus Buildings Based on a Life Cycle Assessment–Life Cycle Cost Integrated Model. Sustainability, 12(1):294. https://doi.org/10.3390/su12010294

Zhu, S.; Feng, H. (2023). Is energy-efficient building sustainable? A case study on individual housing in Canada under BCESC energy updates. Building and Environment, 239: 110452. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110452

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

METODOLOGIAS APLICADAS PARA ESTIMAR A ABSORÇÃO DE CO2 PELOS MATERIAIS CIMENTICIOS

Francisco Felipe Pedrosa Bezerra[a]; João Henrique da Silva Rêgo[a]; Jéssica Fall Nogueira Chaves[a], Miguel Ángel Sanjuán[b], Lucas de Paula Vasques[a]

[a]Mestrando (Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brasil), francisco.felipe@aluno.unb.br

[a]Professor Doutor (Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brasil), jhenriquerego@unb.br

[a]Doutoranda (Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brasil), jessicafall@live.com

[b]Professor Associado (Departamento de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção, Escola de Engenharia Civil, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha), masanjuan@ieca.es

[a]Mestre (Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brasil), vasqueslucas7@gmail.com

RESUMO

A produção de clínquer requer um processo físico-químico que libera uma grande quantidade de dióxido de carbono na atmosfera conhecido como calcinação, que é a decomposição térmica de carbonato de cálcio em dióxido de carbono, CO_2, e óxido de cálcio, CaO. Por outro lado, a carbonatação é a reação química entre o dióxido de carbono e alguns constituintes que estão presentes na pasta de cimento das argamassas e concretos. Esse processo absorve parte do dióxido de carbono liberado no forno de clínquer. As Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa não consideram a carbonatação de materiais à base de cimento para mitigar a emissão de carbono pela indústria dos materiais cimentícios. Assim, há necessidade de aprimorar os cálculos atuais que compõem os relatórios dos Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. O objetivo deste trabalho é a análise de duas metodologias, conhecidas como método avançado e método simplificado a partir da revisão da literatura sobre o assunto. Estas metodologias têm sido estudadas com o objetivo de obter os dados necessários para estimar a absorção de dióxido de carbono por materiais à base de cimento. Assim, os fatores de emissão devem ser modificados.

Palavras-chave: Absorção de CO2, Carbonatação, Cimento, Mitigação das Mudanças climáticas

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais presentes na sociedade, tendo como principal base a pasta de cimento Portland (CP), material artificial mais produzido atualmente no mundo (PILEGGI et al, 2018). Os diferentes tipos de cimento encontrados no mercado, decorrem da busca por um material mais sustentável, economicamente vantajoso e de alta resistência. Para isso, são realizadas adições de diferentes materiais, considerados como matérias cimentícios suplementares, como, por exemplo: resíduos industriais; cinza volantes de carvão; escoria granulada moída; sílica ativa (Sanjuán *et al.* 2020).

Para produzir o clínquer, o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) é extraído da superfície terrestre, passando por um processo de calcinação, juntamente com a argila. Durante a queima do carbonato de cálcio no forno rotativo, em torno de 1450°C, o CO_2 é diretamente lançado para a atmosfera, obtendo assim o CaO (óxido de cálcio), que junto a outros elementos químicos desenvolvem os principais compostos cimentícios. Esse processo é conhecido por calcinação e esta representado na Equação 1.

$$CaCO_3 \xrightarrow[700ºC - 900ºC]{} CO2 + CaO \qquad \text{Equação 1}$$

A indústria da construção possui um elevado consumo de energia e lançamento de CO2, devido a crescente urbanização (Lamb *et al*. 2021). Em 2019 cerca de 26% do total das emissões industriais de dióxido de carbono decorreram da indústria de cimento, e 5 a 8% das emissões totais (IEA, 2020; Silfwerbrand). Desta forma, são necessárias medidas urgentes visando a aplicação de técnicas que promovam níveis de baixo carbono na indústria cimenteira (Guo *et al*. 2023). Porém, é impossível produzir CP sem o processo de decomposição térmica do calcário, além da queima do combustível fóssil, gerando energia nos fornos. Benhelal, Shamsaei e Rashid (2021) avaliaram que 50% a 60% da emissão de CO_2 pela indústria de cimento está relacionada a calcinação, e 30% a 40% pela queima de combustíveis fósseis e uso da eletricidade.

A produção de uma tonelada de cimento gera em torno de 0,5 a 0,6 toneladas de CO_2 (Plaza, Martinez e Rubieira, 2020) e é necessário reduzir essas emissões. Uma visão ambiciosa foi estipulada pela produtora de cimento sueca Cementa para ser atingida até o ano de 2030, como é apresentado na Figura 1 (Silfwerbrand, 2020). Para que isso ocorra, algumas medidas são necessárias: economia de energia; substituição da biomassa por combustíveis fósseis; novos tipos de cimentos como aglomerantes alternativos; absorção de CO_2 por carbonatação; armazenamento e captura de CO_2. A absorção de CO_2, juntamente com a economia de energia e o desenvolvimento de novos cimentos, podem diminuir até 50% do CO_2 (Silfwerbrand, 2020). É necessária uma atenção para os cálculos e métodos que estão sendo desenvolvidos para estimar a absorção de CO_2 que ocorre no fenômeno de carbonatação dos materiais cimentícios.

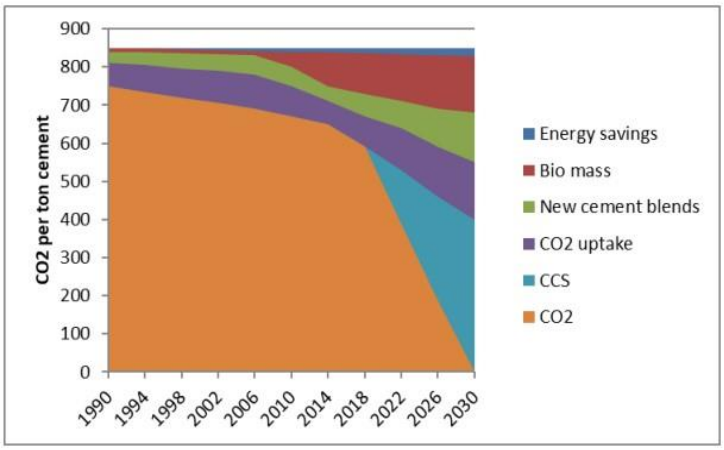


Figura 1 – Visão zero, Cementa (Cementa AB, 2018)

As diretrizes para compor os inventários nacionais de Gases de Efeito Estufa (GEE), baseiam-se no documento do IPCC (Panel on Climate Change) "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". O IPCC reúne o conhecimento produzido por cientistas de alto nível, independentes, ou ligados a organizações governamentais e centros de pesquisas. Os relatórios do IPCC fornecem os procedimentos de cálculo para as emissões nacionais de GEE. Porém, as diretrizes não levam em consideração as emissões liquidas de dióxido de carbono pelo clinquer do CP. As emissões liquidas correspondem as emissões liberadas pelo processo de calcinação nas fabricas de cimento, subtraindo-se a parcela correspondente a absorção de CO2 por argamassas e concretos (SANJUAN et al, 2020).

Para estimar a absorção de dióxido de carbono por materiais à base de cimento, duas metodologias proposta pela fundação de pesquisa IVL (Instituto Sueco de Pesquisa) e a produtora de cimento Cementa AB, consistem com as diretrizes do IPCC e podem ser destacadas. O método simplificado (Tier 1) e o método avançado (Tier 2) estão sendo escolhidas para modelar a compensação de carbono, absorvido por argamassas e concretos (Sanjuan et al, 2020).

O objetivo deste artigo visa indicar dois procedimentos, Tier 1 e Tier 2, usados para estimar as emissões líquidas de CO_2 por materiais a base de cimento. São apresentados os dados necessários a aplicação dos métodos, fazendo uma discussão e uma apresentação das metodologias propostas.

2 CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO_2

A carbonatação surge no processo de interação entre o dióxido de carbono (CO_2) e a umidade relativa do ar (H_2O), presentes na atmosfera. Esses elementos entram no concreto através de fissuras e da porosidade. A reação desenvolve ácido carbônico (H_2CO_3) que em contato com a superfície dos materiais reagem com os produtos de hidratação do cimento, C-S-H, $Ca(OH)_2$, AFt (etringita) e AFm (monossulfoaluminatos) formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A formação do carbonato de cálcio decompõe e retrai os materiais cimentícios. A Figura 2 apresenta o fluxograma do desenvolvimento de carbonatação. Esse processo neutraliza a alcalinidade da pasta, consumido Ca e deixando o aço exposto a corrosão (Neville e Brooks, 2013).

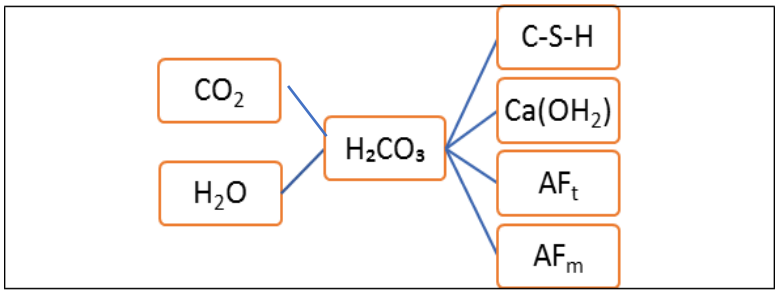


Figura 2 – Processo de carbonatação (Adaptação a partir de Neville e Brooks (2013))

De acordo com NEVILLE e BROOKS (2013), a carbonatação ocorre da superfície para dentro dos materiais. Contudo, alguns parâmetros influenciam diretamente a taxa real de carbonatação: permeabilidade do concreto; teor de umidade; teor de CO2; umidade relativa do meio ambiente.

Poucos estudos relacionam a carbonatação como um potencial de absorção de carbono, quando comparado as emissões diretas de CO_2 devido a calcinação (Jain *et al*.,2015; Higuchi *et al.*, 2014; Ahoutian, Ghouleh e Shao, 2014). Contudo, alguns trabalhos têm abordado a carbonatação como uma estratégia para aumentar a absorção de CO_2, principalmente pelo uso de resíduos de concretos triturados (Andersen *et al.*, 2011; Higuchi *et al.*, 2014; Unluer, 2018), e outros tipos de tecnologias. Algumas dessas tecnologias são apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1 – Tecnologias inovadoras aplicadas aos materiais cimentícios para redução do CO_2

Autor	**Ano**	**Tecnologias Desenvolvidas**
Andersen *et al*.; Monteiro *et a*l.	2011 - 2013	Mineralização de carbonato: fontes sólidas ou líquidas de álcalis, que capturam as emissões dos gases de combustão na fabricação do cimento.
Meyer *et al*.	2018	Cimento sólidia: feito a partir de silicato de cálcio, possuindo menor temperatura de calcinação e menor teor de cal, redução de até 30% no lançamento de CO_2.
Higuchi *et al*.	2014	Concreto – SUICOM: são curados com CO_2, água, calcita e sílica.
Mahoutian, Ghouleh e Shao	2014	Ligantes a base de escoria aglutinada: são curados com CO_2, água, calcita e sílica e para endurecer, necessitam da reação de carbonatação do C_2S.
Al-Tabbaa; Unluer; Dung e Unler;	2013 -2018	Aglutinantes à base de magnésio: formam carbonatos de magnésio hidratado, contribuindo para a resistência.
Unluer e Al-Tabbaa; Dung *et al*.	2014 – 2019	Sistema de cimento MgO reativo carbonatado (RMC).

Autor	Ano	Tecnologias Desenvolvidas
Rossi *et al*; Reddy e Joshi; Alshalif *et al*.	2015-2018-2020	Introdução de bactérias em materiais a base de cimento: O uso de bactérias, como bactérias produtoras de anidrase carbônica (CA), tem potencial para capturar CO_2, convertendo em carbonatos estáveis, acelerando o processo de carbonatação.
Liu *et al*.	2020	Pré carbonatação, durante a mistura do concreto, e carbonatação acelerada, durante a cura do concreto: tem mostrado eficiência na carbonatação, no desenvolvimento de resistência e na densificação das misturas de concreto.

Fonte: Adaptação autores (2024).

Assim, na área de materiais e de tecnologia da construção vários estudos já pontuam os efeitos benéficos da carbonatação quando os materiais são expostos ao dióxido de carbono. Isso se torna um caminho na cooperação da indústria de cimento em produzir materiais neutros em carbono. Chen *et al.* (2022) analisaram os materiais de pasta de cimento que são comumente colocadas em ambientes contendo 1,5% de concentração de CO_2. Ocorre aumento na potencialidade do material em absorver carbono, mitigando assim as emissões de carbono pela indústria de mineração.

Desta forma, o sequestro de dióxido de carbono em concreto recém-lançado tem se tornado uma técnica eficiente, pois promove a mitigação do dióxido de carbono e melhora as propriedades mecânicas do concreto (Assaggaf *et al*., 2017). A maioria das pesquisas abordam diferentes tecnologias de carbonatação. Essas abordagens incluem a pré-carbonatação, durante a mistura do concreto, e o uso de aceleradores de carbonatação, durante a cura do concreto (Meng *et al*., 2022). Foi observado que a carbonatação tratada em idades precoces apresenta efeitos positivos como a densificação da microestrutura e consequentemente a resistência (Liu *et al*., 2020).

3 INVENTÁRIOS NACIONAIS DAS EMISSÕES DE CO_2 PELA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Os inventários nacionais que relatam as emissões de gases de efeito estufa pela indústria de cimento, são baseados nas diretrizes especificadas em 2006 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O documento tem por título: Orientação de boas práticas do IPCC e gestão dos inventários nacionais de gases de efeito estufa. Os dados são reportados pelos países em bancos de dados internacionais, como a UNFCCC. Especificamente, as diretrizes sobre a indústria do cimento estão apresentadas no capítulo 3 do documento, que trata sobre os processos industriais.

Os cálculos das emissões aplicáveis a indústria de cimento são divididos em emissões de produção de energia, emissões provenientes da combustão, e emissões do processo, proveniente do processamento da matéria prima, calcinação (Hakan *et al*., 2018). Para estimar as emissões anuais de CO_2 pela indústria de cimento, o IPCC apresenta dois métodos. O método de nível 1 se baseia em dados da produção de cimento, enquanto o método de nível 2, utiliza dados relativos a produção de clínquer.

O método de nível 1 é aplicado quando não existe dados da produção nacional do clínquer, neste caso são usados dados da produção de cimento. Além disso, é aplicada uma correção para o comercio internacional de clínquer, considerando o clínquer importado e o clínquer exportado, além do tipo de cimento, que varia a fração de clínquer, como é observado na Equação 2. Porém, esse método não é muito consistente com as boas práticas (Eggleston *et al.*, 2006).

$$EPC = PC \times FC - Ci + Ce$$ Equação 2

Em que EPC é a estimativa da produção do clinquer, PC é a produção do cimento, FC é a fração do clinquer, Ci é o clinquer importado e Ce é clinquer exportado.

Os dados relativos a fração de clínquer devem ser coletados, caso contrário uma fração padrão deve ser considerada. Essa fração pode ser de 75%, nos casos em que não é possível desagregar os tipos de cimento, ou existir a suspeita de misturas. Porém, pode-se adotar a fração dada pelo IPCC de 95% de clínquer, nos casos em que a produção foi essencialmente de cimento Portland.

O método de nível 2 é aplicado para estimar as emissões de CO_2 usando dados da indústria da produção de clínquer. Esse método leva em consideração o teor de CaO no clínquer e a correção de perda devido ao pó de cimento que fica nos fornos (CKD). Além disso, trata-se de uma metodologia mais rigoroso, pois agrega dados da produção nacional de clínquer sobre o teor de CaO, sendo expresso como fator de emissão (EF), como é apresentado na Equação 3. Nesta abordagem considera-se que toda fonte de CaO provém de uma fonte de carbonato, caso contrário, se deve realizar um ajuste no fator (Eggleston *et al.*, 2006).

$$Emissões = EF_{clínquer} \times Clínquer\ Produzido \times CKD$$ Equação 3

O pó de forno (CKD) corresponde ao pó não calcinado, podendo ser parcialmente ou totalmente reciclado para os fornos. O fator de correção padrão para o CKD é de 1,02 (correspondendo a uma adição de 2% de CO_2). Caso não ocorre perda de nenhum CKD, o fator de correção é considerado igual a 1,0 (Eggleston *et al.*, 2006).

Além disso, são exigidos para os dois métodos fator de emissão para o clínquer ($EF_{clínquer}$) baseado em estequiometria, como é observado na Equação 4. O fator 0,785 é dado pela razão entre o peso molecular do CO_2 e o peso molecular do CaO. Já o $CaO_{fração}$ é o conteúdo em fração de peso do CaO no clínquer.

$$EF_{clínquer} = 0{,}785 \times CaO_{fração}$$ Equação 4

As informações necessárias no nível 1, é usualmente aceitável adotar um teor de CaO de 65%, resultando em um fator de emissão (EF) de 0,51 de CO_2 por tonelada de clínquer. Além disso, são dadas diretrizes acerca das informações necessárias para compor os arquivos e documentações que farão parte do inventario de cada país. Os dados são apresentados na

Quadro 2.

Quadro 2 – Informações necessárias para compor os arquivos dos inventários

MÉTODO 1	MÉTODO 2
Produção por tipo de cimento.	Produção e teor de clínquer.
Importação e Exportação de clínquer.	Dados de alimentação de carbono para os fornos
Razão clínquer/cimento.	Perdas de pó de cimento no forno.
Teor de CaO do clínquer.	
Perdas de pó de cimento no forno.	

Fonte: Adaptação autores (EGGLESTON et al (2006))

Contudo, os inventários nacionais, independentemente do método utilizado, método 1 ou método 2, devem incluir nos arquivos e documentos os seguintes dados:

I. Especificação da fonte dos dados: do país ou do IPCC;
II. Todas as informações necessárias para a estimativa;
III. As emissões do ano base devem ser recalculadas, caso os métodos nacionais mudem;
IV. Estimativas na medida mínima para manter a confiabilidade.

4 METODOLOGIAS TIER 1 E TIER 2

Os relatórios divulgados pelos países consideram as emissões de CO_2 pela combustão de combustíveis fosseis e pela calcinação, porém nenhuma consideração é feita a respeito da carbonatação. Para que os dados sejam mais precisos, os documentos e as diretrizes devem ser atualizados, adotando metodologias que levem em consideração o processo de carbonatação (Sanjuán *et al*., 2020).

As fundações de pesquisas Cementa AB e o Instituto Sueco de Pesquisa (IVL), publicaram em 2018 um relatório tratando da absorção de CO2 em produtos contendo cimento. O relatório apresenta três modelos de cálculos que podem ser implementados nas novas diretrizes do IPCC, objetivando aprimorar e atualizar os documentos relacionados as emissões líquidas de GEE. Neste trabalho são apresentados apenas os métodos Tier 1 e Tier 2. O método a ser aplicado a um país vai depender do acesso a dados estatísticos acerca do uso de cimentos e concretos.

4.1 MODELO DE ABSORÇÃO DE CO2 TIER 1- METODOLOGIA SIMPLIFICADA

O Tier 1 fornece um método simplificado de cálculo, podendo ser aplicado em quase todos os países. Tratando de um modelo simplificado, ele pode ser aplicado quando existe a ausência de dados que permitam a aplicação do método avançado.

A absorção é estimada a partir dos dados relacionados as emissões de calcinação, a partir da produção do clínquer do país e da quantidade de clínquer importado e exportado. O relatório considera a absorção de CO_2 no concreto no período de vida (uso da estrutura), em fim de uso (demolição, britagem) e uso secundário após a demolição. As emissões relatadas pelos países sobre a calcinação do clínquer consumido, são relacionadas com os valores de absorção anuais de dióxido de carbono (ACDU), de acordo com as Equações 5 e 6, em 10^3 toneladas de CO_2.

$$\text{ACDU (service life)} = \alpha \text{ X Reported calcination emissions} \qquad \text{Equação 5}$$

ACDU (end-of-life) = β X Reported calcination emissions Equação 6

Para as constantes α e β, considera-se, respectivamente, que 20% das emissões são absorvidas durante a vida útil do material cimentício e 3% podem ser absorvidas, após a vida útil, por meio de utilização dos resíduos como agregados reciclados (Sanjuán *et al*., 2020). Portanto, o valor médio proposto pelo método simplificado corresponde a 23% da calcinação.

4.2 Modelo de Absorção de CO_2 Tier 2 – Metodologia Avançada

O modelo Tier 2, trata-se de um cálculo mais avançado, podendo ser usado nos grupos de cálculos específicos a cada país. Esse modelo tem o potencial de apresentar dados sobre a absorção de CO_2 mais próximos a realidade, quando comparado ao modelo simplificado (Tier 1). A metodologia proposta para o Tier 2 é baseada na absorção nacional de CO_2 nas estruturas de concreto, reportada pelos países nas seguintes fases: estruturas existentes ainda em uso; estruturas demolidas, britagem de resíduos e estocagem.

As seguintes descrições tratam das etapas necessárias à aplicação do método avançado:

- Identificação das estruturas típicas de concreto. Ao menos 5 tipos de estruturas correntes são necessárias e correspondem a um consumo de 65% de cimento: pontes, prédios residenciais; prédios de escritórios; telhados; pavimentos; e argamassa;
- Cálculo da absorção de CO2 por m3 de concreto para cada aplicação do material cimentício, em função do tempo.

A Equação 7 abaixo, formulada a partir do método *Tier* 2 é aplicada ao cálculo da absorção de CO_2:

$$(CO_2)\ uptake = C \times CO_{2max} \times DoC \times \left(K_{CO_2} \times \sqrt{\frac{T}{1000}}\right) \times \frac{S}{V} \qquad \text{Equação 7}$$

Sendo:

(CO_2) uptake: absorção de teor de dióxido de carbono (kg CO_2);

CO_{2max}: teor máximo de dióxido de carbono que pode ser absorvido ($\frac{KgCO2}{Kg\ cimento}$);

C: cimento (kg);

Doc: grau de carbonatação (mm/ano^{0,5});

T: tempo (anos);

S/V: Proporção de superfície por volume (m²/m³).

A parcela (K_{CO_2} x $\sqrt{\frac{T}{1000}}$) corresponde a quantidade de CO_2 fixada na matriz de cimento. De acordo com Sanjuán *et al*., (2020), o principal termo na equação é a seleção coerente do fator superfície por volume (S/V). As relações S/V aplicadas em seu estudo com cimentos portugueses foram obras civis, edificações e argamassas.

O teor máximo de dióxido de carbono que pode ser absorvido é calculado segundo a Equação 8. O fator clínquer é determinante para o resultado, variando o CO_2 conforme o tipo de cimento de cada região e país.

$$CO_{2máx} = \frac{COreativo}{100} \times C \times \frac{MCO2}{MCaO} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

$CaO_{reativo}$: Para a composição química do cimento este valor corresponde a 65% em reação;

C: cimento (kg);

$\frac{MCO2}{MCaO}$: correspondem a massa molar do dióxido de carbono, considerada 44g/mol, e a massa molar do óxido de cálcio, considerada 56.1 g/mol, respectivamente.

Vale ressaltar que o quantidade de cimento (C) é o valor de acordo com a proporção do clínquer, esse valor aumenta em proporções elevadas de clínquer

5 RESULTADOS DE ALGUMAS PESQUISAS

Os métodos Tier 1 e Tier 2 já vem sendo aplicado a alguns estudos. Para a verificação dos estudos publicados a cerca desse tema foi realizado uma revisão da literatura. Neste artigo, usou-se a lista de bases de grande importância, Web of Science e Scorpus (Elservier). Os filtros aplicados na pesquisa estão apresentados na Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 – Pesquisa lista de base

Base Utilizada	Filtro
Web of Science	*Climate change*
	Climate models
	Carbon dioxide uptake
	Cement industry
	Carbonation
Scorpus (Elservier)	*Climate change*
	Climate models
	Carbon dioxide uptake
	Cement industry
	Carbonation

Fonte: Adaptação autores (2024)

A

Quadro 4 apresenta os estudos publicados de 2010 a 2023 referentes a aplicação de modelos para realização do cálculo de absorção de CO2 por materiais cimentícios.

Quadro 4 – Artigos publicados que apresentam o cálculo de absorção de CO_2.

Autores (ano)	Objetivo do estudo	Principais resultados
Haglund M., Stripple H. & Andersson R (2013).	O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo simplificado para calcular o ciclo de CO_2 em estruturas de concreto. O modelo se fundamenta na profundidade de penetração da zona carbonatada.	O modelo permite quantificar a absorção nacional de CO_2 hoje e demonstra o potencial para aumentar a absorção a longo prazo.
Yang H. K., Seo E., Tae S. (2014)	O estudo apresentou um modelo matemático que expressa a quantidade de CO_2 absorvível pela carbonatação, relacionando o tempo decorrido e a área da superfície de concreto exposto.	Estimou-se que a absorção de CO_2 por materiais cimentícios foi de 15,5% a 17% das emissões de CO_2 da produção de concreto.
Daragh F. & Mark G. R. (2015)	O artigo apresenta a metodologia e os resultados de uma investigação preliminar sobre o sequestro de CO_2 pelo concreto na Irlanda.	A quantidade de CO_2 calculada para ser naturalmente absorvida em concretos foi de 75 kg/ t de cimento.
Xi F. *et al.* (2016)	Estimar a absorção de CO_2 de materiais cimentícios usando um modelo analítico que descreve a química da carbonatação.	O estudo estimou que cerca de 4.5 Gt de CO_2 foi absorvido por materiais cimentícios carbonatado entre 1930 a 2013.
Sanjuan, M. *et al*. (2020)	Calcular as emissões líquidas de CO_2 pela indústria do cimento português. Para isso, foram aplicados o método simplificado e o método avançado.	Aplicando o método simplificado foi estimado que 8,7 milhões de toneladas de CO_2 estão disponíveis para absorção pelos materiais cimentícios. Contudo, aplicando o método avançado *Tier* 2, cerca de 9,1 milhões de toneladas de CO_2 estão disponíveis para absorção pelos materiais compostos a partir de cimentos portugueses produzidos entre 2005 a 2015.
Sanjuan, M. *et al*. (2020)	Este artigo avaliou as emissões líquidas de CO_2 pela indústria de cimento da Espanha. O método aplicado foi proposto pelo "projeto de recarbonatação" e utiliza-se apenas do *tier 1*.	31,3 milhões de toneladas de CO_2 será absorvido pelos materiais cimentícios produzidos na Espanha entre 2005 a 2015.

Alguns pontos nos estudos de Sanjuan *et al*. (2020) ainda podem ser destacados:

- Baseado na quantidade de cimento consumido em Portugal, de 2005 a 2015, foi possível fazer uma importante estimativa. a absorção de dióxido de carbono durante o período de produção de dez anos (2005-2015) passou de 5,6 para 7,4 milhões de toneladas de 2050 a 2100.

Consequentemente, a percentagem de absorção de dióxido de carbono, considerando as emissões brutas absolutas de CO_2 do processo situaram-se entre 14,7% e 19,6;

- O processo de calcinação entre 2005 e 2015, lançou 37,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera;
- Os modelos simplificado e avançado devem ser analisados por especialistas em materiais cimentícios de cada país. Desta forma, os cálculos aplicados na metodologia dos inventários nacionais de GEE podem ser mudados.

A principal perspectiva para o futuro está na avaliação da absorção de CO2 pelos Resíduos de Construção e Demolição - RCD (Souto-Martinez *et al*., 2017; Jang *et al*., 2016; Zee e Zeman, 2016; Yang, Seo e Tae, 2014; Ueno *et al*., 2013; Andersson *et al*., 2013; Collins, 2010).

6 CONCLUSÕES

Este estudo permitiu apresentar os métodos que podem ser aplicados para estimar a absorção de CO_2 pelos materiais cimentícios. A metodologia simplificada (Tier 1) e a metodologia avançada (Tier 2) permitem obter os resultados de absorção do dióxido de carbono, a partir de dados estatísticos da produção de cimento do país avaliado. Para as novas diretrizes do IPCC e as publicações dos inventários anuais existem uma tendência a incorporação desses valores nas análises e posteriores dados publicados. A carbonatação deve ser considerada e um estudo aprofundado deve ser realizado por cada país, quando é aplicado o Tier 2. Além disso, esses modelos podem ser adaptados a cada região, e assim aplicados a cada tipo de cimento produzido.

REFERÊNCIAS

A.F. ALSHALIF, et al. A systematic review on bio-sequestration of carbon dioxide in bio-concrete systems: a future direction. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020.

AL-TABBAA A. Reactive magnesia cement, Eco-efficient concrete. Woodhead Publishing, 2013.

ANDERSEN, S. et al. Sequestration of Carbon-Consensus. Findings of the Scientific Synthesis Team. 2011.

ANDERSSON, R.; et al. Calculating CO2 Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life. Environmental Science & Technology, 2013.

BENHELAL, Emad; SHAMSAEI, Ezzatollah; RASHID, Muhammad Imran. Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review. Journal of Environmental Sciences, v. 104, p. 84-101, 2021.

B. Liu, J. Qin, J. Shi, J. Jiang, X. Wu, Z. He. New perspectives on utilization of CO2 sequestration technologies in cement-based materials. Construction and Building Materials, 121660 (2020)

CEMENTA AB: “Roadmap Cement for a Climate Neutral Concrete Production”. (“Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggand”). Report, Stockholm, Sweden, 2018.

COLLINS, F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. The International Journal Of Life Cycle Assessment, 2010.

DUNG N. et al. Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations. Cement and Concrete Research, 2019.

EGGLESTON, S., Buendia, L. & Miwa, K. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 3 Industrial Processes and Product Use

(Institute for Global Environmental Strategies, 2006).

EGGLESTON, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Institute for Global Environmental Strategies, 2006).

Fitzpatrick, D.; Nolan, É.; Richardson, M. Sequestration of carbon dioxide by concrete Infrastructure: A preliminary Investigation in Ireland. J. Sustain. Architect. Civ. Eng. 2015, 1, 66–77.

GUO, Y., et al. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. Journal of Environmental Sciences, 2023.

HÂKAN S., et al. CO2 uptake in cement – containing products: Background and calculation models for IPCC implementation. Cementa AB and IVL research foundation, 2018.

HIGUCHI T., et al. Development of a new ecological concrete with CO2 emissions below zero. Construction and Building Materials, 2014.

HIGUCHI, T. et al. Development of a new ecological concrete with CO2 emissions below zero. Construction and building materials, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Cement Subsector. Paris, 2022. Disponível em <https://www.iea.org/reports/cement>. Acessado em: 02 de junho de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Cement. Paris, 2020.

JAIN J., et al. Performance of calcium silicate-based carbonated concretes vs. hydrated concretes under freeze-thaw environments. Solidia Technologies, White Paper 2015.

JANG, J.; et al. Review on recent advances in CO2 utilization and sequestration technologies in cement-based materials. Construction And building materials, 2016

M. MAHOUTIAN, Z. GHOULEH, Y. SHAO. Carbon dioxide activated ladle slag binder. Construction and Building Materials, 2014.

M.S. REDDY, S. JOSHI. Carbon dioxide sequestration on biocement-based composites. Cementitious construction materials, 2018.

N. Dung, C. Unluer. Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms. Cement and Concrete Research, 2018.

NEVILLE, Adam M. Tecnologia do concreto. Bookman Editora, 2013.

Nygaard, P.V.; Leemann, A. Carbon dioxide uptake of reinforced concrete structures due to carbonation. Abteilung Beton/Bauchemie. In Cemsuisse Projekt 201106, 1st ed.; EMPA: Dübendorf, Switzertland, 2012.

P.J. Monteiro, et al. Incorporating carbon sequestration materials in civil infrastructure: a micro and nano-structural analysis. Cement and Concrete Composites, 2013.

PLAZA, Marta G.; MARTÍNEZ, Sergio; RUBIERA, Fernando. CO2 capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations. Energies, 2020. ROSSI F., et al. Microbial fixation of CO2

in water bodies and in drylands to combat climate change, soil loss and desertification. New Biotechnology, 2015.

SAADE, Marcella Ruschi Mendes; YAHIA, Ammar; AMOR, Ben. Is crushed concrete carbonation significant enough to be considered as a carbon mitigation strategy?. Environmental Research Letters, 2022.

SANJUÁN, M. Á., et al. Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A Spanish case study. Applied Sciences, v. 10, n. 1, p. 339, 2020.

SANJUÁN, M. A., et al. Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. Applied Sciences, v. 10, n. 2, p. 646, 2020.

SANJUÁN, M. A., et al. Carbon dioxide uptake in the roadmap 2050 of the Spanish cement industry. Energies, v. 13, n. 13, p. 3452, 2020.

SILFWERBRAND, Johan. Concrete and Sustainability–Some Thoughts from a Swedish Horizon. Nordic Concrete Research, 2020.

SOUTO-MARTINEZ, A et al. A mathematical model for predicting the carbon sequestration potential of ordinary portland cement (OPC) concrete. Construction and building materials, v. 147, p.417-427, 2017.

YANG, K-H.; SEO, E-A.; TAE, S-H.. Carbonation and CO2 uptake of concrete. Environmental Impact Assessment Review, 2014.

UENO, A.; et al. Evaluation of visual methods for CO2 uptake by demolished concrete: Research activities by JSCE subcommittee 219. Construction And Building Materials, 2014.

UNLUER, C. Carbon dioxide sequestration in magnesium-based binders, Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials. Woodhead

Publishing, 2018.

ZEE, S. V. der; ZEMAN, F.. Production of carbon negative precipitated calcium carbonate from waste concrete. The canadian journal of chemical engineering, 2016

Xi, F.; Davis, S.J.; Ciais, P.; Crawford-Brown, D.; Guan, D.; Pade, C.; Shi, T.; Syddall, M.; Lv, J.; Ji, L.; et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. Nat. Geosci. 2016, 9, 880–883

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MAP ENGENHARIA

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO

Ana Estrócio, Diretora da Qualidade, Segurança e Ambiente, MAP Engenharia

RESUMO

A construção é uma indústria com um impacte relevante e crucial no desenvolvimento sustentável exigindo cada vez mais a adoção de técnicas e de métodos responsáveis, que se revelem fundamentais na contribuição inegável para a preservação do meio ambiente, para a utilização eficiente dos recursos, para o crescimento económico estável e para uma resposta concreta às mais prementes preocupações sociais. Deste modo, a construção sustentável torna-se um dever para com a comunidade. Em obra, a incorporação de materiais de construção sustentáveis pelas construtoras obedece ao cumprimento diligente das linhas orientadoras que cada projeto define. A atuação das construtoras fica assim condicionada, desde o início, pelo tipo de cliente que assiste. A presença de clientes sensíveis e conscientes da importância do desenvolvimento sustentável, com uma preocupação primordial pelas gerações futuras, facilita a desejável relação harmoniosa entre o que se pretende e os atuais compromissos. Já a presença de clientes onde estas prioridades e preocupações não estão em primeira linha convoca o papel fundamental de influência que as construtoras devem assumir e que se concretiza essencialmente na apresentação de sugestões e alternativas aos materiais indicados em projeto. Indo além dos materiais de construção a incorporar em obra, é ainda fundamental olhar-se para os materiais de apoio à construção, que não incorporam a obra como produto final, mas que contribuem para a sua execução e que são também peça fundamental para o crescimento sustentável. Neste âmbito, é elementar que o mercado acompanhe estas premissas e que disponibilize meios e recursos com fatores preponderantes em matéria ambiental, onde seja possível aumentar e influenciar o ciclo de vida do produto, tornando a oferta igualmente apelativa em termos financeiros. A construção sustentável representa uma mudança de paradigma no setor, consciente de que irá influenciar a competitividade quanto aos prazos, aos custos e aos recursos necessários, sendo emergente a criação e atualização de elementos regulamentares e legislativos, para uma uniformização e uma competitividade assertiva entre todos os intervenientes.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade, Sustentabilidade, Materiais de Construção

1 INTRODUÇÃO

Sabendo-se que o setor da construção continua a ser responsável por 40% das emissões anuais de carbono a nível mundial, a construção sustentável surge como uma obrigação ética e social para com a comunidade. Esta abordagem exige a implementação de práticas que minimizem os impactes ambientais negativos, que promovam a eficiência energética, reduzam a emissão de resíduos e incentivem a reutilização de materiais. Para isso, torna-se essencial a incorporação de materiais de construção sustentáveis, que são aqueles produzidos de forma a minimizar os danos ao ecossistema, sejam eles reciclados, reutilizáveis ou obtidos de fontes renováveis.

As construtoras, ao desenvolverem seus projetos, são orientadas por diretrizes rigorosas que variam conforme as especificações e expectativas de cada cliente. Desde o início, o tipo de cliente e as suas exigências específicas determinam o nível de compromisso com a sustentabilidade que se consegue adotar em cada obra. Assim, a responsabilidade com a sustentabilidade reflete-se em todas as fases do processo construtivo, desde a escolha dos materiais até a execução das obras, garantindo que o resultado final esteja alinhado com os princípios de uma construção sustentável.

A construção sustentável não é apenas uma tendência, mas uma necessidade para garantir um futuro mais equilibrado e consciente. Ao integrarem práticas sustentáveis, as construtoras contribuem para um desenvolvimento que respeita o meio ambiente e promove o bem-estar social e económico, destacando-se como agentes fundamentais na construção de um mundo mais sustentável e justo para as gerações presentes e futuras.

2 O QUE PODEMOS FAZER

Os materiais de apoio à construção são um pilar para a sustentabilidade na construção civil. Esta enfrenta um desafio crucial no contexto do desenvolvimento sustentável porque além de dever incorporar materiais ecológicos nas obras, deve também dar atenção aos materiais de apoio à construção. Estes materiais, que não fazem necessariamente parte do produto final, desempenham um papel fundamental na execução de obras e na disseminação de um crescimento sustentável. A reflexão sobre o impacte ambiental destes custos (ou investimentos se preferirmos) é tão necessária como a análise dos materiais diretamente incorporados nas construções, dado que estes influenciam o ciclo de vida da obra e podem contribuir significativamente para a eficiência ambiental e económica do setor. Os materiais de apoio à construção incluem elementos como: cofragens para betão, andaimes, barreiras de proteção, ferramentas e equipamentos diversos. Embora não façam parte da estrutura final, a sua escolha e utilização têm implicações ambientais e económicas profundas. A adoção de práticas sustentáveis neste aspeto pode ajudar a reduzir desperdícios, melhorar a eficiência energética e promover o uso racional dos recursos naturais.

2.1 EXEMPLOS DE MATERIAIS DE APOIO SUSTENTÁVEIS

Cofragens para Betão Reutilizáveis: as cofragens de betão tradicional, geralmente em madeira, são descartadas após poucas utilizações. Em oposição, formas feitas de metal ou plástico reciclado podem ser reutilizadas várias vezes, reduzindo significativamente o desperdício de madeira e a necessidade de desflorestação.

Andaimes de Alumínio Reciclado: Os andaimes são essenciais para a construção, mas os tradicionais feitos de aço consomem uma grande quantidade de energia na sua produção. Optar por andaimes de alumínio reciclado não só diminui o impacte ambiental, como também oferece uma alternativa mais leve e duradora (o que facilita o transporte e a montagem).

Barreiras de Proteção em Plástico Reciclado: Em vez de utilizar barreiras de proteção descartáveis, as empresas podem investir em barreiras feitas de plástico reciclado, que são reutilizáveis e ajudam a reduzir a quantidade de resíduos gerados durante as obras.

Ferramentas e Equipamentos Elétricos Eficientes: A escolha de ferramentas e equipamentos com maior eficiência energética, ou daqueles que utilizam fontes de energia renovável, contribui para a redução da pegada de carbono da construção. Um exemplo é o uso de geradores de energia solar para alimentar ferramentas elétricas no local da obra.

3 A EVOLUÇÃO DO MERCADO VS SUSTENTABILIDADE

Para que a construção sustentável se torne uma realidade abrangente, é essencial que o mercado acompanhe essas mudanças e ofereça opções ambientalmente responsáveis e viáveis economicamente. As empresas precisam de ter acesso a uma variedade de materiais de apoio sustentáveis que não apenas contribuam para a redução de impactes ambientais, mas que também sejam atrativos em termos de custo-benefício. Se dermos prioridade à sustentabilidade na escolha de materiais de apoio, é possível prolongar o ciclo de vida dos produtos e minimizar a necessidade de produção de novos recursos. Por exemplo, como já referido relativamente ao betão, se optarmos por cofragens para betão reutilizáveis e andaimes de alumínio reciclado, a frequência de substituição desses materiais será reduzida e capaz de promover uma economia circular.

4 CONCLUSÕES

A transição para uma construção mais sustentável vai muito além da escolha de materiais incorporados na obra. É imperativo considerar também os materiais de apoio, que embora invisíveis no produto final, desempenham um papel fundamental na eficiência e na sustentabilidade do processo construtivo. A evolução do mercado e a criação de regulamentações adequadas são também passos cruciais para garantir que a construção sustentável não seja apenas uma opção, mas uma prática padrão que beneficia o meio ambiente, a economia e a sociedade como um todo.

REFERÊNCIAS

EMPIC, Relatório do Setor da Construção em Portugal 2022

Estudo “Scaling Low-Carbon Design and Construction with Concrete: Enabling the Path to Net-Zero for Buildings and Infrastructure”, Boston Consulting Group (BCG) & World Economic Forum (WEF)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MAARIS: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E ADAPTAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

Maria Ana Benoliel [a]; Patrícia Dinis Ferreira[a]; Cristina Matos Silva[a]

[a] (CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), maria.ana.benoliel@tecnico.ulisboa.pt

[a] (CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), patrícia.dinis.ferreira@tecnico.ulisboa.pt

[a] (CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), cristina.matos.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O desenvolvimento urbano e crescimento populacional agravaram as alterações climáticas, a poluição atmosférica e as pressões ambientais sobre os ecossistemas. Consequentemente, o quadro político atual inclui metas de descarbonização, melhoria da qualidade do ar e sustentabilidade da construção. As infraestruturas de transporte, como as estações ferroviárias, constituem uma fração significativa do tecido edificado urbano, possuindo uma vida útil superior à de outros edifícios e movimentando diariamente uma multiplicidade de passageiros. Torna-se, então, importante potenciar a sua sustentabilidade, criando-lhes ambientes internos de elevada qualidade. Neste estudo, apresenta-se uma metodologia de apoio à decisão para avaliação e adaptação da sustentabilidade de infraestruturas ferroviárias, estruturada em três etapas. Após recolha de informações de contexto, a estação real é avaliada e classificada em critérios pré-definidos de desempenho ambiental, identificando-lhe os seus pontos críticos. Seguidamente, são elaboradas soluções de melhoria, avaliando-as e classificando-as para os mesmos critérios. A decisão final baseia-se na análise multicritério, e, quando necessário, custo-benefício da situação real e das alternativas. Aplica-se um caso de estudo nacional, identificando-se pontos críticos na gestão de recursos, iluminação natural, ajardinamento e ambiente interior. A análise multicritério das alternativas (infraestruturas verdes, abrigos bioclimáticos, monitorização climática, melhoria da gestão de recursos energéticos) favorece apenas três.

Palavras-chave: Estações ferroviárias, Sustentabilidade, Metodologia de avaliação

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas, a poluição atmosférica e as pressões ambientais sobre os ecossistemas têm-se agravado em consequência do desenvolvimento urbano e crescimento populacional (Edwards *et al.*, 2018; Sustainable Mobility for All, 2017). Visando reverter estas tendências, a Assembleia Geral das Nações Unidas estabeleceu um conjunto de metas universais, designadas Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) (United Nations General Assembly, 2015). Para além disso, o quadro político atual inclui planos para a descarbonização, a melhoria da qualidade do ar e a criação de soluções construtivas mais sustentáveis.

Os edifícios de transporte, tais como as estações ferroviárias, possuem um papel importante neste panorama, constituindo uma fração significativa do tecido edificado urbano e acolhendo diariamente uma multiplicidade de passageiros, que aí permanecem durante um período considerável do seu trajeto (Nolte e Kanburrow, 2012; UIC, 2019). Estes edifícios são, ainda, caracterizados por um tempo de vida útil elevado, o que se reflete na duração de possíveis impactes derivados, por exemplo, da sua operação (Ji *et al.*, 2021; Marsh, 2017).

Tendo em conta as metas globais estabelecidas, a estratégia de construção e reabilitação destas infraestruturas tem, pois, vindo a ser repensada de forma a garantir a integração de princípios de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do edifício (Nolte e Kanburrow, 2012; UIC, 2019;Fracchia *et al.*, 2012; Hickman *et al.*, 2018; Leemans *et al*., 2015; Mohamed *et al*., 2008; Yariv e Wilson, 2015; RSSB, 2016; Rzepnicka e Załuski, 2017; Sharma e Newman, 2017; Tsimplokoukou *et al*., 2014). Entre as medidas implementadas, destacam-se o projeto bioclimático, a utilização de materiais sustentáveis e implementação de infraestruturas verdes urbanas, bem como como a utilização de equipamentos eficientes e a utilização de fontes alternativas de energia e água (AREP, 2020; Asian Development Bank, 2015; Fracchia *et al*., 2012; Leemans *et al*., 2015; Rzepnicka e Załuski, 2017)

Todavia, o processo decisório para a escolha de cada uma destas medidas é influenciado por uma série de fatores, tais como os interesses dos participantes, as características dos edifícios a construir/reabilitar e os impactes ambientais, custos e benefícios associados a cada intervenção. Neste sentido, o desenvolvimento e utilização de ferramentas de análise de desempenho e de apoio à decisão torna-se importante para minimizar incertezas e permitir a escolha de soluções eficazes (Guenther e Hueske, 2017; Lingqvis *et al.*, 2018).

No âmbito da análise de desempenho, para o caso específico das infraestruturas de transporte, têm sido utilizados sistemas de certificação como o BREEAM e o LEED. Porém, estes sistemas são universais e geralmente não desenhados para avaliação direta de um edifício de transporte público, tornando-se necessário adaptar a avaliação ao edifício que se quer certificar (Markelj *et al.*, 2013). Mais ainda, as auditorias requerem o auxílio de um profissional qualificado, o que se traduz num custo adicional no decorrer do processo.

A criação de metodologias desenhadas especificamente para avaliação e melhoria da sustentabilidade de edifícios de transporte, torna-se, por isso, relevante para aumentar a eficácia e eficiência do processo.

Porém, no âmbito do presente estudo, foram identificadas apenas quatro ferramentas deste tipo já desenvolvidas para sistemas de transporte (Crutel; 2018; Indian Green Building Council; 2017; Interreg Sudoe Stop CO2; 2017; Sustation; 2014). As metodologias desenvolvidas pelo Indian Green Building Council (2017), Interreg Sudoe Stop CO2 (2017) e Sustation (2014) são sistemas de certificação desenhados especificamente para avaliação do desempenho de sustentabilidade para a situação de base, sem avaliar ou comparar possíveis hipóteses de melhoria desse desempenho. A metodologia

desenvolvida por Crutel (2018), por outro lado, é uma ferramenta para implementação na fase de projeto, que contempla apenas a avaliação, comparação e modelação dos impactes ambientais e sociais, bem como os custos totais, associados a propostas de construção e reabilitação estabelecidas nesta fase. Porém, não contempla a certificação do desempenho da estação na fase de projeto, nem considera o custo benefício associado à implementação de cada alternativa proposta.

Assim, embora constituam ferramentas de apoio à decisão úteis, as metodologias analisadas ainda não permitem realizar, simultaneamente, a avaliação da situação de base (identificando os seus pontos críticos) e a escolha, modelação e comparação soluções de melhoria adaptadas a cada contexto, facilitando assim o desenrolar do processo decisório.

O presente trabalho pretende colmatar esta lacuna, apresentando uma ferramenta que combina a certificação de desempenho com a análise de soluções de melhoria desse mesmo desempenho, em diversos parâmetros relacionados com a sustentabilidade e incluindo as visões dos diversos participantes no processo. Pretende-se ainda desenvolver um conjunto de linhas de ação que apoiem a implementação de estruturas mais sustentáveis e confortáveis, com ambientes internos de elevada qualidade.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E ADAPTAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

A metodologia para a avaliação e adaptação da sustentabilidade de infraestruturas ferroviárias (MAARIS) combina a certificação ambiental (que permite identificar e testar aspetos relacionados com o desempenho sustentável da estação que avalia) com a modelação de soluções de melhoria através de análise multicritério e custo-benefício, utilizadas no apoio à decisão em situações em que existem vários caminhos possíveis. A estrutura metodológica está organizada em três passos, conforme ilustrado na Figura 1.

O primeiro passo consiste na recolha de informações de contexto necessárias ao desenvolvimento dos passos subsequentes, incluindo detalhes da estação. O segundo passo consiste numa caracterização e avaliação de desempenho ambiental da estação, segundo três módulos distintos (M1, M2 e M3). Cada módulo subdivide-se numa série de categorias, contendo indicadores segundo os quais são organizados e analisados os dados recolhidos, de modo a facilitar o levantamento e sistematização da informação.

A cada categoria está, ainda, associado um conjunto de critérios (C1 a C20) possuindo diferentes ordens de importância (pesos) e segundo os quais será realizada a avaliação de desempenho e serão identificados os pontos críticos de melhoria. Neste âmbito, é atribuído a cada critério uma determinada classificação de desempenho, tendo em conta as principais linhas de ação para a sustentabilidade identificadas na literatura (AREP, 2020; Asian Development Bank, 2015; Casals *et al.*, 2014; Dursun *et al.*, 2020; Fracchia *et al.*, 2012; Guenther e Hueske, 2017; Hickman *et al.*, 2018; Indian Green Building Council, 2017; UIC, 2015; Leemans *et al.*, 2015; Mazzino *et al.*, 2017; Mohamed *et al.* 2008; Nolte e Kanburrow, 2012; Qian *et al.*, 2019; RSSB, 2016; Rzepnicka e Załuski, 2017; Schirmar *et al.*, 2013; Sharma, 2017; Sustainability West Midlands, 2015; Tsimplokoukou *et al.*, 2014; Zemp *et al.*, 2008, Alwi *et al*., 2014; Network Rail, 2018; RSSB, 2016; Sinclair *et al.*, 2020).

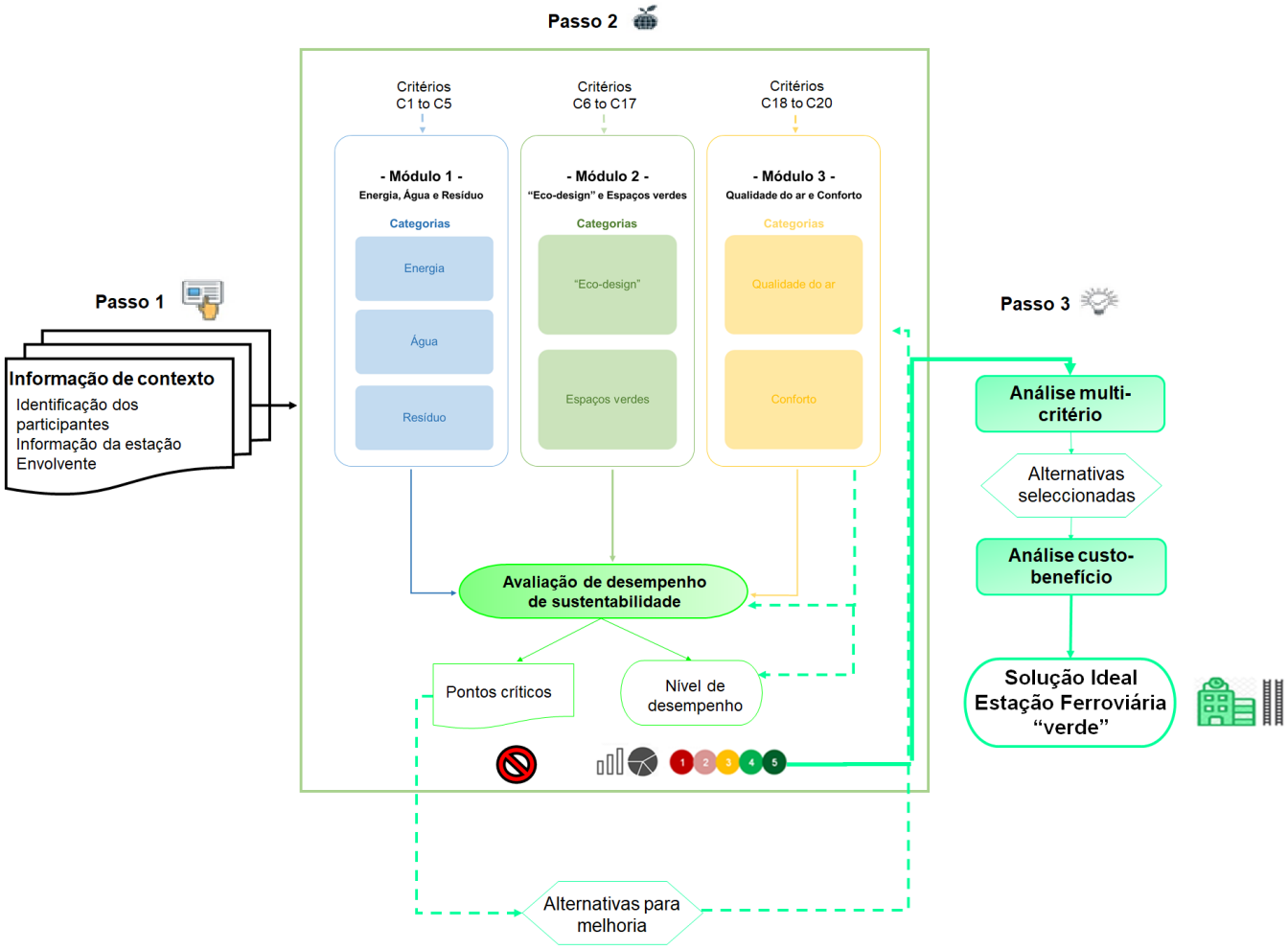


Figura 1 – Metodologia MAARIS

O terceiro passo envolve a elaboração de soluções para responder aos pontos críticos identificados no passo 2. As alternativas são avaliadas de acordo com os mesmos critérios e comparadas entre si e com a solução de base recorrendo à uma análise multicritério, para o que se utilizam as classificações obtidas para cada alternativa, nos critérios analisados, bem como a ordens de importância (pesos) atribuídos a cada um desses mesmos critérios.

A solução final é calculada por um método multicritério de sobreclassificação, considerando os pontos fortes e fracos de cada alternativa e não descartando a possível incomparabilidade das diversas soluções em estudo. Testam-se duas estruturas de decisão: uma estrutura seletiva, baseada do processo decisório real e uma estrutura de ordenação utilizando limiares de preferência.

No final do processo, em casos inconclusivos ou que necessitem de mais informação para o processo decisório, poderá ser aplicada uma análise de custo-benefício para aferição da melhor alternativa a aplicar em cada caso.

O objetivo será criar uma estação que obedeça princípios e linhas de ação para a sustentabilidade da forma mais adequada conforme as suas características e o contexto em que opera.

2.2 CASO DE ESTUDO NACIONAL

O caso de estudo é desenvolvido para uma estação ferroviária de Lisboa, Portugal, que, pelas suas características, densidade ocupacional, localização e operação, se apresenta como um edifício interessante para aplicação da metodologia apresentada.

A referida estação opera como parte de uma interface intermodal, em conexão com o metro, os autocarros, o serviço de táxis e o serviço partilhado de bicicletas e trotinetes elétricas, funcionando assim como um ponto de transferência de passageiros de e para o centro da cidade (Matos Silva *et al.*, 2019; Varela, 2016).

Na sua envolvente, a uma distância de 500-650m do edifício, encontram-se duas grandes zonas verdes urbanas, vários serviços comerciais, áreas de escritório e de assistência municipal, áreas residenciais, bancos, universidades e escolas, restaurantes e cafés. Na frente, existe ainda um importante centro hospitalar e, a uma curta distância, um parque onde podem ser carregados carros elétricos. Dentro da estação, no entanto, não existem muitas áreas comerciais à exceção de um supermercado, inaugurado em 2019.

O edifício principal divide-se em três pisos (piso térreo, *mezzanine*/piso intermédio e piso de plataformas) e duas zonas de passagem laterais (túneis), que fazem a ligação direta entre o exterior e as plataformas. Existe ainda um piso enterrado que faz a ligação intermodal ao metropolitano. Os fluxos de passageiros são consistentes com esta arquitetura, já que, durante as horas de ponta da manhã e coincidindo com a chegada de passageiros ao destino, verificam-se maiores fluxos no sentido descendente (das plataformas para a entrada). Inversamente, nas horas da ponta da tarde, coincidindo com o regresso dos passageiros à origem, os fluxos são mais elevados no sentido ascendente (da entrada para as plataformas). Tendo em conta a densidade de passageiros verificada face à disposição da estação, constatou-se que o fornecimento de bancos e zonas de espera não são adequadas aos atuais níveis de ocupação do edifício.

Como participantes-chave no processo decisório, foram identificados o gestor de infraestrutura e "dono da estação" (Infraestruturas de Portugal - I.P), os operadores ferroviários (Comboios de Portugal - C.P. e Fertagus), os passageiros, os empregados e os utentes ocasionais da estação. Estes participantes já foram entrevistados no âmbito de um inquérito de preferências levado a cabo na mesma estação (Benoliel *et al.*, 2021) e deverão ser também contactados relativamente às atuais propostas de melhoria.

Os parágrafos seguintes apresentarão os resultados da aplicação em maior detalhe. Serão ainda comparadas as quatro alternativas possíveis face à situação inicial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da avaliação de desempenho e propostas de melhoria foram obtidos através da análise da informação providenciada pelo gestor de infraestrutura, assim como a recolhida em visitas à estação e inquéritos aos utilizadores (Benoliel *et al.*, 2021). Esta informação foi compilada no passo 1.

Em seguida, apresenta-se uma breve análise de desempenho da estação. Os resultados são apresentados para cada módulo (M1, M2 e M3), dividindo a avaliação nas diversas categorias estudadas.

Em M1 (Energia, Água e Resíduos) registaram-se pontos críticos ao nível da eficiência energética de alguns equipamentos (por exemplo, elevadores), bem como na utilização da água da torneira, que poderia ser ainda mais otimizada. Ao nível da gestão de resíduos, verifica-se a existência de contentores de plásticos e cartão no exterior do edifício, sem que existam, no entanto, contentores de separação de resíduos dentro do edifício da estação. Como pontos positivos, registou-se a utilização parcial de iluminação LED no edifício principal, bem como a produção de energia alternativa (re-injetada na rede) através de painéis solares instalados na cobertura da plataforma. Registou-se, ainda, a utilização de sensores e temporizadores para alguns equipamentos de iluminação e para a totalidade dos equipamentos de gestão da água.

Em M2 ("Eco-design" e Espaços verdes), a avaliação foi efetuada apenas em relação aos espaços verdes, já que, não sendo a estação em análise um edifício moderno, e não tendo sofrido renovações recentes ao nível da sua estrutura de base, analisar a sustentabilidade dos materiais que o constituem pelos parâmetros atuais poderia resultar em conclusões enviesadas. No entanto, verifica-se uma deterioração generalizada dos materiais, com necessidade de substituição e limpeza. Foi registado que os espaços verdes afetos à estação ocupam uma área muito reduzida, sendo compostos por canteiros de plantas baixas. No entanto, as espécies utilizadas foram identificadas como espécies mediterrânicas bem adaptadas ao clima, e sem necessidade de muita manutenção ou rega.

Em M3 (Qualidade do Ar e conforto) registaram-se, entre os pontos positivos, o facto de a estação possuir uma grande área de envidraçado, sendo a sua ventilação maioritariamente natural. Foram registados entre os pontos negativos a atual inexistência de monitorização da qualidade do ar ou dos níveis de ruído no interior da estação. Os níveis de poluição exterior são elevados e devidos essencialmente ao tráfego automóvel, sendo que o ruído exterior é aceitável. No entanto, as barreiras acústicas poderão ser melhoradas. Mais ainda, o conforto da estação foi classificado pelos utilizadores como "suficiente" a "mau", tendo sido indicadas como prioritárias as alternativas de melhoria e aumento da oferta dos locais de espera e de bancos no interior da estação.

A Figura 2 ilustra a posição de cada categoria relativamente à solução ideal, ou seja, a solução hipotética onde os critérios têm a máxima pontuação possível. Verifica-se que as categorias mais próximas da situação ótima, apesar dos pontos críticos ainda identificados, são as categorias relacionadas com a gestão da energia e água.

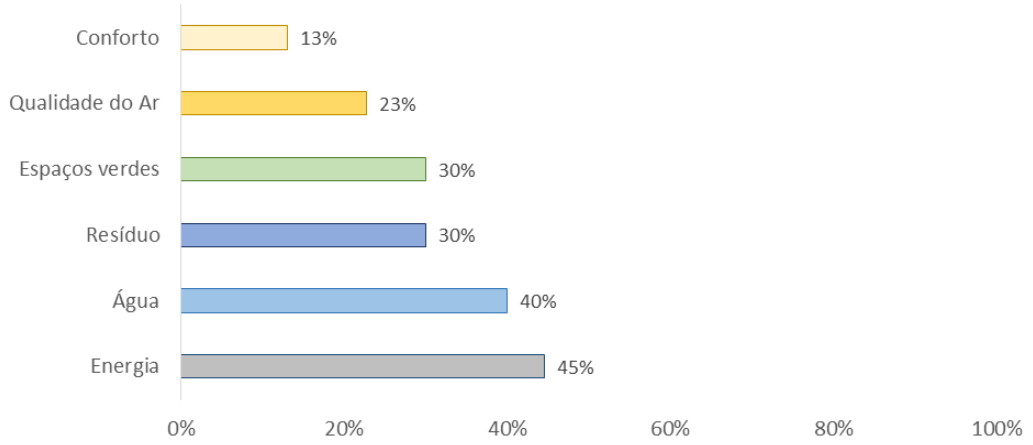


Figura 2 – Avaliação de desempenho por categoria: posição em relação à solução ideal

O passo 3 realizou-se com base nos pontos críticos estudados e nas preferências hipotéticas do gestor de infraestrutura e dos utilizadores. Neste sentido, foram elaboradas alternativas que:

- maximizassem a eficiência na utilização de recursos e gestão eficiente de resíduos (alternativa A1 – melhoria da gestão da energia, com implementação de maior quantidade de equipamentos eficientes de iluminação e elevadores);
- contribuíssem para melhorias da perceção do utilizador, promoção da imagem da estação e da biodiversidade na envolvente (alternativa A2 – implementação de infraestrutura verde na estação);
- potenciassem o conforto dos utilizadores e promovessem ambientes interiores de qualidade (alternativas A3 – monitorização do ar interior e A4 – implementação de pérgolas bioclimáticas na plataforma)

Utilizando o método multicritério descrito na secção 2, e de acordo com a estrutura de seleção baseada em critérios verdadeiros, são preferidas, indiferentemente, as alternativas A1, A2 e A3. De acordo com a estrutura de ordenação baseada em limiares de preferência, verifica-se que não existe sobreclassificação ou ordenação em relação a nenhuma das alternativas, ou seja, que todas são indiferentes entre si.

Dada a necessidade de perceber qual a alternativa mais adequada ao contexto, o trabalho futuro incidirá sobre calibração destes resultados com as preferências dos decisores (neste caso, o gestor de infraestrutura) e utilizadores da estação, bem como pela análise de custo-benefício das alternativas propostas, por forma a complementar os resultados obtidos para o passo 3.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo pretende desenvolver uma metodologia de apoio à decisão que permita avaliar o desempenho ambiental de estações ferroviárias e, simultaneamente, propor e comparar soluções para a melhoria desse desempenho.

Avalia-se uma estação ferroviária nacional de grande importância para a rede de transportes urbanos da cidade de Lisboa, mas que necessita de ser repensada de modo a tornar-se mais sustentável.

A análise de desempenho identifica, entre outros pontos críticos, a necessidade de melhoria da gestão dos recursos e resíduos, manutenção do edificado, melhoria e manutenção das zonas verdes afetas à infraestrutura e melhoria do seu ambiente interno.

São modeladas, através de análise multicritério, quatro alternativas, de acordo com as preferências hipotéticas do gestor de infraestrutura e dos utilizadores. A análise é efetuada tendo em conta uma estrutura seletiva baseada em critérios verdadeiros e uma estrutura de seleção baseada em limiares de preferência.

No primeiro caso, são selecionadas indiferentemente as alternativas relacionadas com a melhoria da gestão de energia, implementação de infraestruturas verdes na estação e implementação de monitorização da qualidade do ar, descartando-se a alternativa de base e a alternativa relacionada com a colocação de pérgolas bioclimáticas na plataforma. No segundo caso, a análise é inconclusiva, já que não existe prevalência de nenhuma das alternativas sobre as outras.

O trabalho futuro incidirá sobre a calibração dos pesos de acordo com os pontos de vista dos gestores de infraestrutura e dos utilizadores da estação. Caso seja necessário, será implementada,

ainda, uma análise de custo-benefício para selecionar a melhor de entre as três alternativas indiferentes.

REFERÊNCIAS

Alwi, S. R. W., Manan, Z. A., Samingin, M. H. e Misran, N. (2014). Benchmarking Water Utilisation Using Minimum Water Netwok Technique. ResearchGate, May 2014, 0–6.

AREP. (2020). Gare écodurable Nîmes Pont-du-Gard. Dossier de presse. SNCF Gares & Connexions - AREP

Asian Development Bank. (2015). Improving energy efficiency and reducing emissions through intelligent railway station buildings. In Asian Development Bank. Asian Development Bank. https://www.adb.org/publications/improving-energy-efficiency-intelligent-railway-station-buildings

Benoliel, M. A., Manso, M., Ferreira, P. D., Silva, C. M. e Cruz, C. O. (2021). "Greening" and comfort conditions in transport infrastructure systems: Understanding users' preferences. Building and Environment, 195(2021). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107759

Casals, M., Gangolells, M., Forcada, N., Macarulla, M. e Giretti, A. (2014). A breakdown of energy consumption in an underground station. Energy and Buildings, 78, 89–97. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.020

Crutel, C. (2018). L'intégration de l'éco-conception dans les projets d'infrastructures de transport sur rail. Maîtrise en environnement Université de Sherbrooke. Université de Technologie de Troyes.

Dursun, E., Varbak Nese, S., e Kilic, B. (2020). Green building certification of urban public railway transport systems for sustainable cities. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 8(1), 7–15. https://doi.org/10.17694/bajece.649183

Edwards, R., Jack, N., e Wong, Y. (2018). Transporting the future: a business perspective on future mobility - The SBA Sustainable Mobility Project.

Fracchia, M., Carlson, R., Steckler, P., Oberhauser, A. e Leitao, N. (2012). Enhance the Environmental Performance of Railway Infrastructure. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 48, 1047–1057. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1081

Guenther, E. e Hueske, A. (2017). Sustainable management at Indian Railways : how a self-evaluation tool for barrier analysis facilitates green procurement. 235–246. https://doi.org/10.1007/s00550-017-0465-4

Hickman, A., Baker, C., Cai, X., Thornes, J. e Delgado Saborit, J. M. (2018). Evaluation of air quality at the Birmingham New Street Railway Station. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(6), 1864–1878. https://doi.org/10.1177/0954409717752180

Indian Green Building Council. (2017). Green Railway Stations (Pilot Version) (Issue March).

Interreg Sudoe Stop CO2. (2017). Objectives. Online: http://sudoe-stopco2.eu/pt/objectives

Ji, S., Lee, B., e Yi, M. Y. (2021). Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using machine learning: A big data approach. Building and Environment, 205(June), 108267. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108267

Leemans, A., Cruz, J., Frommer, G. e Ivkovic, M. (2015). Low Carbon stations for Low carbon cities - Promoting construction, renovation, retro-fitting and better integration of stations in the urban tissue. Yellow design Foundation.

Lingqvis, L., Rundquist, H., Undén, A., Palmlund, L., Johansson, T., Hallberg, A., Rydell, O., Hjalmarsson, J., Engstrom, C.-J., Hurtig, P., Sodergren, B., Lindberg, E., Lillestrom-Danckwart, C., Lindblad, S., Huledal, P., Andersson, G., Malmquist, K. e Joinstoij, T. (2018). Railway Stations - Planning Manual (L. Lingqvis, H. Rundquist e A. Undén (eds.)). Swedish Transport Administration.

Markelj, J., Kuzman, M. K. e Zbašnik-Senegačnik, M. (2013). A review of building sustainability assessment methods. Architecture, Research. XIV. 22–31.

Marsh, R. (2017). Building lifespan: effect on the environmental impact of building components in a Danish perspective. Architectural Engineering and Design Management, 13(2), 80–100. https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1205471

Matos Silva, C., Serro, J., Dinis Ferreira, P. e Teotónio, I. (2019). The socioeconomic feasibility of greening rail stations: a case study in lisbon. The Engineering Economist, 64(2), 167–190. https://doi.org/10.1080/0013791X.2018.1470272

Mazzino, N., Perez, X., Meuser, U., Santoro, R., Brennan, M., Schlaht, J., Chéron, C., Samson, H., Dauby, L., Furio, N. e Hernandez, C. (2017). Rail 2050 Vision - Rail - the Backbone of Europe's Mobility. The European Rail Research Advisory Council.

Mohamed, O., El, E. e Bakry, D. (2008). Intermodal Stations: A Guide to Sustainable Design. ARUP Second International Conference-Achitecture…Urbanism and Time.

Yariv, B. e Wilson, T. (2015). Station Design Principles for Network Rail. Document no. BLDG -SP80 - 002. Network Rail.

Network Rail. (2018). Waste management. Guidance Note. (Issue February).

Nolte, R. e Kanburrow, C. (2012). Study on Non - traction energy consumption and related CO 2 emissions from the European railway sector. UIC Network of energy efficiency experts, IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Macroplan.

Qian, B., Yu, T., Bi, H. e Lei, B. (2019). Measurements of energy consumption and environment quality of high-speed railway stations in China. Energies, 13(1). https://doi.org/10.3390/en13010168

RSSB. (2016). Rail Sustainable Development Principles (Issue 2).RSSB

Rzepnicka, S. e Załuski, D. (2017). Innovative Railway Stations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245. https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082009

Schirmar, S., Surmeli, N. e Hermelink, A. (2013). Guidance document for national plans for increasing the number of nearly zero- energy buildings.

Sharma, R. e Newman, P. (2017). Urban Rail and Sustainable Development Key Lessons from Hong Kong, New York, London and India for Emerging Cities. Transportation Research Procedia, 26(2016), 92–105. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.07.011

Sinclair, S., Stuart, S., Watson, J., Bull, J., Bryan, C., Sweidan, J., Arlidge, W. e Sinclair, C. (2020). Underpinning the Post-2020 Biodiversity Framework. The Convention on Biological Diversity

Sustainability West Midlands. (2015). New Street Station: Redevelopment Green Credentials. https://www.sustainabilitywestmidlands.org.uk/resources/new-street-station-redevelopment-

green-credentials/

Sustainable Mobility for All. (2017). Global Mobility Report 2017: Tracking Sector Performance. http://www.sum4all.org

Sustation. (2014). Quality management scheme for existing stations, designing stations, building stations. Sustation Project.

Tsimplokoukou, K., Lamperti, M. e Negro, P. (2014). Building Design for safety and sustainability. https://doi.org/10.2788/338223

UIC (2015). A global vision for railway development. Em: International Railway Research Board. https://doi.org/10.1038/515311a

UIC. (2019). Railway Stations Boosting the City. UIC Passenger Department.

United Nations General Assembly. (2015). Transforming our world: the 2030 Sustainable Development Agenda.

Varela, T. J. A. (2016). Interfaces de Transporte na AML e Novas Centralidades Metropolitanas. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.

Zemp, S. ., Stauffacher, M., Lang, D. J., e Scholz, R. W. (2008). Classifying railway stations for sustainable transitions – balancing node and place functions Classifying railway stations for strategic transport and land use planning : Context matters ! Journal of Transport Geography, 19(4), 670–679. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.08.008

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E ÓTICO DAS DIFERENTES CAMADAS DE REVESTIMENTO NA DURABILIDADE DO SISTEMA ETICS

Andrea R. Souza[a]; Teresa M. Guimarães[b]; Rita C. Veloso[ac]; J. Teles Nunes[d]; Bruno Soeira[d]; Nuno M. M. Ramos[a]; Joana Maia[a]

[a] CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, andrea.souza@fe.up.pt, up201001431@fe.up.pt, nmmr@fe.up.pt, joanamaia@fe.up.pt

[b] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201906961@edu.fe.up.pt

[c] IFMUP, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal, up201001431@fe.up.pt

[d]SIKA PORTUGAL – Produtos Construção e Indústria, SA, Rua de Santarém, 113, 4400-292 Vila Nova de Gaia, Portugal, nunes.teles@pt.sika.com, soeira.bruno@pt.sika.com

RESUMO

A necessidade de reduzir os gases do efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono, implica grandes desafios para adaptar e construir os edifícios de forma eficiente, visando a redução do consumo energético e o uso de materiais verdes de baixo impacto ambiental. O desafio inclui a melhoria do desempenho térmico, mas muitos dos componentes utilizados, como o sistema de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), podem apresentar problemas de durabilidade e dependem de materiais com alto impacto ambiental, sendo que manter os materiais com desempenho satisfatório pode reduzir o impacto ambiental ao longo da vida útil do edifício. Nesse contexto, apresenta-se um estudo sobre as diferentes composições do sistema multicamada de reboco do ETICS com cores escuras, sobretudo o uso ou não de primários. Para tal, foram avaliadas as propriedades superficiais do revestimento (refletividade e parâmetros de cor) e emissividade, antes e após ciclos higrotérmicos (calor-humidificação), assim como a absorção de água. Os resultados indicaram que o uso de primários pode reduzir até 80% a taxa de absorção de água e manter as propriedades óticas após os ciclos higrotérmicos. No entanto, o tipo de ligantes e cargas influencia a degradação dos parâmetros de cor.

Palavras-chave: ETICS, Propriedades superficiais, Refletância, Durabilidade, Sistema multicamada.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Comissão Europeia (EC 2020), o setor da construção enfrenta diversos desafios na melhoria do ambiente construído, sendo um dos setores mais impactados pela crise económica e com grandes impactes ambientais. No que diz respeito às alterações climáticas, melhorar os espaços tornando os edifícios mais sustentáveis, por aumento da eficiência energética, impacta significativamente o cumprimento dos atuais acordos ambientais. Isto porque 33% das emissões globais de gases de efeito estufa relacionadas com o gasto energético são atribuíveis ao uso de edifícios (Robert Kummert 2012) e têm aumentado desde 2019 (UN 2021).

Neste cenário, é necessário reduzir os impactes ambientais do sector da construção exigindo a aplicação de diversas medidas, incluindo melhorar as propriedades térmicas da envolvente (Asdrubali *et al.* 2015). As soluções construtivas utilizadas nas envolventes dos edifícios têm um papel significativo na sustentabilidade dos edifícios e das cidades, como é o caso das fachadas, apresentando-se relevantes para o conforto térmico e visual (Halawa *et al.* 2018) onde modificações podem contribuir para a redução do consumo energético durante o uso do edifício (Nazarian *et al.* 2022). Alterações no sistema de isolamento térmico, como a redução da transmissão térmica, assim como das propriedades da superfície, como a redução da absorção solar, modificam a transferência de calor com o ambiente exterior, melhorando o conforto térmico interior (Saber 2012; Sadineni *et al.* 2011). Com o propósito de melhorar o desempenho térmico respondendo às diretivas europeias em vigor, tem sido amplamente utilizado na Europa o sistema de isolamento térmico pelo exterior, nomeadamente ETICS (Ximenes *et al.* 2014).

Apesar das vantagens, a solução ETICS apresenta alguns problemas e limitações como baixa resistência ao impacto, degradação do revestimento, crescimento biológico, perda de aderência entre as diferentes camadas, alteração de cor e acumulação de sujidade, retração térmica e fissuração em pontos singulares (Freitas *et al.* 2016). Os estudos sobre durabilidade de ETICS focam-se maioritariamente na avaliação das propriedades da camada isolante do sistema, como EPS (Parracha *et al.* 2022), lã de rocha (Tian *et al.* 2019) ou outros materiais como aerogéis (Karim *et al.* 2022) e cortiça (Simões *et al.* 2019). No entanto, observa-se uma lacuna na avaliação da influência das camadas de reboco (base e revestimento final) ou até mesmo a sua combinação nas propriedades finais do sistema, sendo avaliado no caso dos revestimentos finais características como autolimpeza (Aoyama *et al.* 2017; Bossa *et al.* 2017; Diamanti *et al.* 2015; Paolini *et al.* 2018), ou uso de materiais que melhorem a refletância (Ramos *et al.* 2021; Yuan *et al.* 2018).

Alguns estudos como Song *et al.* (2014) e Levinson *et al.* (2005) mostram a influência da espessura e da cor do revestimento usado como camada base no valor da refletância de filmes de tinta, enquanto que nos estudos de Souza *et al.* (2023a) e Souza *et al.* (2023b) analisa-se o efeito de diferentes espessuras e composições do sistema ETICS na refletância do sistema. Não obstante, o impacto na durabilidade do sistema ETICS, os fatores como a espessura dos revestimentos e o uso ou não do primário são fornecidos pelos fabricantes com base na experiência em campo e não de forma sistemática e académica.

Diante do exposto, este trabalho visa avaliar o efeito do uso de diferentes primários na absorção de água e nas propriedades superficiais de um sistema ETICS (refletância e emissividade), antes e depois de exposição a ciclos de calor-humidificação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA

Como forma de verificar o efeito do uso do primário em sistemas ETICS de forma a contribuir para avaliar a durabilidade do sistema e o impacto das camadas do revestimento nas propriedades superficiais, a este estudo dividiu-se em duas etapas principais conforme o fluxograma da Figura 1.

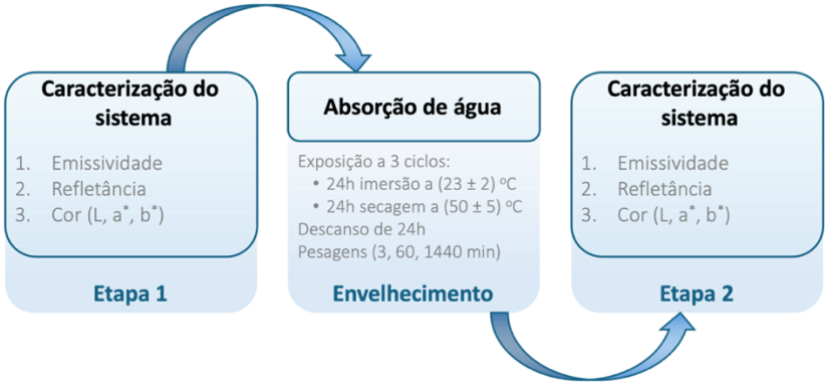


Figura 1 – Fluxograma da metodologia experimental.

A primeira etapa consistiu na caracterização das propriedades superficiais de ETICS (provetes 10 x 10 cm^2), seguida da realização dos ensaios de absorção de água das amostras (provetes 20 x 20 cm). Sendo a segunda etapa a caracterização das amostras que foram sujeitas aos ciclos higrotérmicos de calor-humidificação de acordo com o especificado para o ensaio de absorção de água.

Considerou-se, portanto, que a etapa 2 permite avaliar degradação após exposição a ciclos de calor-humidificação, visto que é considerado que as amostras podem sofrer alterações durante as variações térmicas resultantes dos ensaios de imersão e secagem preconizados nos ciclos de preparação para o ensaio de absorção de água.

2.2 COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS ETICS

O trabalho foca a avaliação de propriedades superficiais de amostras de ETICS com cor final escura fabricadas por uma empresa de materiais de construção, nomeadamente de ETICS (Figura 2a). Foram preparados 3 provetes de 20 x 20 cm^2 (Figura 2b) para cada configuração para o ensaio de absorção de água e 3 placas de 10 x 10 cm^2 para caracterização do sistema (Figura 2c), conforme as diferentes variáveis de análise apresentadas no Quadro 1.

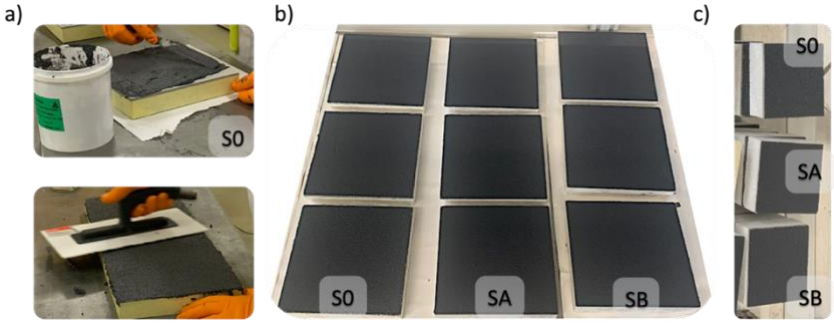


Figura 2 – Amostras de ensaio: a) Aplicação do revestimento sem primário, b) Provetes para ensaios de absorção de água e c) Provetes para caracterização das propriedades superficiais

A placa de isolamento utilizado nas amostras é um painel pré-fabricado de poliestireno expandido (EPS) sintetizado com densidade de 20 kg/m^3. O sistema multicamada consiste num reboco composto por uma camada base de argamassa cimentícia fibrada, monocomponente com aditivos especiais e resinas, aplicada em duas camadas e armada entre si com uma malha de fibra de vidro, seguido de uma camada de primário aplicada com rolo anti-gota e um barramento realizado com talocha (Figura 2a), sendo que os primários e revestimento final apresentam cor RAL7016. A composição destas duas últimas camadas é a seguinte:

- Primário: solução de base acrílica pigmentada (RAL7016), resistente aos álcalis e aos agentes atmosféricos, sendo no sistema SA aplicado um primário com elevado desempenho baseado numa percentagem superior de ligante acrílico e dióxido de titânio e no sistema SB o primário comercial com teor convencional de ligante e dióxido de titânio;
- Revestimento final: revestimento de barramento com base acrílica com adição de cargas minerais em dispersão aquosa para acabamento mate com grão médio e pigmentada (RAL7016).

Quadro 1 – Variáveis analisadas por amostra.

<table>
<tr><th rowspan="2">Amostra</th><th colspan="4">Composição dos sistemas</th><th colspan="3">Nº provetes ensaios</th></tr>
<tr><th>Isolamento</th><th>Base</th><th>Primário</th><th>Acabamento final</th><th>Emissividade</th><th>Refletância e cor</th><th>Absorção de água</th></tr>
<tr><td>S0</td><td rowspan="3">EPS 3 cm</td><td rowspan="3">2 camadas de argamassa cimentícia com malha de fibra de vidro</td><td>Não utilizado</td><td rowspan="3">Revestimento comercial em cor escura</td><td colspan="2">3 (10 x 10 cm^2)
3 (20 x 20 cm^2) após ciclos</td><td>3 (20 x 20 cm^2)</td></tr>
<tr><td>SA</td><td>Elevado desempenho</td><td colspan="2">1 (10 x 10 cm^2)</td><td>-</td></tr>
<tr><td>SB</td><td>Comercial</td><td colspan="2">3 (10 x 10 cm^2)
3 (20 x 20 cm^2) após ciclos</td><td>3 (20 x 20 cm^2)</td></tr>
</table>

Com as configurações apresentadas no Quadro 1, pretende-se avaliar o efeito do uso do primário, assim como o efeito das diferentes composições de primário na absorção de água e nas propriedades superficiais e antes e depois de ciclos higrotérmicos para as amostras S0 e SB.

2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

2.3.1 Caracterização do Sistema

As amostras fabricadas foram caracterizadas na etapa 1, seguindo os métodos experimentais para determinação da emissividade (Figura 3a), refletância e cor (Figura 3b) e absorção de água (Figura 3c).

A emissividade (ε) consiste do valor médio das medições de 5 diferentes pontos nos provetes de 10 x 10 cm^2 para caracterização do sistema e em 3 pontos em cada amostra de 20 x 20 cm^2 após o ensaio de absorção de água. O método de avaliação seguiu o preconizado pela ASTM C1371 (2022), com a utilização de um emissómetro (D&S) modelo AE (Figura 3a) sendo a emissividade obtida tendo por base uma amostra padrão de elevada emissividade (0.88) e uma amostra padrão de baixa emissividade (0.05).

A refletância total (ρ_{total}) e a avaliação da cor consiste no valor médio das leituras espectrais de 5 diferentes pontos nos provetes de tamanho 10 x 10 cm^2 para caracterização do sistema e em 5 pontos para cada provete de 20 x 20 cm^2 para análise da degradação após os ciclos. As leituras da refletância

foram realizadas com um espectrofotómetro modular (Ocean Optics) modelos FLAME-T e FLAME-NIR equipado com uma esfera integradora de 30 mm de diâmetro (Figura 3b).

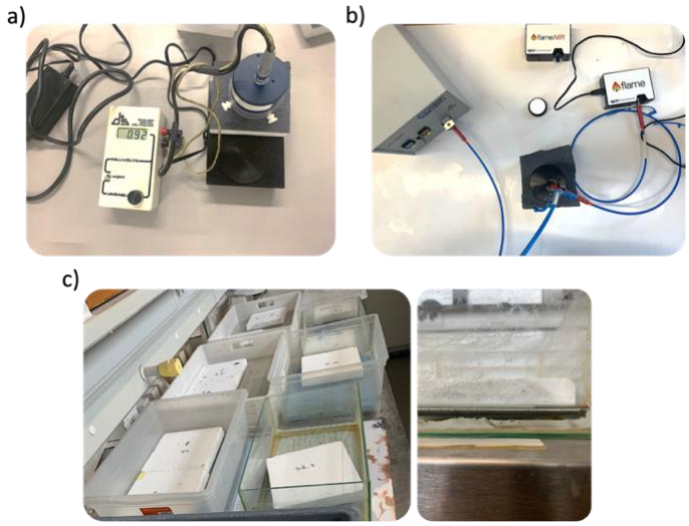


Figura 3 – Ensaios realizados: a) Emissividade, b) Refletância e cor e c) Absorção de água.

A refletância total foi calculada com base no método da seleção das ordenadas (100 ordenadas), Eq. 1, conforme descrito na ASTM E903 (2020) e tabelas da ASTM G197 (2021). Sendo ρ a refletância total lida pelo espectrofotómetro na ordenada correspondente ao valor λ do comprimento de onda entre 200 e 2500 nm conforme a tabela X2 da ASTM E903 (2020).

$$\rho_{total} = \sum_{i=1}^{100} \frac{\rho\lambda}{100} \quad (1)$$

Com base na ASTM E903 (2020) é possível determinar a refletância espectral da amostras, considerando refletância na região do ultravioleta (UV), defina pela Eq. 2, do visível (Vis), Eq. 3 e na região do infravermelho próximo (NIR) Eq. 4.

$$\rho_{UV} = \sum_{i=1}^{100} \frac{\rho\lambda}{100} \quad (2)$$

$$\rho_{Vis} = \sum_{i=1}^{100} \frac{\rho\lambda}{100} \quad (3)$$

$$\rho_{NIR} = \sum_{i=1}^{100} \frac{\rho\lambda}{100} \quad (4)$$

A cor foi avaliada conforme as coordenadas do espaço CIELab (ISO 11664-4 2019) utilizando-se as leituras do espectrofotómetro FLAME-T com configuração do iluminante D65 e 10º como ângulo do observador. Foi também calculada a diferença de cor total (ΔE) entre as amostras antes e depois da sua exposição aos ciclos com base na Eq. 5 (ISO 11664-4 2019). Onde ΔL, Δa e Δb são as variações das coordenadas L^*, a^* e b^* entre as amostras antes e depois após o ensaio de absorção de água.

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (5)$$

Estudos como de Mokrzycki and Tatol (2011), Cozza *et al.* (2015) e Parracha *et al.* (2021) definem como limite de variação perceptível ao olho humano valores de ΔE entre 2 e 3, sendo aplicado nesse estudo o valor limite de 3.

2.3.2 Absorção de Água (ciclos higrotérmicos)

A absorção de água (A_w) foi medida para o sistema completo (EPS + revestimento base + sem/com primário + revestimento final) com base na descrição do Documento de Avaliação Europeu de

avaliação do ETICS – EAD 040083-00-0404 (EOTA 2019). Três provetes 20 x 20 cm^2 de cada amostra foram condicionados por 7 dias em ambiente controlado à temperatura de 23 ± 2 ºC e humidade relativa (HR) de 50 ± 5 %. Posteriormente, selaram-se as laterais dos provetes e iniciaram-se os ciclos de calor-humidificação. Realizaram-se três ciclos compostos por:

- 24 horas de imersão em água a 23 ± 2 ºC. Sendo as amostras colocadas com a face do revestimento dentro da água, respeitado uma profundidade de imersão de 2 a 10 mm;
- 24 horas de secagem em estufa a temperatura de 50 ± 5 ºC.

Após a exposição aos três ciclos os provetes foram condicionados novamente em ambiente controlado (23 ± 2 ºC, 50 ± 5% HR) por 24 horas e então pesadas (M_0) e imergidas novamente (Figura 3c) para determinação da absorção de água, sendo aferida a massa das amostras aos 3, 60 e 1440 minutos. A determinação da quantidade de água absorvida (A_w) determinou-se pela Eq. 6 (NP EN 1062-3 2014) para cada provete após 1 e 24 horas de imersão, sendo apresentado o valor médio dos três provetes para cada amostra do Quadro 1.

$$Aw_t = (M_t - M_0)/\left(A \cdot \sqrt{t}\right) \quad (6)$$

Onde Aw_t é o valor de água absorvido em $kg/(m^2 \cdot h^{0.5})$, M_t é o peso da amostra no instante t em kg, M_0 é o peso da amostra após ciclos e acondicionamento e antes da nova imersão em kg, A é a área superficial da amostra em m^2 e t é o instante em que a amostra é pesada em h, usualmente 1 e 24 horas.

Após a definição do valor de água absorvido (24 horas) as amostras foram novamente condicionadas em laboratório (23 ± 2 ºC, 50 ± 5% HR) por um período de 10 dias para realizar a caracterização do sistema após os ciclos – etapa 2 da Figura 1 para as amostras S0 e SB.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Uma das primeiras observações, foi que o uso de um primário no sistema ETICS pode reduzir aproximadamente 70% a absorção de água na primeira hora e em 80% ao fim de 24 horas, como visto na Figura 4.

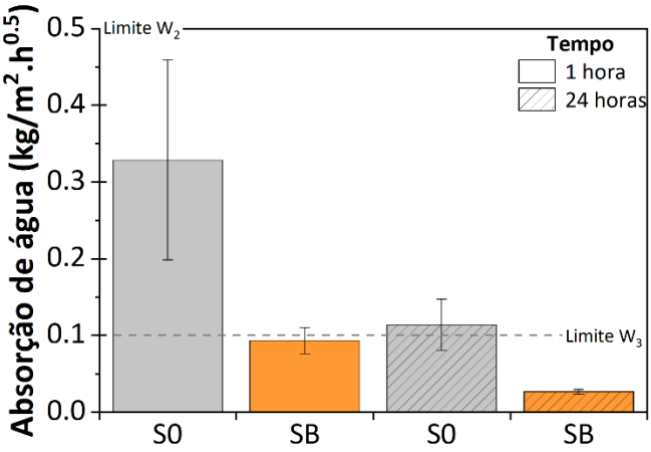


Figura 4 – Absorção de água para as amostras S0 e SB.

Os valores do sistema S0 são similares aos encontrados por Parracha *et al.* (2021) em diferentes sistemas de isolamento sem primário. Considerando as categorias de permeabilidade à água líquida norma NP EN 15824 (2019), o sistema S0, sem primário, é definido como W_2, enquanto o sistema SB, com primário comercial, definido como W_3, ou seja, apresentam uma permeabilidade média e baixa, respetivamente (ver Figura 4).

3.2 EMISSIVIDADE

A Figura 5 apresenta os valores médios de caracterização dos sistemas S0/SA e SB (etapa 1) e após o os ciclos higrotérmicos (etapa 2), para os sistemas S0 e SB.

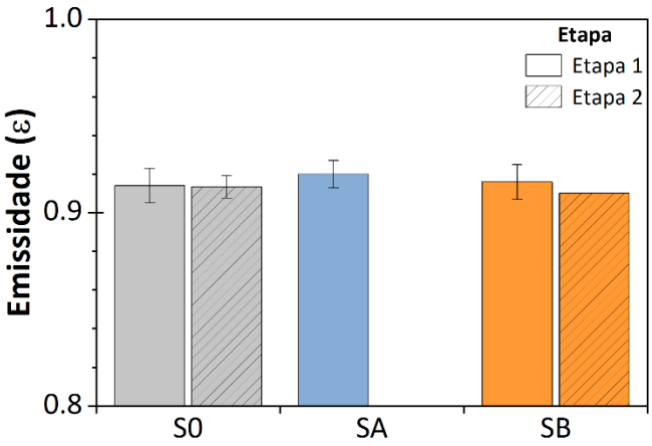


Figura 5 – Emissividade antes e depois dos ciclos higrotérmicos.

Como esperado, os resultados de emissividade encontram-se dentro dos valores comumente utilizados em materiais de revestimento, entre 0.80 e 0.95 (Santamouris *et al.* 2011) e não sofrem influência do uso do primário, tampouco do envelhecimento (etapa 1 Vs. etapa 2) visto que é uma propriedade dependente das propriedades físico-químicas do revestimento final como verificado na literatura (Alonso *et al.* 2017; Ramos *et al.* 2021).

3.3 REFLETÂNCIA

O resumo dos resultados da refletância considerando os valores médios e o desvio padrão para as duas etapas são mostrados no Quadro 2. O uso dos primários reduz o valor da refletância total em aproximadamente 20% no sistema SA e 10% no sistema SB, comparativamente à amostra S0 sem primário. Esse efeito na redução era esperado devido à cor escura do primário (Levinson *et al.* 2005) e dos ligantes constituintes do mesmo.

Quadro 2 – Refletância total antes e depois dos ciclos higrotérmicos.

Amostra	Refletância (ρ)	
	Etapa 1	Etapa 2
S0	0.181 ± 0.0181	0.133 ± 0.0208
SA	0.150 ± 0.0123	-
SB	0.165 ± 0.0158	0.138 ± 0.0185

A perda na refletância para o S0 e SB foi de aproximadamente 25% e 15%, respetivamente, após os ciclos higrotérmicos, o que indica que o uso de primário pode auxiliar na manutenibilidade da

refletância e da cor dos revestimentos aplicados em ETICS. A Figura 6 apresenta os valores médios da refletância espectral e a Figura 7 a distribuição conforme o comprimento de onda.

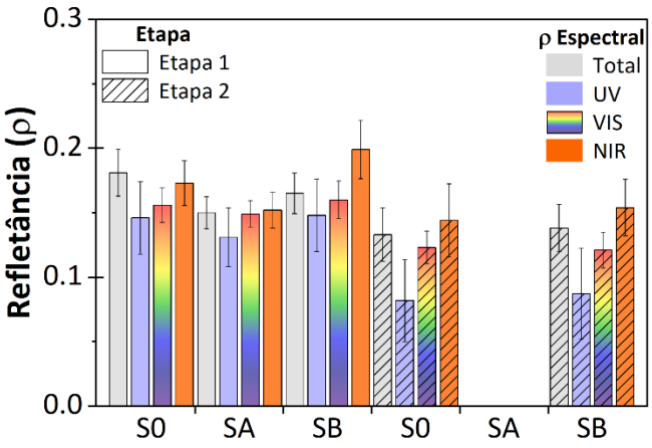


Figura 6 – Refletância espectral antes e depois dos ciclos higrotérmicos.

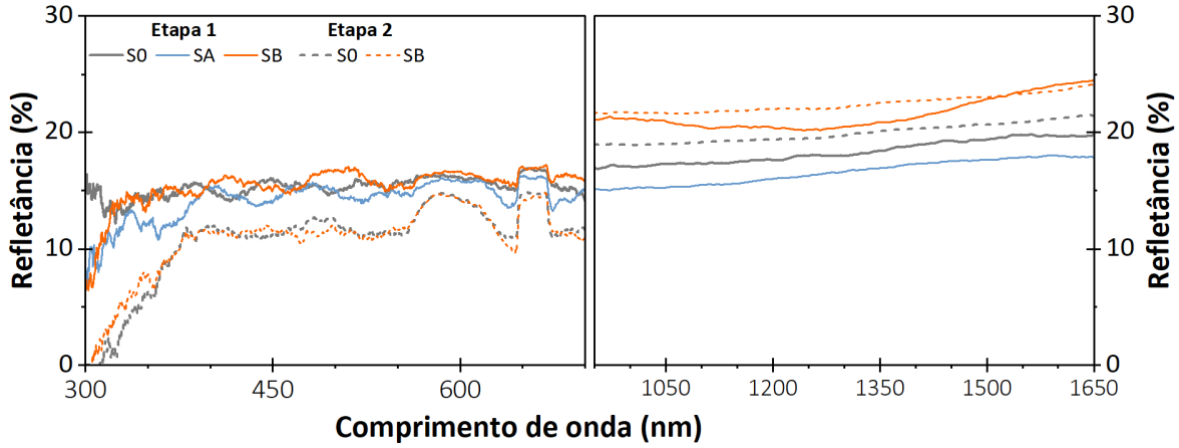


Figura 7 – Distribuição da refletância espectral antes e depois dos ciclos higrotérmicos.

Devido às propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO_2) (Diamanti et al. 2015) é verificado um valor inferior do SA na região ultravioleta (UV) na Figura 6, sendo o comportamento do sistema SA e SB semelhantes entre 300 e 350 nm (Figura 7). Como durante o processo de fabrico é afinada a tonalidade da cor do revestimento não são encontradas diferenças significativas na refletância da região do visível (400 – 700 nm). No entanto, na região do infravermelho próximo (900 – 1650 nm), observa-se o efeito da cor do primário e dos ligantes usados nos primários, visto a diferença entre os sistemas SA e SB antes do envelhecimento (etapa 1).

3.4 COR

As coordenadas de cor CIELab são apresentadas na Figura 8, juntamente com retângulos em cores com a identificação das coordenadas em cores do espaço RGB, sendo possível verificar que as amostras apresentam se todas em tons de cinza-escuro. As amostras podem ser consideradas acromáticas (Choudhury 2014) com os valores de a^* e b* muito próximos entre si, antes e depois dos ciclos (etapa 1 e etapa 2), além de serem consideradas uma cor de tom médio visto que a luminosidade está entre 30 e 50 (Cooper 1929; Roy Choudhury 2010).

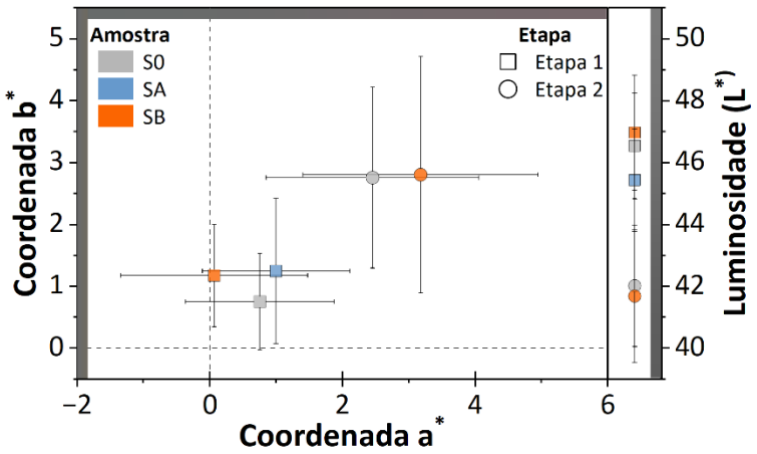


Figura 8 – Coordenadas no espaço CIELab com representação RGB antes e depois dos ciclos higrotérmicos.

Mesmo apresentando parâmetros de coordenada (a*b*) muito próximos antes e depois dos ciclos higrotérmicos é possível verificar que as amostras envelhecidas (etapa 2) apresentam um incremento nos valores de a^* e b^*, apresentando assim uma variação na matiz tornando-se mais avermelhadas (ver retângulo RGB da horizontal na Figura 8), assim como uma redução de aproximadamente 10% na luminosidade. A diferença total de cor e de luminosidade, após a exposição aos ciclos higrotérmicos, são apresentadas na Figura 9, onde se observa que as amostras ficam mais escuras com o envelhecimento (ΔL negativo) e que a variação da luminosidade juntamente com as variações do croma (a*b*) resultam em uma variação total de cor (ΔE) superior ao limite (linha tracejada, Figura 9) definido como perceptível ao olho humano (Cozza *et al.* 2015).

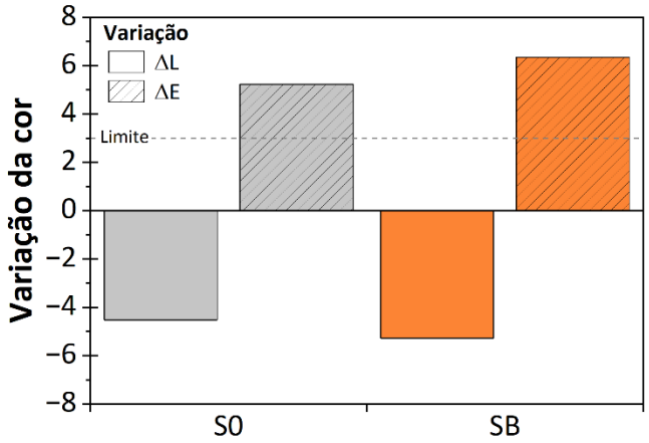


Figura 9 – Variação da luminosidade e da cor total após os ciclos higrotérmicos.

A variação de cor e da luminosidade entre os sistemas podem estar correlacionados ao fato de que a exposição a temperatura e a imersão em água, podem lixiviar algum dos compósitos do primário, alterando assim a características dos pigmentos o que explicaria o facto da amostra com primário apresentar uma maior perda de cor do que a amostra S0 (sem primário).

4 CONCLUSÕES

Com o foco em aumentar a durabilidade de sistema de isolamento térmico pelo exterior, do tipo ETICS, e otimizar o uso de materiais, este estudo avaliou a influência do uso de primário nas propriedades

óticas (cor e refletância), emissividade e absorção de água de sistemas convencionais de ETICS com EPS.

Os resultados mostraram que existe uma influência do primário, principalmente na manutenibilidade das propriedades do sistema ETICS após ciclos higrotérmicos de calor-humidificação, destacando-se:

- O uso do primário não afeta a emissividade do sistema, mas sim a refletância total do sistema;
- Primários com ligantes de alto desempenho modificam menos os parâmetros de cor no entanto afetam a refletância na região do infravermelho próximo;
- É verificado que os ciclos de calor-humidificação afetam as cores e, como tal, o desempenho global do sistema.

Salienta-se que, como continuação da atual pesquisa, serão realizados ensaios de envelhecimento acelerado em câmara QUV, assim como a medição de propriedades como temperatura superficial e fluxo de calor dos sistemas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). As autoras A. R. Souza e R. C. Veloso agradecem o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutoramento DOI 10.54499/2020.08418.BD e DOI 10.54499/SFRH/BD/148785/2019 Os autores gostariam de agradecer o apoio da Sika Portugal no âmbito da preparação das amostras e todo o suporte técnico fornecido.

REFERÊNCIAS

Alonso, C., Martin-Consuegra, F., Oteiza, I., Asensio, E., Perez, G., Martinez, I., Frutos, B. (2017). Effect of facade surface finish on building energy rehabilitation. Solar Energy, *146*: 470-483. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.009

Aoyama, T., Sonoda, T., Nakanishi, Y., Tanabe, J., Takebayashi, H. (2017). Study on aging of solar reflectance of the self-cleaning high reflectance coating. Energy and Buildings, *157*: 92-100. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.021

Asdrubali, F., D'alessandro, F., Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustainable Materials and Technologies, *4*: 1-17. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002

Astm C1371. (2022). Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers. In: ASMT International.

Astm E903. (2020). Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Astm G197. (2021). Standard table for reference solar spectral distributions: Direct and diffuse on 20o tilted and vertical surfaces. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bossa, N., Chaurand, P., Levard, C., Borschneck, D., Miche, H., Vicente, J., Geantet, C., Aguerre-Chariol, O., Michel, F.M., Rose, J. (2017). Environmental exposure to TiO2 nanomaterials incorporated in building material. Environmental Pollution, *220*(Pt B): 1160-1170. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.019

Choudhury, A.K.R. (2014). Colour and appearance attributes. In (pp. 103-143). https://doi.org/10.1533/9780857099242.103

Cooper, F.G. (1929). *Munsell Book of Color: Defining, Explaining, and Illustrating the Fundamental Characteristics of Color*. Munsell Color Company. https://books.google.pt/books?id=HNA9AAAAYAAJ

Cozza, E.S., Alloisio, M., Comite, A., Di Tanna, G., Vicini, S. (2015). NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. Solar Energy, *116*: 108-116. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.004

Diamanti, M.V., Paolini, R., Rossini, M., Aslan, A.B., Zinzi, M., Poli, T., Pedeferri, M.P. (2015). Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment. Construction and Building Materials, *96*: 270-278. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.028

Ec. (2020). *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SEMs*. https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/

Eota. (2019). EAD 040083-00-0404: External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with renderings. In. Brussels, BE: European Assessment Document.

Freitas, S.S.D., Peixoto De, F., João M.P.Q. Delgado, V., De Freitas, V.P. (2016). Cracks on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue. Structural Survey, *34*(1): 57-72. https://doi.org/10.1108/ss-09-2015-0043

Halawa, E., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Trombley, J., Hassan, N., Baig, M., Yusoff, S.Y., Azzam Ismail, M. (2018). A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. Renewable and Sustainable Energy Reviews, *82*(July 2016): 2147-2161. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.061

Iso 11664-4. (2019). Colorimetry - Part 4 - CIE 1976 L*a*b* Colour space. In. Viena, AT: European Committee for Standardization.

Karim, A.N., Johansson, P., Sasic Kalagasidis, A. (2022). Knowledge gaps regarding the hygrothermal and long-term performance of aerogel-based coating mortars. In *Construction and Building Materials* (Vol. 314). Department of Architecture and Civil Engineering, Division of Building Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, SE-41296, Sweden: Elsevier Ltd.

Levinson, R., Berdahl, P., Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments - Part II: survey of common colorants. Solar Energy Materials and Solar Cells, *89*(4): 351-389. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.013

Mokrzycki, W.S., Tatol, M. (2011). Colour Difference ΔE - a Survey. MG&V, *20*(4): 383-411.

Nazarian, N., Krayenhoff, E.S., Bechtel, B., Hondula, D.M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W.T.L., De Dear, R., Jay, O., Lee, J.K.W., Martilli, A., Middel, A., Norford, L.K., Sadeghi, M., Schiavon, S., Santamouris, M. (2022). Integrated assessment of urban overheating impacts on human life. Earths Future, *10*(8). https://doi.org/10.1029/2022EF002682

Np En 1062-3. (2014). Produtos de pintura e esquemas de pintura a aplicar em alvenaria betão e exteriores. Parte 3: Determinação da permeabilidade à água líquida. In. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.

Np En 15824. (2019). Especificação para rebocos exteriores e interiores com base em ligantes orgânicos. In. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.

Paolini, R., Borroni, D., Pedeferri, M., Diamanti, M.V. (2018). Self-cleaning building materials: The multifaceted effects of titanium dioxide. Construction and Building Materials, *182*: 126-133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.047

Parracha, J.L., Borsoi, G., Veiga, R., Flores-Colen, I., Nunes, L., Garcia, A.R., Ilharco, L.M., Dionisio, A., Faria, P. (2021). Effects of hygrothermal, UV and SO2 accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments. Building and Environment, *204*: 108151. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108151

Parracha, J.L., Borsoi, G., Veiga, R., Flores-Colen, I., Nunes, L., Viegas, C.A., Moreira, L.M., Dionisio, A., Gomes, M.G., Faria, P. (2022). Durability assessment of external thermal insulation composite systems in urban and maritime environments. Science of the Total Environment, *849*: 157828. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157828

Ramos, N.M.M., Maia, J., Souza, A.R., Almeida, R.M.S.F., Silva, L. (2021). Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS. Infrastructures, *6*(6). https://doi.org/10.3390/infrastructures6060079

Robert, A., Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. Building and Environment, *55*: 150-158. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.014

Roy Choudhury, A.K. (2010). Scales for communicating colours. In M.L. Gulrajani (Ed.), *Colour Measurement* (pp. 19-e13). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857090195.1.19

Saber, H.H. (2012). Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications. Building and Environment, *52*: 32-44. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.010

Sadineni, S.B., Madala, S., Boehm, R.F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. Renewable & Sustainable Energy Reviews, *15*(8): 3617-3631. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014

Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. Solar Energy, *85*(12): 3085-3102. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023

Simões, N., Fino, R., Tadeu, A. (2019). Uncoated medium density expanded cork boards for building façades and roofs: Mechanical, hygrothermal and durability characterization. Construction and Building Materials, *200*: 447-464. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.116

Song, Z., Qin, J., Qu, J., Song, J., Zhang, W., Shi, Y., Zhang, T., Xue, X., Zhang, R., Zhang, H., Zhang, Z., Wu, X. (2014). A systematic investigation of the factors affecting the optical properties of near infrared transmitting cool non-white coatings. Solar Energy Materials and Solar Cells, *125*: 206-214. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.019

Souza, A.R., Veloso, R.C., Maia, J., Flores-Colen, I., Ramos, N.M.M. (2023a). NIR reflective Paints as an Alternative for Sustainable Façade Renovation. Journal of Physics: Conference Series, *2654*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012004

Souza, A.R., Veloso, R.C., Maia, J., Flores-Colen, I., Ramos, N.M.M. (2023b, 27-30 June). Optical Properties of ETICS Surfaces - Sensitivity to the Finishing System Composition. 2nd International Conference on Construction, Energy, Environment & Sustainability - CEES 2023, Funchal, Madeira, PT.

Tian, S., Luo, Y., Chen, J., He, H., Chen, Y., Ling, Z. (2019). A comprehensive study on the accelerated weathering properties of polypropylene-wood composites with non-metallic materials of waste-printed circuit board powders. Materials, *16*(6). https://doi.org/10.3390/ma12060876

Un. (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat is On - A World of Climate Promisses not yet Delibered*.

Ximenes, S., De Brito, J., Gaspar, P.L., Silva, A. (2014). Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls. Materials and Structures, *48*(7): 2235-2249. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0305-8

Yuan, J.H., Emura, K., Farnham, C. (2018). A study on the durability of a glass bead retro-reflective material applied to building facades. Progress in Organic Coatings, *120*: 36-48. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.009

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

POTENCIAL DE RECOLHA DE ÁGUA DA CHUVA EM ESPAÇO URBANO: ESTUDOS DE CASO DE TIJUANA (MX), LISBOA (PT) E TRONDHEIM (NO)

Laura Ocaranza [a], Cristina Matos Silva [b]

[a]Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, lauraocaranza@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, cristina.matos.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

À medida que a escassez de água aumenta devido às mudanças climáticas, reduzir o consumo de água se torna essencial. Este estudo em escala urbana simula a eficiência dos sistemas de recolha de água da chuva para uso não potável em edifícios residenciais em três tipos climáticos: Mediterrâneo, Subárctico e Semiárido. Os objetivos incluem calcular o potencial de poupança de água, a eficiência do sistema de recolha de água da chuva e identificar o tipo de edifício mais eficiente em cada cidade. Os dados coletados incluem regimes de precipitação, tipologias de edifícios, população residencial e padrões de consumo de água. A metodologia envolve a avaliação da eficiência e das poupanças em escala de edifício, a zonificação da cidade e a avaliação das poupanças e da eficiência em toda a cidade. Assumindo a capacidade ótima do tanque, os sistemas de recolha de água da chuva reduzem o consumo doméstico de água não potável em 64% em Lisboa, Portugal, 11% em Tijuana, México, e 53% em Trondheim, Noruega, alcançando 100% de eficiência na recolha em todas as cidades. Este estudo testa vários cenários climáticos e de edifícios em Lisboa, Portugal, provando que a eficiência do sistema de recolha de água da chuva é confiável e precisa somente quando todas as variáveis locais são consideradas.

Palavras-chave: Sistema de Recolha de água da chuva, poupança de água, consumo de água não potável, escala urbana

1 INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre as áreas urbanas devido às mudanças nos padrões de precipitação e à redução da disponibilidade de água torna a busca por fontes alternativas de água cada vez mais urgente. Este estudo em escala urbana avalia o potencial de recolha de água da chuva em edifícios residenciais em três cidades representativas de diferentes tipos climáticos: Lisboa, Portugal, com seu clima Mediterrâneo; Tijuana, México, caracterizada por um clima Semiárido; e Trondheim, Noruega, com um clima Subárctico. A análise considera regimes climáticos, tipologias de edifícios e padrões de consumo de água. Os principais objetivos são determinar o potencial de recolha de água da chuva, calcular a poupança de água não potável e identificar a tipologia de construção mais eficiente em cada cidade. Segundo a previsão da ONU, até 2025 quase dois terços da população global viverão em regiões com estresse hídrico. Diante desse cenário, são necessárias ações transformadoras para enfrentar a escassez de água e melhorar a resiliência urbana. Esta investigação avalia a eficiência dos sistemas de recolha de água da chuva e seu potencial como alternativa de recurso hídrico, fornecendo estimativas das poupanças de água não potável e servindo como ferramenta para futuras práticas de gestão urbana sustentável da água.

2 REVISÃO LITERATURA

2.1 SISTEMA DE RECOLHA DE ÁGUA DA CHUVA

Os sistemas de recolha de água da chuva (RAC) é a recolha, o armazenamento, o tratamento e o uso da água da chuva como fonte de água (Silva *et al.*, 2015). É uma das formas mais antigas de abastecimento de água, mas foi amplamente substituída em áreas urbanas devido à conveniência e à segurança dos sistemas de distribuição centralizados (Alim *et al.*, 2020). Em áreas rurais com escassez de água, seja devido à falta de chuvas ou de infraestrutura adequada para distribuir a água disponível, os sistemas de RAC podem ser fontes alternativa de água para uso doméstico e agrícola. Por outro lado, em áreas urbanas onde há sistemas centrais de água para atender à demanda de água, o RAC é um mecanismo sustentável de gerenciamento de inundações, pois pode reduzir o escoamento superficial (Campisano *et al*., 2017, Alim *et al*., 2020)

A eficiência do RAC depende da precipitação disponível e dos padrões de consumo local (Alim *et al.,* 2020, Herman e Schmida, 2000). É importante observar que esses sistemas recolham apenas a água que cai na área de captação (telhado) e não recolham o escoamento superficial. Eles podem ser instalados em qualquer edifício, abaixo ou acima do solo, e têm desenhos diferentes com base no tipo de edifício e de sistema (Alim *et al*., 2020).

Os sistemas de recolha de água de chuva coletam a chuva em um tanque. Numa análise geral dos sistemas de RAC, Alim *et al.* (2020) mostraram que a maioria dos RAC seguem os mesmos princípios de desenho. Os sistemas RAC coletam a água de chuva que, em seguida, passa pelo sistema. Os sistemas RAC são equipados com um dispositivo de primeira descarga que desvia os primeiros milímetros de chuva, sendo o mais aceito 1 mm (Lúcio *et al.,* 2019) ou 2 mm (Chapa *et al*., 2020, Alim *et al*., 2020), desviando a água mais contaminada. Em seguida, a água passa por um sistema de filtragem antes de ser distribuída e usada para usos finais potáveis e não potáveis do edifício. Os RACs são equipados com sistemas de armazenamento e distribuição que podem compartilhar um tanque ou ser divididos entre dois tanques, um dos quais deve ser conectado ao sistema central de água para os casos em que o RAC não puder atender à demanda de água (Silva *et al.,* 2015). O tamanho do tanque influencia o desenho e a localização, sendo o tamanho ideal do tanque o mais eficiente para atender

à demanda de água com base na água da chuva disponível, ou seja, no clima local e na área de captação (Alim *et al*., 2022, Almeida *et al*., 2023).

Há vários benefícios dos RACS. Conforme mencionado anteriormente, eles fornecem uma fonte adicional de água e reduzem o escoamento superficial (Abdullah e Al-Shareef, 2009, Gómez-Monsalve *et al.,* 2022). Além disso, eles são relativamente fáceis de instalar e manter para instalações em pequena escala (Abdulla e Al-Shareef, 2009, García-Montoya *et al.,* 2016). Outros benefícios incluem sua adaptabilidade, capacidade de funcionar em vários tipos de edifícios, em várias escalas e em diversos climas (Alim *et al*., 2020, Ali e Sang, 2023.). Os desafios associados aos RACS incluem altos custos de instalação e dados conflitantes sobre sua viabilidade econômica (Alim *et al.,* 2020, Nachson *et al*., 2022). Além da necessidade de espaço, que pode ser difícil de encontrar em áreas densamente povoadas. Há também uma falta de educação generalizada sobre esses sistemas, o que pode levar a problemas de instalação, como o tamanho correto do tanque para a área de captação e o local de instalação, com árvores ao redor que podem causar problemas de entupimento (Domènech e Saurí, 2011). Também há informações conflitantes sobre a qualidade da água da chuva coletada, a filtragem e o tratamento ideal, no entanto, a maioria concorda que ela é segura para fins não potáveis (Silva *et al.* 2015, Alim *et al*., 2020, Ghisi, 2006).

2.2 POTENCIAL DE POUPANÇA DE ÁGUA

A poupança de economia de água é a quantidade de água que pode ser economizada com o uso de água da chuva ou água cinza em vez do sistema central de água (Ghisi e Mengotti, 2007). A poupança de água pode ser calculada para usos potáveis ou não potáveis. Além disso, podem incluir água cinza, mas, para os fins deste estudo, somente a água da chuva será calculada. A economia de água pode ser calculada para usos potáveis e não potáveis, para os fins deste estudo, a economia de água será considerada para os usos não potáveis.

2.3 USO RESIDENCIAL DA ÁGUA

Historicamente, a água da chuva tem sido usada para muitas finalidades, porém, mais recentemente, tem sido usada predominantemente para fins agrícolas e como fonte de água em áreas rurais (Kisakye e Van der Bruggen, 2018). No entanto, nos últimos anos, tem havido um interesse crescente em RAC e sua capacidade de atender à demanda doméstica de água em áreas urbanas (Amin *et al.,* 2020). O uso doméstico de água é o setor de crescimento mais rápido da demanda de água (Bierkens *et al.,* 2023) e pode ser dividido em usos potáveis e não potáveis, sendo que os usos potáveis incluem beber, tomar banho e cozinhar, e os usos não potáveis são: descarga de vaso sanitário, máquinas de lavar roupa e fins de irrigação.

Para fins deste estudo, apenas os usos de água não potável são considerados. No entanto, estudos anteriores estudaram amplamente o consumo e a economia de água potável (Adullah & Al-Shareef, 2009, Herman & Schmida, 2000, Ghisi, 2006, Gómez-Monsalve *et a.l*, 2022), um número menor estimou o consumo não potável (Ali & Sang, 2023, Lúcio, 2019, Silva *et al*., 2015, Lopes *et al*., 2017) e alguns analisaram a economia total de água doce (García-Montoya *et al*., 2014, García-Montoya *et al.,* 2016). Esses consumos também são diferentes dependendo do uso do edifício, por exemplo, edifícios comerciais e universitários têm uma fração não potável maior do que os edifícios residenciais (Almeida *et al.,* 2023, Sousa *et al.,* 2018).

2.4 ESCALA

Este estudo é uma análise em escala urbana que dividirá as cidades em zonas com base na tipologia de construção (ou seja, residência unifamiliar, prédio etc.) e, em seguida, avaliará e comparará os resultados de RAC em cada zona. Investigações anteriores realizadas sobre o tema estudaram sistemas RAC em escalas menores, maiores e similares. Os estudos em escala de edifício incluem vários usos, inclusive comercial (Sousa et al., 2018), edifícios residenciais (Silva *et al*., 2015, Gárcia *et al.,* 2016, Ghisi, 2006) e edifícios universitários (Almeida *et al*., 2023, Passanha, 2022). Análises em escala urbana foram feitas em toda a cidade (Lúcio *et al.,* 2019, Cústodio & Ghisi, 2019, Ali & Sang, 2023) e para áreas maiores, incluindo regiões climáticas (Chapa et al., 2020), províncias (Adullah e Al-Shareef, 2009) e até mesmo nacionalmente (Ghisi, 2005).

3 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

Este estudo segue metodologias adaptadas de Silva *et al*. (2015) para determinar a eficiência do sistema de recolha de água da chuva e a poupança de água ao nível do edifício, além da metodologia de Lúcio *et al.* (2019) para realizar a análise em escala urbana, demonstrada na Figura 1.

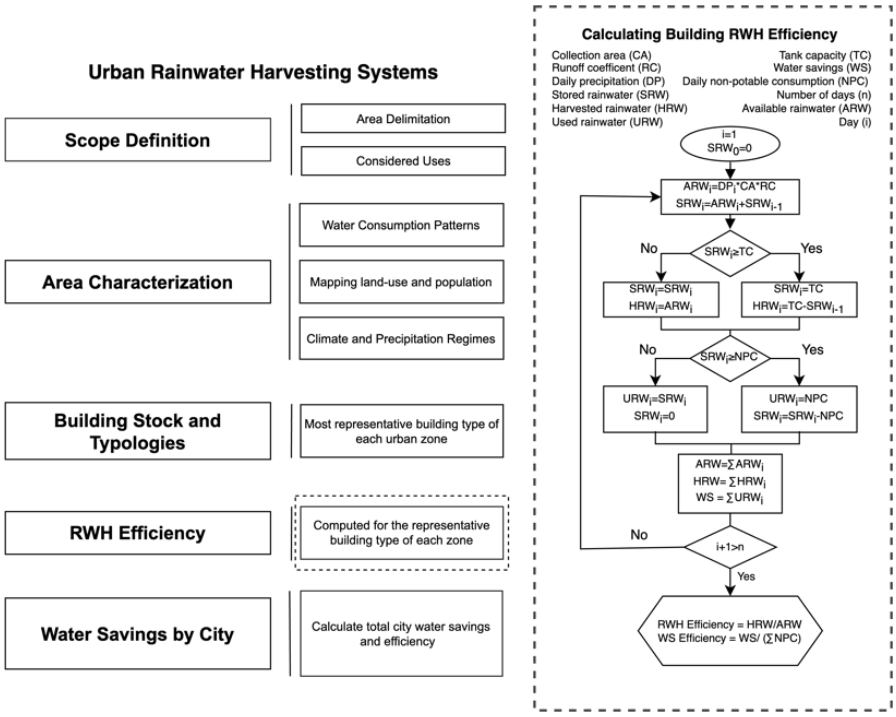


Figura 1- Metodologia em escala urbana conforme proposta por Lúcio *et al.* (2019) seguida pela análise em escala de edifício proposta por Silva *et al.* (2015).

3.1 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA DA CHUVA

O primeiro passo para calcular a eficiência da recolha é determinar a precipitação disponível. Para a simulação, são usados 10 anos de registros diários de precipitação, conforme estudos anteriores (Silva *et al.*, 2015; Lúcio *et al.*, 2019). Calcular a disponibilidade de água de chuva requer a área de captação, que é a área total do telhado de cada edifício e pode ser obtida a partir de SIG. Além disso, é necessário um coeficiente de escoamento para contabilizar a perda de água de chuva por vazamentos,

derramamentos, evaporação e umedecimento da superfície. O coeficiente de escoamento pode variar conforme a cidade e o tipo de telhado, mas para esta simulação, todas as três cidades utilizam um coeficiente de escoamento de 0,8. Estudos anteriores mostraram que o coeficiente de escoamento para telhas de barro em Lisboa varia de 0,8 a 0,84 (Silva *et al.*, 2015; Farney *et al.*, 2011), e um coeficiente de escoamento de 0,8 fornece uma estimativa conservadora. Embora os telhados de Tijuana sejam de inclinação mais baixa e predominantemente de cimento, um RC de 0,8 foi selecionado com base em estudos na Jordânia por Abdulla e Al-Shareef (2008) onde consideraram o valor adequado para tipologias de edifícios semelhantes. Usando esses dados, a disponibilidade de água de chuva é calculada utilizando o método de rendimento após abastecimento, que é atualizado diariamente com base na água de chuva previamente armazenada e na precipitação diária.

3.2 POTENCIAL DE POUPANÇA DE ÁGUA

Para calcular os potenciais de poupança de água, são necessários dados sobre o consumo doméstico, a tipologia do edifício e a população. O consumo não potável per capita deve ser determinado em cada cidade. Esse consumo pode ser fixo ou variável por estação. A fração não potável é determinada ao se encontrar o consumo de cada uso de água e totalizar os usos não potáveis. Após determinar a taxa de consumo, é necessário avaliar o tipo e uso de edifício, sendo que o estudo foca em edifícios residenciais ocupados. As características necessárias dos edifícios incluem o número de habitantes por residência e o número total de residências. Em seguida, e preciso definir a tipologia de edifício, por exemplo, casa unifamiliar ou prédio.

Usando os dados fornecidos sobre a disponibilidade de água de chuva, a tipologia dos edifícios, a população residente e o consumo de água não potável, é possível calcular a poupança potencial de água tanto por residência quanto por edifício.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS URBANAS

Seguindo a metodologia apresentada em Lúcio *et al.* (2019), as cidades foram divididas em zonas urbanas para simplificar o processo de determinação da eficiência do RAC e das economias de água não potável. A divisão foi baseada no menor nível regional para o qual dados poderiam ser encontrados, incluindo: número total de edifícios residenciais, número total de edifícios, população residencial total, número médio de habitantes por edifício e tipo de edifício. Uma vez feitas as divisões urbanas, foi determinado um edifício estatisticamente representativo para cada zona. A eficiência e as economias foram calculadas a nível do edifício e depois multiplicadas pelo número total de edifícios em cada zona, fornecendo economias de água e eficiência por zona urbana.

3.4 CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA E POUPANÇA

Os resultados são calculados em três escalas: a primeira sendo por edifício, a segunda por cada zona urbana, e o resultado final sendo a eficiência e economia em toda a cidade, conforme demonstrado na Figura 2. A eficiência da recolha é definida como a razão entre a água de chuva captada e a água de chuva disponível. A economia de água é a razão entre a água de chuva usada e o consumo diário doméstico de água não potável.

(i) Escala Edifício	(ii) Escala Zonas Urbanas	(iii) Escala Cidade
Eficiência RAC (%) $\frac{\Sigma HRW}{\Sigma ARW}$	Eficiência RAC (%) $\frac{\Sigma HRW \times Total\ Buildings}{\Sigma ARW \times Total\ Buildings}$	Eficiência RAC (%) $\frac{\Sigma HRW_{Zones}}{\Sigma ARW_{Zones}}$
Poupança de Água Não-Potável (%) $\frac{\Sigma URW}{\Sigma NPC}$	Poupança de Água Não-Potável (%) $\frac{Total\ Buildings\ (\frac{\Sigma URW_{Building}}{\Sigma NPC_{Building}})}{Total\ Buildings}$	Poupança de Água Não-Potável (%) $\frac{\Sigma URW_{Zones}}{\Sigma NPC_{Zones}}$

Figura 2- Cálculos de eficiência de sistema de recolha e poupança de água não potável

A eficiência do sistema RAC (%) é calculada como a razão entre a soma da água de chuva captada, *ΣHRW,* e a soma da água de chuva disponível, *ΣARW*. Por outro lado, a economia de água não potável (%) é determinada pela razão entre a soma da água de chuva utilizada, *ΣURW*, e a soma do consumo de água não potável, *ΣNPC*. Esses cálculos permitem avaliar a eficácia dos sistemas de recolha de água de chuva em diferentes escalas, proporcionando uma visão detalhada do potencial de economia de água em contextos urbanos diversos.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

A eficiência e o potencial de economia de água dos sistemas de recolha de água de chuva são fortemente influenciados por fatores locais como clima, tipos de edifícios e padrões locais de consumo de água. A seção seguinte caracteriza cada um dos três estudos de caso de forma abrangente. Começa com uma classificação climática, fornecendo uma breve explicação do contexto climático local e detalhando os dados de precipitação coletados. Em seguida, é feita uma análise dos padrões locais de consumo de água e do uso de água não potável em cada cidade. Além disso, são discutidos dados de população residencial e detalhes do estoque de edifícios, juntamente com uma explicação de como as zonas urbanas foram delineadas em cada cidade. Esta abordagem estruturada permite um exame aprofundado das variáveis que impactam a eficácia dos sistemas de RAC em diversos ambientes urbanos.

4.1 LISBOA, PORTUGAL

Segundo Beck *et al.* (2018), seguindo a Classificação Climática Köppen-Geiger atualizada, Lisboa enquadra-se na categoria Csa, denotando um clima mediterrâneo de verão quente. Os dados meteorológicos de Lisboa foram obtidos do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) para a Estação Meteorológica de Lisboa 535. Estavam disponíveis registros diários de clima e precipitação de 1855 a 2018, embora apenas os dados de 2007 a 2018 tenham sido utilizados na simulação. Lisboa apresenta uma temperatura máxima média de 22°C e uma mínima média de 14°C. A cidade recebe chuvas periódicas, porém intensas, com média de 750 mm anuais (IPMA, 2023), com o pico de precipitação ocorrendo em novembro e dezembro e a precipitação mínima em agosto e setembro, conforme demonstrado na Figura 3.

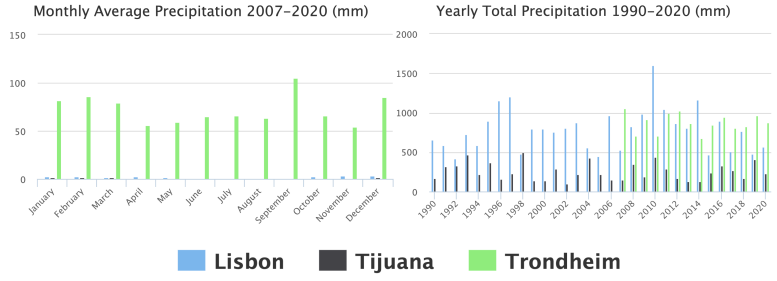


Figura 3- Precipitação Média Mensal e Totais Anuais

O consumo total de água doméstica em Lisboa varia bastante conforme a fonte. A Agência de Energia e Ambiente relatou um consumo doméstico diário de 133 litros, enquanto a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) relatou um consumo diário de 195 litros. Para calcular o consumo doméstico diário per capita, foram coletados dados de estudos publicados (Silva *et al.*, 2015; Lúcio *et al.*, 2019), estudos não publicados (Passanha, 2023) e relatórios governamentais (ERSAR, n.d.; Observatórios Lisboa, 2023; EPAL, n.d.). O valor médio foi considerado representativo, resultando em um consumo doméstico total de 0,149 m³. A fração não potável foi determinada utilizando o mesmo método, resultando em um consumo não potável de aproximadamente 34% (0,051 m³ per capita), contabilizando apenas os usos finais de descargas de vasos sanitários e máquinas de lavar roupa, com valores de 24,7% e 9,3%, respetivamente, conforme demonstrado na Figura 4. Esses valores de consumo são fixos e não mudam ao longo do ano. Em Lisboa, as zonas urbanas foram delineadas no limite administrativo da freguesia, resultando em 24 zonas, cada uma correspondendo a uma freguesia da cidade, conforme demonstrado na Figura 5. Os dados foram obtidos do Censo 2021 do INE, incluindo a população residencial total, o número total de edifícios residenciais (aqueles designados para uso residencial ≥50%) e o total de residências, juntamente com o número médio de andares e residências por freguesia. O número médio de moradias por edifício foi calculado dividindo-se o número total de moradias pelo número total de edifícios, o que permitiu a determinação dos tipos de edifícios e uma estimativa de moradores por edifício. A área de captação foi determinada utilizando a área do telhado do tipo de edifício residencial mais representativo em cada freguesia. O estoque de edifícios de Lisboa tem uma maior concentração de edifícios de apartamentos, que representam 61% dos edifícios, com um menor número de casas unifamiliares, que representam 30% dos edifícios residenciais da cidade, conforme demonstrado na Figura 6. Usando os dados fornecidos, um edifício representativo por freguesia foi definido e então utilizado para calcular a eficiência e as economias de água não potável em toda a cidade.

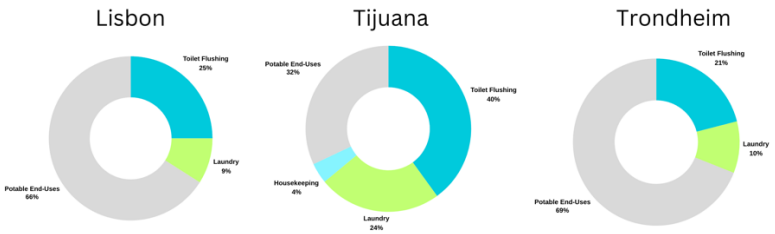


Figura 4- Fração de Água não Potável

Figura 5- Zonas Urbanas

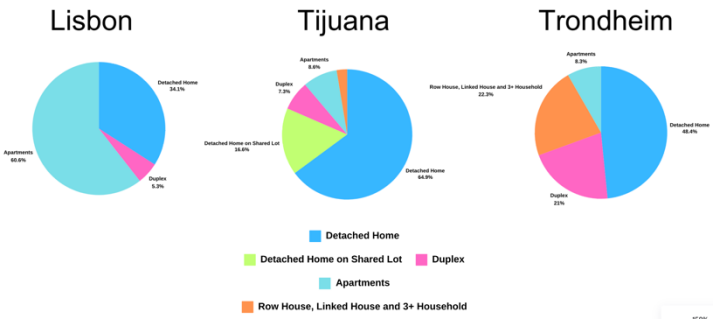


Figura 6- Tipologia dos Edifícios Residenciais

4.2 TIJUANA, MÉXICO

Tijuana é classificada na categoria BSk de acordo com a Classificação Climática de Köppen, indicando um clima semiárido frio. A cidade recebe uma precipitação anual média de 257 mm (SMN, 2023), com invernos úmidos atingindo o pico em janeiro e fevereiro e mínima precipitação durante os meses de verão, semelhante a Lisboa. Os dados climáticos foram obtidos do Serviço Meteorológico Nacional do México (SMN), especificamente da Estação Presa Rodríguez 2038 de Tijuana. Os registros abrangem o período de 1920 a 2022, embora apenas os dados de 2007 a 2018 tenham sido utilizados para a simulação. Tijuana apresenta verões ligeiramente mais quentes e invernos mais frios em comparação com Lisboa, com uma temperatura máxima média de 24,75°C e uma temperatura mínima média de 12,3°C (INEGI, s.d.).

Os dados de consumo para Tijuana foram fornecidos pela Comissão Estatal de Serviços Públicos de Tijuana (CESPT) por meio de uma solicitação feita à Plataforma Nacional de Transparência do México (PNT). Em 2023, o consumo diário total por residência foi de 0,144 m³, com uma fração não potável de 68% (0,098 m³ por capita), abrangendo a descarga de vasos sanitários (40%), lavagem de roupas (24%) e limpeza (4%), conforme demonstrado na Figura 4. No entanto, Tijuana apresenta um consumo sazonal variável. Para os meses de março-junho, outubro e novembro, o consumo total de água é de 0,144 m³, com consumo não potável em 0,098 m³. Durante os meses de verão de julho a setembro, tanto o consumo total quanto o consumo não potável de água atingem o pico, com valores de 0,154 m³ e 0,105 m³, respectivamente. Em contraste, os meses de inverno de dezembro a fevereiro mostram o menor consumo, com consumo total de 0,138 m³ e consumo não potável de 0,094 m³.

Para a cidade de Tijuana, os dados estavam disponíveis em uma escala menor conhecida como áreas geográficas urbanas (AGEB), que foram agrupadas por proximidade e tipologia de edifícios devido à sua abundância. O resultado foi 10 zonas que seguem de perto os limites administrativos das 9 delegações da cidade. Os dados foram obtidos do Censo de 2020 do Instituto Nacional de Estatística e Geografia do México (INEGI), incluindo a população residencial total, o número total de edifícios residenciais (contando apenas os habitados) e o número total de residências.

Além do número médio de habitantes. Como mencionado anteriormente, o número médio de residências por edifício foi calculado dividindo o total de residências pelo total de edifícios, o que permitiu a determinação dos tipos de edifícios e uma estimativa de residentes por edifício. A localidade de Tijuana é composta predominantemente por casas unifamiliares, que representam 70% do estoque de edifícios, e edifícios multifamiliares representam apenas 9%, conforme demonstrado na Figura 6.

4.3 TRONDHEIM, NORUEGA

Trondheim está classificada na Classificação Climática de Köppen como DFc, caracterizada por temperaturas subárticas, verões frios e precipitação ao longo do ano. Os dados diários de clima foram obtidos do Centro de Serviços Climáticos da Noruega, para a Estação Meteorológica Voll SN68860, cobrindo o período de 2007 a 2018. Entre as três cidades, Trondheim se destaca como a mais fria, com uma temperatura máxima média de 10°C e uma temperatura mínima média de 2,5°C. Diferentemente de Lisboa e Tijuana, Trondheim recebe uma precipitação anual significativa de 861 mm, com picos ocorrendo em setembro, mas bastante distribuída ao longo do ano. Além disso, é complementada por aproximadamente 100 mm de neve durante os meses de inverno (Centro Norueguês para Serviços Climáticos, 2023).

Em 2023, de acordo com as Estatísticas Nacionais da Noruega, o consumo diário médio de água por capita em Trondheim foi de 0,157 m³. A informação sobre a fração não potável foi limitada; assim, foram utilizados dados de Passanha (2023), indicando uma fração não potável de 31%, equivalente a 0,049 m³, considerando apenas a descarga de vasos sanitários e o uso de máquina de lavar roupas. Os dados sobre tipologia de edifícios em Trondheim também foram limitados no nível local e todos os dados necessários não estavam disponíveis. Portanto, a cidade não foi dividida em zonas e as simulações foram realizadas com base nos dados de tipologia de edifícios fornecidos pelas Estatísticas da Noruega para 2023. Trondheim possui um estoque residencial diversificado, com 48% dos edifícios sendo casas unifamiliares, 22% casas geminadas/duplex e apenas 8% são complexos de apartamentos, conforme ilustrado na Figura 6.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Usando as metodologias descritas anteriormente, a eficiência da recolha de água da chuva e a poupança de água não potável foram calculadas para cada caso de estudo. Esses cálculos foram testados com diferentes capacidades de tanque para considerar o tamanho de tanque mais eficiente para cada cidade, com os resultados apresentados na Figura 7 abaixo. A eficiência da recolha de água da chuva é definida como a relação entre a água da chuva recolhida e a água da chuva disponível. A poupança de água não potável foi definida como a relação entre a água da chuva usada e o consumo diário não potável. Em ambos os casos, à medida que a capacidade do tanque aumenta, esses resultados também aumentam, os resultados finais são demostrados no Quadro 1.

Quadro 1- Capacidade ideal do tanque e o total de água recolhida

	Lisboa	**Tijuana**	**Trondheim**
Eficiência RAC	97%	100%	85%
Poupança de Água	64%	11%	52%
Capacidade ideal do tanque (m³)	200	15	20
Edifício Ideal	Complexo Multifamiliar	Casa unifamiliar	Duplex
Total Água Recolhida (m³)	37,897.06	2,029.94	4,878.95

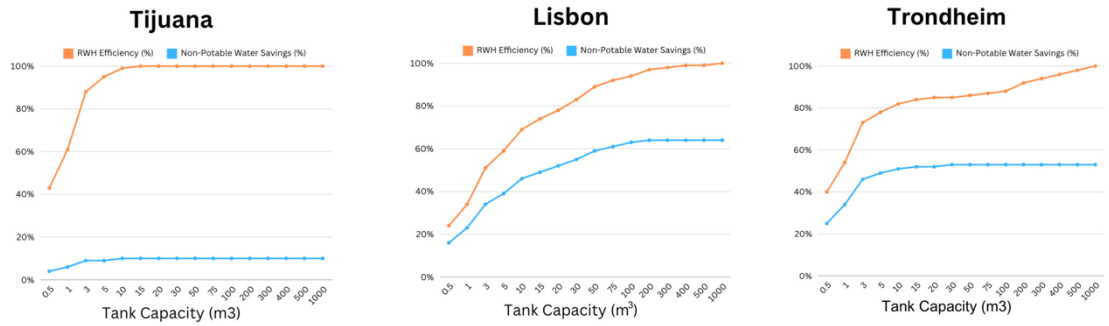


Figura 7- Resultados de poupança de água não potável e eficiência da recolha de água da chuva

Dos três estudos de caso, Lisboa apresentou a maior poupança de água não potável. Considerando uma capacidade infinita de tanque, a cidade pode economizar até 64% do seu consumo diário de água não potável e alcançar uma eficiência de 97% na captação de água de chuva através dos sistemas de captação. A cidade de Lisboa experimenta chuvas intensas em um curto período de tempo, o que, combinado com o maior consumo dos edifícios, garante que a água armazenada no tanque possa ser consumida e reabastecida. O tamanho ideal do tanque para Lisboa é de 200 m³, pois após esse ponto, a eficiência e a poupança se estabilizam. Esses resultados são comparáveis aos de Lúcio *et al.* (2020), onde a poupança máxima de água não potável de qualquer zona foi de 69%. Assumindo a capacidade ideal do tanque de 200 m³, a tipologia de edifício ideal em Lisboa foi um complexo multifamilar com 2-3 residências e 2 habitantes por residência. Esse tipo de edifício apresenta uma poupança de água não potável entre 92% e 96% e uma eficiência na captação de água de chuva entre 97% e 100%.

Tijuana teve a menor poupança de água não potável, com apenas 11%, mas conseguiu alcançar 100% de eficiência na captação. Assumindo uma capacidade infinita de tanque, o tamanho ideal é um tanque de 15 m³; após esse ponto, a eficiência e a poupança de água se estabilizam. A falta de precipitação combinada com pequenas áreas de captação significa que o clima e as tipologias de edifícios não são ideais para sistemas de captação de água de chuva. Considerando a capacidade ideal do tanque, a tipologia de edifício ideal é uma casa unifamiliar de 130 m² com 2-3 habitantes. A poupança de água não potável foi de 19,7% e a eficiência na captação foi de 100%. Isso se deve à maior área de captação em comparação com outras casas unifamiliares na cidade. O edifício menos eficiente foi o complexo de apartamentos na Zona Rio, onde o consumo foi muito maior do que o fornecimento. O potencial de poupança de água foi de apenas 5,68%, mas alcançou uma eficiência de captação de 100%.

Finalmente, em Trondheim, a poupança de água não potável foi de 52% com uma eficiência de 85% na captação. A capacidade ideal do tanque para a poupança de água não potável foi de 20 m³, pois após esse ponto estabiliza, no entanto, assumindo uma capacidade infinita de tanque, a eficiência na captação continua a crescer conforme o tamanho do tanque aumenta, até atingir 100% em 700 m³. Considerando uma capacidade de tanque de 20 m³, todos os tipos de edifício, exceto apartamentos, apresentaram poupança de água não potável superior a 95%. Inversamente, o tipo de edifício mais eficiente na captação foi o complexo de apartamentos, com uma eficiência de 99,98% mas uma poupança de água de apenas 36,85%. O tipo de edifício mais eficiente em Trondheim foi a casa geminada, com 95% de eficiência na captação e um potencial de poupança de água de 96%.

5.1 ANALISE DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS E TIPOLOGIA

Para avaliar como as características locais impactam a eficiência dos sistemas de recolha, foi realizada uma série de cenários comparando a cidade de Lisboa com a precipitação, consumo e tipologia de edifícios de Tijuana e Trondheim, os resultados mostrado na Figura 8. A análise da eficiência do sistema RAC em vários cenários revela que a precipitação de Tijuana consistentemente proporciona a maior eficiência, alcançando 100% com uma capacidade de tanque de 15 m³ ou maior devido à precipitação limitada. A precipitação de Trondheim demonstra pouca eficiência, menos ideal que a de Tijuana, alcançando 100% com uma capacidade de tanque apenas de 1000 m³, a igual que Lisboa. Incorporar a precipitação de Lisboa com a de Tijuana melhora significativamente a eficiência, alcançando 100% com um tanque de 50 m³, enquanto combinar a precipitação de Lisboa com os edifícios e padrões de consumo de Trondheim resulta na menor eficiência, atingindo 100% somente com um tanque de 1000 m³.

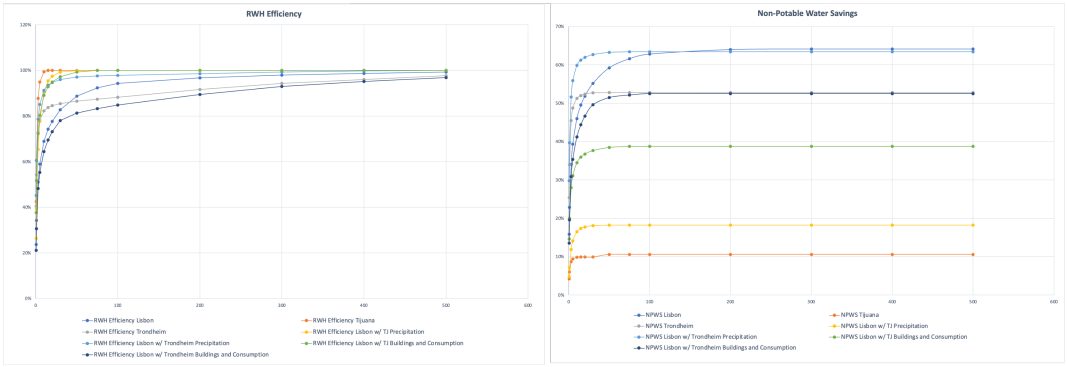


Figura 8- Resultados do Analise de cenários Climáticos e Tipologia

Para a poupança de água não potável, Lisboa com a precipitação de Trondheim oferece a maior poupança, alcançando 63% para capacidades de tanque de 30 m³ ou maiores, enquanto a própria precipitação de Lisboa resulta em 64%, mas com um tanque de 200 m³. Em contraste, a precipitação de Tijuana resulta na menor poupança, alcançando 11% mesmo com os tanques maiores. Lisboa com os edifícios e consumo de Tijuana mostra uma eficiência moderada, atingindo 39% para tanques maiores, enquanto Lisboa com os edifícios e consumo de Trondheim mostra uma poupança semelhante ao cenário de precipitação de Trondheim. No geral, usar a precipitação e as características de edifícios de Trondheim oferece as melhorias mais substanciais em poupança de água não potável e eficiência para Lisboa.

Concluímos que a variável precipitação tem o maior impacto na eficiência da captação de água de chuva e na poupança de água não potável.

6 CONCLUSÕES

Este estudo avalia como as características urbanas e, mais importante, a precipitação afetam a eficiência dos sistemas de recolha de água de chuva, examinando uma cidade mediterrânea com prédios, uma cidade subártica com tipos variados de edifícios e uma cidade semiárida com predominantemente casas unifamiliares. Cidades com alta precipitação e prédios altos, como Lisboa, atingem a maior eficiência devido à rápida rotatividade dos tanques. Os resultados mostram que os sistemas de RAC podem reduzir o uso diário doméstico de água não potável em mais de 50% em Lisboa e Trondheim, onde a maior precipitação e as maiores áreas de captação favorecem a recolha de água. Apesar de ter menos precipitação que Trondheim, Lisboa se beneficia do alto consumo em prédios, que compensa pela precipitação menos frequente, mas mais intensa. Por outro lado, Tijuana, com sua

precipitação insuficiente, ainda coleta e utiliza de forma eficaz toda a água de chuva disponível. Este estudo destaca que a eficiência do RAC é confiável apenas quando todas as variáveis locais—como precipitação, tipo de edifício e padrões de consumo—são consideradas. Os testes de cenários revelam que o sistema de recolha de Tijuana é o mais eficiente devido à sua capacidade de utilizar totalmente a água de chuva disponível, enquanto a combinação dos padrões de edifício e consumo de Lisboa com a precipitação de Trondheim resulta na maior poupança de água não potável.

Neste estudo, foram feitas simplificações devido às limitações de dados para Tijuana e Trondheim. Por exemplo, foram feitas suposições sobre o número de andares e o uso médio doméstico, e a análise de Trondheim se baseou em dados de um município, em vez de dados de bairros. Além disso, o impacto da neve nos sistemas de RAC de Trondheim não foi avaliado devido à indisponibilidade de dados diários de neve, mas isso deve ser analisado em pesquisas futuras. Além disso, o estudo se baseou em dados climáticos históricos; pesquisas futuras devem incorporar projeções climáticas para avaliar com precisão como a eficiência dos sistemas de captação de água de chuva evoluirá com as mudanças nos padrões climáticos nas próximas décadas. Mais análises são necessárias para otimizar as capacidades dos tanques para diferentes tipos de edifícios. Embora este estudo tenha identificado capacidades gerais de tanques que maximizam a eficiência, futuros estudos devem explorar os tamanhos ideais de tanques para diferentes tipologias de edifícios. Por exemplo, em regiões semiáridas como Tijuana, tanques comunitários podem ser mais eficazes do que tanques individuais. Além disso, examinar a integração dos sistemas de RAC com Soluções Baseadas na Natureza, como telhados verdes e paredes verdes, pode fornecer informações valiosas para melhorar a eficiência dos sistemas e se adaptar às condições climáticas em mudança.

Em resumo, os sistemas de RAC oferecem economias significativas de água em climas mediterrâneo e subárctico, sendo a precipitação a variável mais influente. Embora os sistemas de RAC possam não ser universalmente ideais, eles representam um componente promissor das estratégias de gerenciamento sustentável da água. Estudos futuros devem continuar a refinar esses sistemas e explorar sua integração com outras tecnologias de conservação de água.

Reconhecimento

Este estudo enquadra-se no projeto EVIDENCE financiado pela EEA, realizado em parceria com o instituto de investigação Norueguês SINTEF, e dá continuidade a estudos anteriores no âmbito do aproveitamento de água da chuva.

Financiado pelo EEA Grants - European Economic Area Financial Mechanism 2014-2021

Parcerias: IST-ID e SINTEF

REFERÊNCIAS

Abdulla, F. A., Al-Shareef, A. W., Abdulla, F. A., & Al, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. Desalination, 243, 195–207. https://doi.org/10.1016/j.desal.200

Ali, S., & Sang, Y. F. (2023). Implementing rainwater harvesting systems as a novel approach for saving water and energy in flat urban areas. Sustainable Cities and Society, 89. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104304

Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2020). Suitability of roof harvested rainwater for potential potable water production: A scoping review. In Journal of Cleaner Production (Vol. 248). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119226

Almeida, A. P., Liberalesso, T., Silva, C. M., & Sousa, V. (2023). Combining green roofs and rainwater harvesting systems in university buildings under different climate conditions. Science of The Total Environment, 887, 163719. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163719

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, 5(1). https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. In Water Research (Vol. 115, pp. 195–209). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056

Chapa, F., Krauss, M., & Hack, J. (2020). A multi-parameter method to quantify the potential of roof rainwater harvesting at regional levels in areas with limited rainfall data. Resources, Conservation and Recycling, 161. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104959

Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the metropolitan area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs. Journal of Cleaner Production, 19(6–7), 598–608. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010

García-Montoya, M., Sengupta, D., Napoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2016). Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. Journal of Cleaner Production, 130, 82–91. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.109

Ghisi, E., & Mengotti de Oliveira, S. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in Southern Brazil. Building and Environment, 42(4), 1731–1742. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.001

Gómez-Monsalve, M., Domínguez, I. C., Yan, X., Ward, S., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Environmental performance of a hybrid rainwater harvesting and greywater reuse system: A case study on a high water consumption household in Colombia. Journal of Cleaner Production, 345. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131125

Kisakye, V., & Van der Bruggen, B. (2018). Effects of climate change on water savings and water security from rainwater harvesting systems. Resources, Conservation and Recycling, 138, 49–63. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.009

Lúcio, C., Silva, C.M., & Sousa, V. (2020). A scale-adaptive method for urban rainwater harvesting simulation. Environ Sci Pollut Res, 27, 4557–4570. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04889-6

Silva, C. M., Sousa, V., & Carvalho, N. V. (2015). Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. Resources, Conservation and Recycling, 94, 21–34. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.004

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONTRIBUTO DAS COBERTURAS VERDES PARA A BIODIVERSIDADE DE LISBOA

Margarida Rei [a], Ana I. Leal [b], Patrícia Tiago [c], Cristina Matos Silva [d]

[a] cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE - Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal, fc53656@alunos.fc.ul.pt

[b] cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE - Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal aiencarnacao@ciencias.ulisboa.pt

[c] cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE - Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal, pmtiago@ciencias.ulisboa.pt

[d] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa. Cristina.matos.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Os benefícios que as coberturas verdes podem trazer para as cidades estão cada vez mais identificados e analisados, e neles incluem-se a valorização económica das zonas urbanas, a retenção de águas pluviais, a redução da temperatura ambiente das cidades, a melhoria da qualidade do ar, entre outros fatores. No entanto, existe uma lacuna de conhecimento relativa à importância destas infraestruturas para a biodiversidade urbana, que o projeto GRAVITY pretende ajudar a preencher.

No âmbito deste projeto, foi realizada uma avaliação da biodiversidade associada às coberturas verdes de Lisboa, com foco nas comunidades de aves, através do uso de pontos de escuta. Além disto, foi ainda feita uma avaliação das comunidades de artrópodes através de transetos, batimento com rede e *pitfalls*. No entanto, os resultados apresentados neste artigo contemplam apenas o grupo das aves, e apenas uma estação do ano (inverno).

Este trabalho tem 3 objetivos principais: (1) caracterizar as comunidades de aves que ocupam as coberturas verdes em Lisboa, (2) compará-las com as comunidades de jardins urbanos que não são coberturas e (3) com as comunidades presentes nas zonas cinzentas das cidades. Pretende-se assim, compreender a influência destas infraestruturas para a biodiversidade urbana e analisar o seu potencial papel na criação de corredores verdes urbanos.

Os resultados preliminares deste trabalho demonstram que as comunidades de aves que ocupam as coberturas verdes amostradas são semelhantes àquelas que utilizam os jardins urbanos, realçando assim a importância destas infraestruturas na preservação da biodiversidade em ambientes urbanos, podendo complementar os espaços verdes já existentes na matriz da cidade.

Palavras-chave: ecologia urbana, aves, coberturas verdes, conservação de biodiversidade

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que em 2050, 68% da população humana habite em zonas urbanas (United Nations, 2018). A expansão destas zonas traz consigo a fragmentação e destruição de habitats naturais (Xiao et al., 2020), devido à construção de habitação, infraestruturas para negócios e prestação de serviços, bem como sistemas rodoviários. O ritmo a que a urbanização está a crescer causa ainda um aumento de poluição, depleção de recursos, aumento de temperatura e diminuição da biodiversidade (Xing et al., 2017). Por todos estes fatores aumenta a necessidade de criação de soluções que tornem o crescimento urbano mais sustentável.

Soluções baseadas na natureza (ou nature-based solutions, NBS), são definidas pelas Nações Unidas (2022) como "ações para proteger, conservar, restaurar, utilizar e gerir ecossistemas naturais ou modificados terrestres, de água doce, costeiros ou marinhos que abordam desafios sociais, económicos e ambientais eficaz e adaptativamente, enquanto simultaneamente fornecem bem-estar humano, serviços de ecossistema, resiliência e benefícios de biodiversidade". Este tipo de soluções surgem como alternativas para tornar as cidades espaços mais sustentáveis, além de mais agradáveis para se viver (Teotónio et al., 2021, Xing et al., 2017).

As coberturas verdes são uma destas soluções baseadas na natureza, e referem-se, geralmente, a telhados de edifícios que foram parcial ou totalmente cobertos com uma camada de vegetação (além de outras camadas, como uma membrana impermeável e meio de crescimento para a vegetação) (Castleton et al., 2010). De um modo geral, as coberturas podem ser divididas entre "intensivas" e "extensivas" (Rowe, 2011), apesar de, por vezes, também surgir a categoria "semi-intensiva". Esta categorização depende da profundidade do solo, e da manutenção requerida, sendo que as coberturas intensivas requerem solos mais profundos e mais manutenção. Já foi provado que coberturas verdes trazem vários benefícios para a sustentabilidade das áreas urbanas, tais como a diminuição de temperatura, retenção de águas pluviais e melhoria da qualidade do ar (Castleton et al., 2010), além de benefícios económicos (Teotónio et al., 2021), efeitos positivos no bem-estar humano através de isolamento sonoro (Connelly, 2015) e da criação de espaços recreativos que também são esteticamente agradáveis (Teotónio et al., 2021, Xing et al., 2017).

No âmbito deste projeto, a esmagadora maioria das coberturas verdes amostradas encontram-se ao nível térreo e são de livre acesso ao público. As exceções são as coberturas superiores da Fundação Calouste Gulbenkian e a Fábrica de Água de Alcântara.

Este projeto está a decorrer na cidade de Lisboa, Portugal, sendo a cidade mais populosa do país, com quase 550 000 habitantes em 2021 (INE, 2021). De acordo com a classificação climática Köppen-Geiger atualizada (Kottek et al., 2006, Peel et al., 2007), Lisboa tem a classificação de Csa, representando um clima quente temperado com verões quentes e secos.

Trabalhos anteriores sobre coberturas verdes, realizados em Lisboa, tiveram um maior foco no retorno económico do investimento em coberturas verdes, dados os seus benefícios conhecidos, tais como o aumento do valor estético e de lazer, regulação térmica, isolamento sonoro, entre outros (Teotónio, 2016, Cruz et al., 2017, Melo et al., 2020), com menor atenção dada aos seus efeitos na biodiversidade urbana.

Assim, este trabalho pretende analisar o impacto das coberturas verdes de Lisboa nas comunidades de aves da cidade. As aves são muito usadas em estudos de ecologia pois, para além de serem um grupo bem estudado, muitas espécies são fáceis de detetar e observar, são bons indicadores de alterações no ambiente a uma escala mais alargada, e por isso muito úteis para avaliar a qualidade ambiental (Mekonen, 2017). A hipótese principal deste trabalho é de que a riqueza específica e a

diversidade das comunidades de aves das coberturas verdes de Lisboa serão semelhantes às dos espaços verdes/jardins urbanos da cidade e superiores quando comparadas com zonas cinzentas.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 DEFINIÇÃO DE COBERTURAS VERDES

Neste projeto todas as infraestruturas construídas que estejam cobertas por vegetação, independentemente de se encontrarem num nível elevado (como telhados) ou de se encontrarem perto do nível do solo, foram consideradas coberturas verdes e tidas em conta para a possibilidade de amostragem.

2.2 ÁREA DE ESTUDO

A amostragem das comunidades de aves foi realizada em várias coberturas verdes em diferentes zonas da cidade de Lisboa. A escolha das coberturas a amostrar foi baseada nos dados recolhidos e fornecidos por outros elementos da equipa do projeto GRAVITY, estando algumas já incluídas no projeto dentro da plataforma de Ciência Cidadã *BioDiversity4All* (Figura 1).

Além disso, para todas as coberturas verdes foram identificados um jardim urbano e uma zona cinzenta, que foram usados como controlos nesta experiência. Os controlos encontram-se a uma distância máxima de 250 m em linha reta da sua cobertura respetiva. Na Figura 2 é apresentado um exemplo de um destes conjuntos.

Depois de uma escolha preliminar das coberturas e das suas áreas controlo, foi feita uma avaliação no terreno de todas as áreas ainda não visitadas ou bem conhecidas, para melhor determinar a sua acessibilidade ao público, e em que condições, nomeadamente a nível de manutenção, se encontravam. Assim, no total, foram amostradas 11 coberturas verdes, 11 jardins urbanos e 11 zonas cinzentas.

Figura 1- Imagem aérea da cidade de Lisboa (Google Satellite), com indicação das coberturas verdes incluídas no projeto GRAVITY na plataforma *BioDiversity4All*. Nem todas as coberturas aqui representadas foram escolhidas para realização de amostragens sistemáticas de biodiversidade.

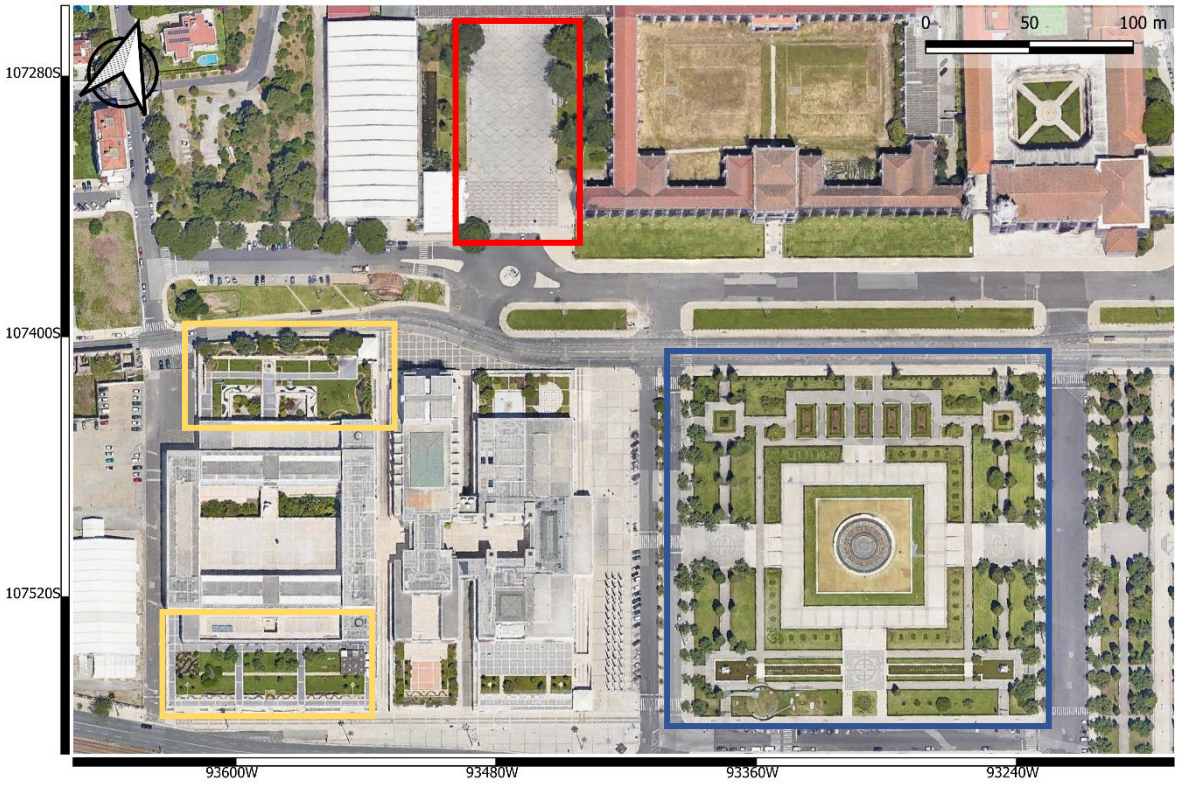


Figura 2 – Mapa de exemplo de um conjunto de cobertura verde e respetivos controlos situados na zona de Belém, Lisboa: a) Centro Cultural de Belém (coberturas verdes, a amarelo); b) Praça do Império (jardim urbano, a azul), e c) Museu da Marinha (zona cinzenta, a vermelho).

2.3 AMOSTRAGEM / TRABALHO DE CAMPO

Para a amostragem de aves foram utilizados pontos de escuta, com duração de 10 minutos, durante os quais foram registadas todas as aves detetadas visual e/ou auditivamente dentro e fora de um raio de 30 metros. O número de pontos de amostragem em cada local dependeu da sua área, por forma a conseguir abranger a diversidade de habitats presentes em cada uma delas. Assim em locais de maior dimensão, que tendencialmente serão mais diversos (p.e. uma parte composta apenas por vegetação rasteira e outra com arbustos ou árvores, na mesma cobertura), foram realizados mais pontos do que em zonas mais pequenas e mais homogéneas.

A amostragem teve início a 4 de dezembro de 2023 e terminou a 7 de fevereiro de 2024. Não foram realizadas sessões de amostragem em dias com condições meteorológicas adversas, como chuva e vento, pois estas condições tendem a afetar a atividade das aves, bem como a capacidade de deteção pelo observador.

Todos os indivíduos detetados foram identificadas até à espécie, com exceção dos géneros *Larus* e *Sturnus* (respetivamente, gaivotas e estorninhos), para as quais a identificação foi mantida ao nível do género.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para todas as análises efetuadas foram utilizados apenas dados de aves registadas a utilizar o espaço (cobertura/jardim ou zona cinzenta), tendo sido excluídos registos, por exemplo, de aves vistas apenas a sobrevoar o local.

Para a análise da riqueza específica de cada tipologia de área de amostragem (coberturas verdes, jardins urbanos e zonas cinzentas), foi comparado o número de espécies em cada local. A normalidade de cada amostra (i.e., cada local) foi testada através de um teste de normalidade Shapiro-Wilk. Não se cumprindo os pressupostos de normalidade, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis para testar a existência de diferenças entre amostras. No caso de serem cumpridos os pressupostos, a existência de diferenças entre os conjuntos foi testada através de ANOVAs. No caso da existência de diferenças, foi posteriormente realizado um *pairwise* Wilcoxon *rank sum test*, para identificar entre que grupos existiam diferenças.

Para além desta análise, foi calculado o índices de diversidade de Shannon. Este índie indica-nos o quão diversa uma comunidade é. Tende a tomar valores entre 1.5 e 3.5, raramente passando o valor de 3.5, sendo este valor a representação de grande diversidade de espécies. Mais uma vez, as amostras foram testadas para a normalidade, e os seus valores foram posteriormente comparados através de um teste de Wilcoxon.

Toda a análise estatística presente neste trabalho foi feita através do programa de *software* estatístico R (v4.2.2; R Core Team 2002), utilizando os packages “vegan”, “tidyverse”, “ggpubr”, “rstatix” e “ggplot2”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relativamente à comparação entre o número de espécies registadas em cada local (Figura 3), não se tendo cumprido os pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk com p-value= 0.893 para as coberturas, p= 0.263 para os jardins urbano e p= 0.040 para as zonas cinzentas), realizaram-se testes de Kruskal-Wallis, para determinar se há diferença entre as amostras. Os resultados indicam haver diferenças significativas entre as 3 tipologias de habitats (H= 10.88, p-value= 0.004), sendo que são as zonas cinzentas que apresentam uma diferença estatisticamente significativa quer em relação a coberturas verdes, quer a jardins urbanos (pairwise Wilcoxon rank sum test, p-value= 0.018 e 0.015, respetivamente).

As coberturas e os jardins não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si no que diz respeito à métrica da riqueza específica.

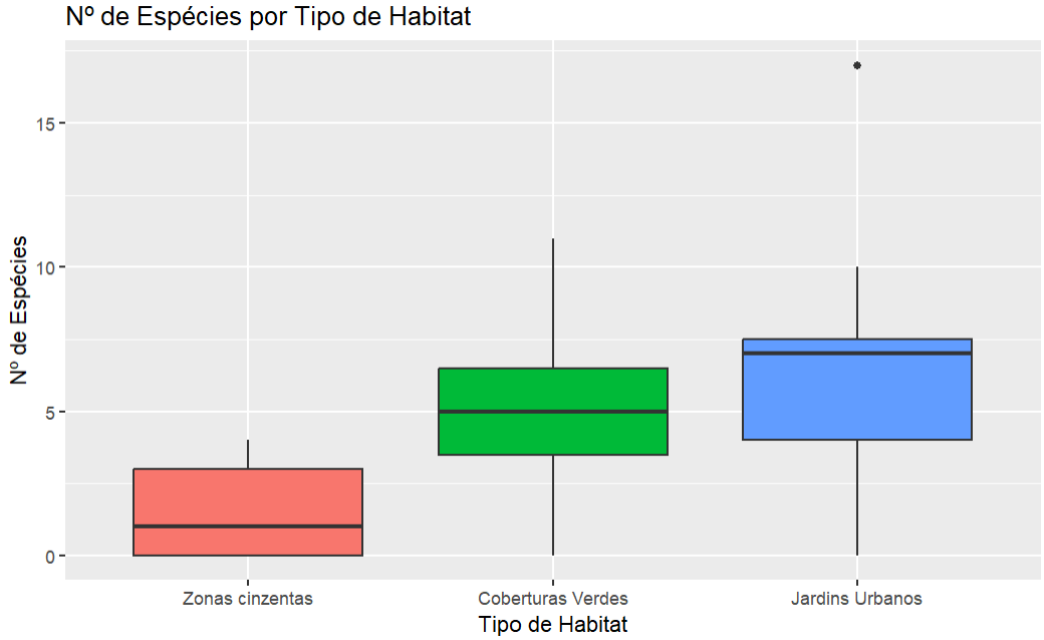


Figura 3 – Gráficos de caixas e bigodes do nº de espécies registadas a utilizar cada um dos tipos de habitat amostrados (zonas cinzentas a vermelho, coberturas verdes a verde e jardins urbanos a azul).

Passando então à comparação da diversidade de espécies registada em cada local de amostragem, o valor médio do índice de Shannon para cada tipo de local foi de: H= 1.33 para coberturas verdes, H= 1.36 para jardins urbanos e de H= 0.59 para zonas cinzentas (Figura 4). Os valores deste índice tendem a estar entre 1.5 e 3.5, o que indica que as comunidades das coberturas e dos jardins parecem não divergir significativamente dos valores esperados. Estes valores calculados encontram-se ligeiramente abaixo do "limite" inferior dos valores habituais, mostrando que estas comunidades, de uma maneira geral, não são muito diversas. Já o valor médio das zonas cinzentas encontra-se bastante abaixo do valor "mínimo" habitual, mostrando que estes locais têm uma diversidade de espécies muito baixa.

Os testes de Shapiro-Wilk para a normalidade resultaram em p-values de 0.921, 0.886, e 0.804 para coberturas, jardins urbanos e zonas cinzentas, respetivamente. Assim, uma vez que todas as amostras apresentam uma distribuição normal, foi feito um teste de Bartlett, que resultou num p-value= 0.665, indicando homocedasticidade de variâncias. Assim, estando cumpridos os pressupostos, realizou-se uma ANOVA para comparação entre as amostras. Esta análise mostrou, tal como na comparação do número de espécies, que as amostras apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si (F= 4.107, p-value= 0.0273). O teste de Tukey mostrou ainda que as zonas cinzentas são diferentes dos outros habitats (p-values de 0.050 por comparação com coberturas e p-value= 0.040 com os jardins), mas que as coberturas verdes e os jardins urbanos não apresentam diferenças estatisticamente significativas (p-value= 0.994).

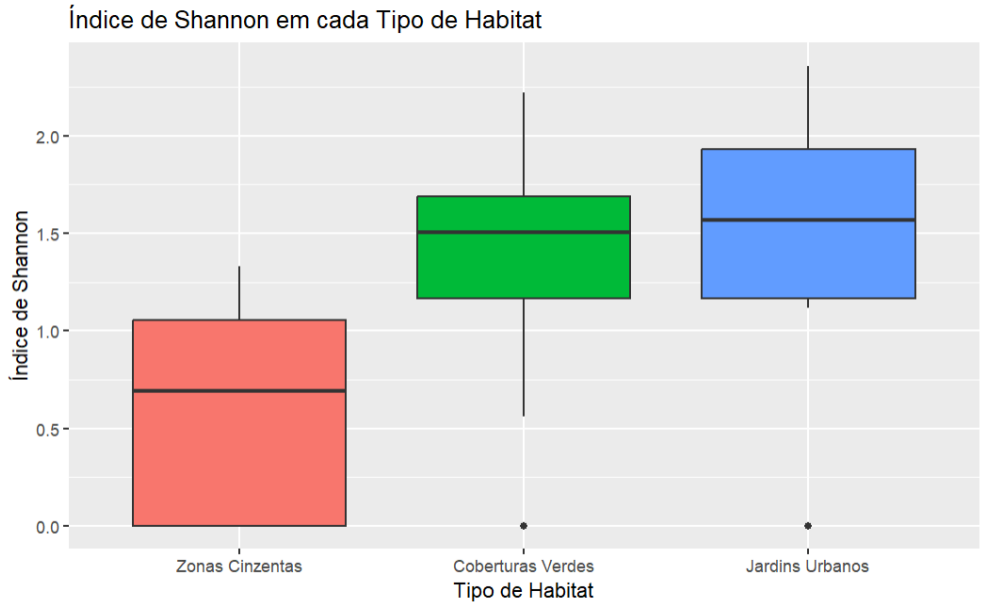


Figura 4 – Boxplot dos valores do índice de Shannon calculados em cada um dos tipos de habitat amostrados

Os valores apresentados por estas comunidades mostram que, por um lado, as zonas cinzentas são muito menos diversas e, por outro, que as comunidades das coberturas verdes e dos jardins urbanos amostrados são muito semelhantes entre si.

Em suma, estes resultados mostram-nos que as comunidades de aves das coberturas verdes amostradas são equivalentes às dos jardins urbanos da cidade, e que se distinguem das zonas cinzentas por estas últimas apresentarem valores de diversidade baixos em comparação às infraestruturas verdes, sendo usados a riqueza específica os e o índice de Shannon como proxies dessas métricas.

4 CONCLUSÕES

Os resultados acima apresentados mostram assim que não foram detetadas diferenças estatisticamente significativas entre as comunidades de aves das coberturas verdes e jardins urbanos amostrados na cidade de Lisboa, no Inverno, corroborando a hipótese inicial. Isto demonstra que, sempre que possível, a transformação de zonas cinzentas/infraestruturas “nuas” em zonas verdes, como coberturas, pode ser benéfico para as comunidades faunísticas urbanas, nomeadamente de aves. Adicionando aos já conhecidos benefícios de infraestrutura verde urbana, as coberturas verdes demonstram ser uma forma de contribuir para a sustentabilidade dos centros urbanos, enquanto pode contribuir para um aumento dos locais de estar e lazer.

Especificamente no caso da cidade de Lisboa, este trabalho demonstra que a cidade poderia beneficiar da instalação de mais coberturas verdes complementando os espaços verdes já existentes na matriz urbana, podendo assim contribuir para a criação de corredores verdes que, atravessando a cidade, promovem a biodiversidade.

As soluções baseadas na natureza, como as coberturas verdes, são cada vez mais essenciais para o desenvolvimento sustentável das áreas urbanas. É fundamental que a comunicação sobre os seus benefícios seja clara e bem fundamentada, para que os cidadãos e os decisores compreendam plenamente o seu valor. No entanto, para fazer esta comunicação da melhor forma, é ainda necessário

avaliar de forma mais abrangente os seus efeitos nas comunidades faunísticas, nomeadamente em varias estacoes do ano e em outros grupos, como por exemplo os artrópodes.

Finalmente, e não obstante, é importante reconhecer que, apesar dos seus muitos benefícios, estas soluções ainda enfrentam desafios significativos em termos de promoção da biodiversidade, exigindo abordagens adicionais para mitigar essas limitações e maximizar os seus impactos positivos. Reduzir a utilização de espécies exóticas, selecionar a tipologia de coberturas que mais promovem a biodiversidade e garantir a continuidade entre zonas verdes urbanas são algumas das características que devem ser tidas em consideração ao desenvolver estas infraestruturas.

REFERÊNCIAS

Anjos, L. (2007). A eficiência do método de amostragem por pontos de escuta na avaliação da riqueza de aves. Revista Brasileira de Ornitologia 15(2):239-243

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. In Energy and Buildings (Vol. 42, Issue 10, pp. 1582–1591). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004

Connelly, M., & Hodgson, M. (2015). Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs. In Building and Environment (Vol. 92, pp. 335–346). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.023

H. Wickham. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

Kassambara A (2023). _ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots_. R package version 0.6.0, <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>.

Kassambara A (2023). _rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests_. R package version 0.7.2, <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. In Meteorologische Zeitschrift (Vol. 15, Issue 3, pp. 259–263). Schweizerbart. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130

Mekonen, S. (2017). Birds as Biodiversity and Environmental Indicator. Advances in Life Science and Technology, 60, 16-22.

Melo, C., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2020). What's the economic value of greening transport infrastructures? The case of the underground passages in Lisbon. In Sustainable Cities and Society (Vol. 56, p. 102083). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102083

Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O'Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista H, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill M, Lahti L, McGlinn D, Ouellette M, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak C, Weedon J (2022). _vegan: Community Ecology Package_. R package version 2.6-4,<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Copernicus GmbH. https://doi.org/10.5194/hessd-4-439-2007

Posit team (2023). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL http://www.posit.co/

QGIS.org (YEAR). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.org

Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. In Environmental Pollution (Vol. 159, Issues 8–9, pp. 2100–2110). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029

Teotónio, I. d. N. (2016). Avaliação económica da instalação de coberturas verdes em edifícios. [Master's Dissertation, Instituto Superior Técnico]. Repositório Institucional do Instituto Superior Técnico. https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/FrRd4ml34MwKLcXMYdTlAoYu14P0RtjxrPfU

Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. In Sustainable Cities and Society (Vol. 69, p. 102781). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations. https://doi.org/10.18356/b9e995fe-en

United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme, Resolution adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022 (2022) UN doc UNEP/EA.5/Res.5

Wickham H, Averick M, Bryan J, Chang W, McGowan LD, François R, Grolemund G, Hayes A, Henry L, Hester J, Kuhn M,Pedersen TL, Miller E, Bache SM, Müller K, Ooms J, Robinson D, Seidel DP, Spinu V, Takahashi K, Vaughan D, Wilke C, Woo K, Yutani H (2019). "Welcome to the tidyverse." _Journal of Open Source Software_, *4*(43), 1686. doi: 10.21105/joss.01686 <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.

Xiao, Y., Guo, L., & Sang, W. (2020). Impact of Fast Urbanization on Ecosystem Health in Mountainous Regions of Southwest China. In International Journal of Environmental Research and Public Health (Vol. 17, Issue 3, p. 826). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ijerph17030826

Xing, Y., Jones, P., & Donnison, I. (2017). Characterisation of Nature-Based Solutions for the Built Environment. In Sustainability (Vol. 9, Issue 1, p. 149). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/su9010149

Instituto Nacional de Estatística (2021) "População residente (N.º) por Local de residência à data dos Censos [2021] (NUTS - 2013), Sexo e Grupo etário (Por ciclos de vida)" https://tabulador.ine.pt/indicador/?id=0011609 (accessed 28 January 2024)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ENTENDENDO A RESILIÊNCIA URBANA: UMA PERSPECTIVA DA ENGENHARIA CIVIL ATRAVÉS DE UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Letícia Da Silva Souza Lima[a]; Daiane Maria De Genaro Chiroli[b]; Fernanda Cavicchioli Zola[c]

[a] (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Marcílio Dias, 635, 86812-460, Apucarana, Brasil), leticialima.2003@alunos.utfpr.edu.br

[b] (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Marcílio Dias, 635, 86812-460, Apucarana, Brasil), daianechiroli@utfpr.edu.br

[c] (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Marcílio Dias, 635, 86812-460, Apucarana, Brasil), fzola@utfpr.edu.br

RESUMO

A resiliência urbana é a capacidade de uma cidade se adaptar e se recuperar de catástrofes e estresses, como desastres naturais e mudanças climáticas, sendo que. Nesse contexto, a engenharia civil desempenha um papel crucial na promoção da resiliência urbana, projetando infraestruturas robustas e sustentáveis que resistam a adversidades, garantindo segurança aos habitantes e gerando menos impacto ambiental. Este artigo apresenta uma revisão sistemática utilizando a metodologia PRISMA com critérios específicos para a seleção e avaliação dos estudos incluídos. Na pesquisa foram revisados 1.859 artigos para analisar a interseção entre resiliência urbana e engenharia civil. A revisão categorizou os estudos em Infraestrutura resiliente; Sustentabilidade e Eficiência energética; Planejamento urbano e Tecnologia e inovação. A análise permitiu uma avaliação abrangente das estratégias adotadas para fortalecer a resiliência urbana, destacando sinergias e desafios. Os resultados mostraram que a maioria dos estudos foca na otimização do uso de energia em edifícios, transportes e infraestruturas, em como as cidades podem enfrentar melhor as mudanças climáticas, além de apresentarem lacunas de conhecimento, tendências emergentes e oferecem *insights* valiosos para profissionais não só da área de engenharia, mas também no desenvolvimento urbano sustentável e na promoção da resiliência em face de desafios contemporâneos.

Palavras-chave: Resiliência urbana, Cidades inteligentes, Sustentabilidade, Planejamento urbano.

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil tem como um dos seus propósitos no século XXI mudar o seu impacto negativo que abrange perda de habitats, degradação do solo, poluição da água e do ar, além de contribuir para as mudanças climáticas. A sociedade global vem combatendo problemáticas envolvidas desde mudanças climáticas até crises econômicas e pandemias globais. Diante desse cenário complexo e em constante evolução, a resiliência urbana emerge como um conceito fundamental para garantir a sustentabilidade e a qualidade de vida nas áreas urbanas. Neste contexto, explorar estratégias para promover a resiliência urbana torna-se uma prioridade para planejadores, gestores e comunidades locais em todo o mundo (Sharifi et al. 2024). A resiliência urbana vai além da simples capacidade de resistir a desastres naturais, envolve a criação de sistemas e infraestruturas que possam absorver impactos e se adaptar às mudanças de forma eficaz. Isso requer uma abordagem holística, integrando aspectos físicos, sociais, econômicos e ambientais do ambiente urbano (Qiu e Chan . 2022; De Genaro et al. 2023). Além disso, a participação ativa da comunidade é essencial para desenvolver soluções resilientes que atendam às necessidades e prioridades locais. A construção de cidades resilientes não

é apenas uma questão de sobrevivência, mas também uma oportunidade para promover a inovação, a inclusão e o desenvolvimento sustentável (Datola et al. 2021). No Brasil alguns urbanistas são tidos como referências, como é o caso de Jaime Lerner que projetou um bairro do zero em Santa Catarina, chamado Vivapark. O bairro é totalmente sustentável com infraestrutura completa desde o lazer, comércio, educação e serviços essenciais, adicionando ainda diversidade de flora e fauna nesse conjunto habitacional (De Melo et al. 2024). Adicionalmente, a *Smart City* Parque Global em São Paulo-BR é outro exemplo de um projeto de grande porte de resiliência urbana atual. O projeto, que tem o ideal de "cidade de 15 minutos", conta com serviços de saúde, educação e lazer, e até um shopping center em seu território, a fim de propor conforto e facilidade na vida dos moradores, que não é encontrado em São Paulo, uma cidade com superpopulação, mas não planejada para isso, sendo conhecida pelo seu caos diário de trânsito e poluição de rios e do ar. Nesse sentido, o projeto parque global é uma das maiores construções já vista no país, inovando no setor de sustentabilidade, resiliência e construção civil (Gomes et al. 2020; Cracknell e Abu-Hijleh 2015). À medida que as pressões sobre as cidades aumentam, impulsionadas pelo crescimento populacional e pela urbanização rápida, a necessidade de adotar abordagens resilientes tornam-se ainda mais presentes. Para atender a essa demanda, é imprescindível que haja estudos e profissionais inovadores dedicados a aproveitar as condições naturais locais, reduzir o consumo energético, promover qualidade ambiental tanto interna quanto externa, utilizar matérias-primas que contribuam para a ecoeficiência do processo, e introduzir inovações tecnológicas sempre que possível e viável, além de promover a educação ambiental para todos (Fiais e De Souza 2017 ; Keeler e Vaidya 2018). Embora na literatura disponível haja vários trabalhos relacionados à temática proposta neste estudo, não foram encontrados trabalhos que realizassem a intersecção da engenharia civil com cidades resilientes em uma revisão sistemática. Nesse sentido, esta pesquisa contribui com essa área de conhecimento, e para abordar sobre a infraestrutura resiliente das cidades no mundo todo, foram então definidos multicritérios para pesquisa, tais como: (1) a área geral de planejamento para resiliência urbana com 4 importantes aspectos de discussão relacionados com a infraestrutura das cidades: (1.1) Planejamento Urbano; (1.2) Eficiência energética e sustentabilidade; (1.3) Planejamento de emergência; e (1.4) Tecnologia e inovação; (2)Para compreender os estudos no contexto da engenharia civil foram setorizadas 4 áreas específicas, a saber: (2.1) recursos hídricos; (2.2) construções subterrâneas; (2.3) transporte; e (2.4) sistema de energia elétrica. Por fim, fez-se uma análise no contexto sustentável (3), onde se categorizam trabalhos abordados sobre (3.1) infraestruturas verdes e (3.2) soluções baseadas na natureza. Após considerar os múltiplos critérios a serem analisados, tem-se as perguntas que esta pesquisa visa responder: (1) Em que medida a implementação de infraestrutura resiliente pode reduzir os impactos de desastres naturais nas áreas urbanas? (2) Quais são as principais estratégias para fomentar a sustentabilidade e eficiência energética em projetos de desenvolvimento urbano? (3) Há exemplos mais notáveis de cidades que incorporaram com sucesso a abordagens de resiliência urbana? (4) Como as cidades estão integrando soluções tecnológicas para fortalecer a segurança e eficácia dos sistemas urbanos? (5) De que maneira as cidades devem se adaptar diante dos desafios ambientais e climáticos, considerando os impactos nos aspectos econômicos e políticos?

Neste contexto, este artigo propõe realizar uma revisão sistemática abrangente, utilizando a metodologia PRISMA, para analisar a interseção entre resiliência urbana e engenharia civil. O objetivo geral desta pesquisa é identificar e avaliar estratégias adotadas para fortalecer a resiliência urbana, destacando sinergias e desafios na integração da engenharia civil nesse contexto. Esta pesquisa visa

fornecer contribuições valiosas para profissionais e pesquisadores interessados no desenvolvimento de cidades mais resilientes e sustentáveis.

2 DADOS E MÉTODOS

A revisão sistemática é uma metodologia de pesquisa que analisa, ordena a busca e leitura de forma sistemática e rigorosa todas as evidências disponíveis sobre uma determinada questão de pesquisa. Ela segue um protocolo pré-definido, que no caso deste trabalho foi feito uma revisão sistemática de artigos sobre cidades resilientes pela estrutura PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) e utiliza critérios específicos para a seleção e avaliação dos estudos incluídos que geram um notório impacto (Figura 1). Essa metodologia separa em 3 etapas os processos de revisão, sendo eles: Identificação; Triagem e Inclusão (De Genaro et al. 2023).

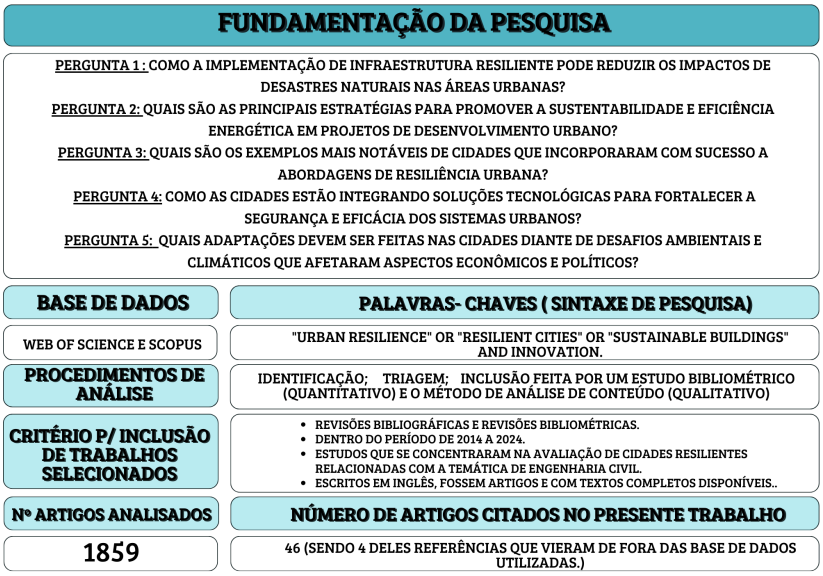


Figura 1 – Metodologia detalhada

Na etapa de identificação, faz-se a escolha das bases de dados e a busca nessas bases, sendo elas *Scopus* e W*eb of Science*. As palavras-chave escolhidas para formarem a melhor sintaxe de pesquisa foram: "*Urban resilience*" OR "*Resilient cities*" OR "*Sustainable buildings*" AND *Innovation*. Foi utilizada a mesma combinação de sintaxe em ambas as bases para realizar buscas mais assertivas no assunto. Após a identificação, foi realizada uma triagem para exclusão dos documentos que estavam fora dos critérios avaliado da pesquisa. Nessa etapa foi utilizado o software *Mendeley Reference Manager* para combinar a busca e retirar os trabalhos duplicados. Nessa etapa foram excluídos 133 documentos duplicados da lista em análise, além de 27 sem identificação de autores. Outro fator utilizado na triagem foi o ano de publicação dos trabalhos. Utilizou-se de critérios para exclusão trabalhos entre os anos de 2014 a 2024, priorizando pesquisas recentes. Além disso, foram filtrados apenas documentos na língua inglesa, e no formato de artigo. Nessa fase foram excluídos 485 registros, deixando 1.859 para leitura do *abstract* e análise do contexto dos artigos que se encaixam com a pesquisa, começando assim a etapa de seleção dos artigos para o estudo. Na etapa de leitura sistemática houve a preocupação em analisar a relevância dos artigos e os números de citações conforme o ano de publicação do artigo. Dos 1.859 artigos, foram elegíveis 292 artigos para leitura completa com a junção do método de estudo bibliométrico (quantitativo) e o método de análise de conteúdo (qualitativo) e por fim foram citados neste trabalho 46 artigos. Durante a etapa de seleção dos artigos foram removidos artigos voltados apenas para as políticas governamentais sobre

resiliência urbana. Evidencia-se que buscou a correlação dos artigos com a área de engenharia civil. Dos artigos analisados, haviam muitos estudos de casos, que foram excluídos, visto que os artigos mais relevantes para esta pesquisa englobam principalmente os temas de revisões bibliográficas e revisões bibliométricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a análise dos artigos, foram criados cinco critérios para categorizar os 292 trabalhos lidos, sendo eles: Infraestrutura resiliente (31,2%); Sustentabilidade e Eficiência energética (21,2%); Planejamento urbano (24%); Tecnologia e inovação (13,4%) e Planejamento de emergência (10,3%).

Dos dos 292 artigos, infraestrutura resiliente foi o assunto mais abordado, com 31,2% do total de trabalhos, e nesse contexto foi realizada outra análise com temas específicos da engenharia civil, sendo Recursos Hídricos (44,4%); Construções Subterrâneas (16,7%); Transporte (33.3%) e Sistema de Energia Elétrica (5,6%).

Durante a revisão foi observado a escassez de certos temas como a área de sistemas de energia elétrica dentro da resiliência urbana, e por conta disso foram escolhidas algumas referências fora das bases de dados utilizadas, portanto, os 5,7% de artigos encontrados e analisados fora das bases de dados. A resiliência urbana implica garantir que a cidade possa manter o fornecimento de energia elétrica de forma segura e eficiente, mesmo diante de eventos extremos como chuvas fortes ou falhas no sistema causadas por fatores como o vento. Incorporar uma variedade de fontes de energia, como solar, eólica, hidrelétrica e outras formas de energia renovável, pode reduzir a vulnerabilidade do sistema a interrupções causadas por eventos climáticos ou falhas em uma única fonte de energia (Sá 2017). Nos próximos tópicos serão descritos os artigos selecionados em cada uma das cinco categorias definidas.

3.1 Infraestrutura Resiliente no contexto de planejamento geral

Iniciou-se a análise dos temas para responder às perguntas problema evidenciadas na introdução. Na Figura 2 se apresenta resumidamente os problemas e as medidas propostas para resolvê-los. No mapa mental da Figura 2, evidencia-se quais adaptações devem ser feitas nas infraestruturas das cidades diante de desafios ambientais e climáticos que afetaram aspectos econômicos e políticos. O crescimento populacional impulsiona a criação de favelas em áreas urbanas de países em desenvolvimento. Soluções exigem políticas habitacionais inclusivas e investimentos em desenvolvimento urbano sustentável. A China e suas províncias possuiu mais estudos de casos (Xiang et al. 2019; Zhao et al. 2022; Sun et al. 2023; Zhang et al. 2021; Chen et al. 2020). Quando se fala de países como China, Índia e cidades como São Paulo-BR, lembra-se de uma grande população e espaço esgotado, o crescimento vertical torna-se uma estratégia essencial para a expansão urbana desses locais (Da Silva et al. 2020). Engenheiros estão adotando novas metodologias sustentáveis para desenvolver eficientemente edifícios verticais. Na categoria de eficiência energética e sustentabilidade, discutimos estratégias para promover esses princípios em projetos urbanos.

Adamson e Medeiros (2023); Almusaed et al. (2023); Lu et al. (2020) e Leoncini et al. (2016), discutem sobre os efeitos do CO_2 e o futuro das construções zero carbono para reduzir a pegada ecológica. Edifícios neste modelo estão se destacando como estratégia de incorporadoras para promover eficiência energética e atrair clientes. Soluções como placas solares têm crescido, oferecendo benefícios a longo prazo, apesar do investimento inicial elevado. Almusaed et al. (2023) destacam os benefícios do isolamento térmico com painéis BIO-GREEN, feitos de materiais orgânicos como fibra de coco e madeira de pinho. Esses painéis reduzem o consumo de energia, melhoram o conforto térmico e ajudam a reduzir as emissões de CO_2, promovendo práticas construtivas

sustentáveis. Os telhados verdes oferecem isolamento térmico e podem reduzir o consumo de energia em regiões quentes em até 15%. Com o aumento das temperaturas, destacado por Elgendawy et al. (2020), a importância das ilhas de calor é ressaltada. Ossola et al. (2021) enfatizam as consequências da urbanização, incluindo a redução das áreas permeáveis essenciais para mitigar ondas de calor e garantir nossa sobrevivência.Schibuola (2022) apresenta tecnologia de bombas de calor utilizando água do mar para sistemas de aquecimento e ar condicionado em cidades costeiras, reduzindo a pegada de carbono no verão. O aumento do consumo de ar condicionado nas cidades superaquecidas é mitigado. A busca por sustentabilidade inclui melhorias na eficiência energética de aparelhos de ar condicionado e o uso de iluminação natural e ventilação cruzada em edifícios para promover conforto e resiliência urbana.

Figura 2 - Infraestrutura resiliente.

Considerando planejamento de emergência, Borie et al. (2019) mapeiam os municípios de Nairobi e da Cidade do Cabo, destacam a importância de considerar diferentes interpretações de mapas para desenvolver estratégias de resiliência urbana inclusivas e legítimas. Ao mapear as cidades, foi possível reconhecer os pontos de inundações e de risco de segurança para a população (olhar técnico), mas também foi necessário ouvir a comunidade e explicar a eles as mudanças que poderiam ser feitas para alcançar resiliência (olhar social), geralmente a voz da sociedade é negligenciada em mapas de resiliência focados em perigos naturais. Evidenciaram uma abordagem participativa e ao reconhecer esta pluralidade de perspectivas foram encontrados indicadores e resultados positivos.Apesar de a pandemia de COVID-19 ser um evento recente, já observamos diversos estudos que a abordam no contexto da resiliência urbana, incluindo os trabalhos de Majewska et al. (2022), Qiu e Chan (2022), e Zhang e Wang (2023).

Como as cidades estão integrando soluções tecnológicas para fortalecer a segurança e eficácia dos sistemas urbanos? Esta é a questão central abordada na última categoria destinada a um planejamento eficiente de uma infraestrutura resiliente. A adoção de práticas de economia circular, reutilização de materiais e avanços em construção modular e impressão 3D exemplificam inovações destinadas a reduzir os impactos do esgotamento de matérias-primas e promover a sustentabilidade na indústria da construção. Zhao et al. (2017) e Elnour et al. (2022) comentam sobre novas

tecnologias e inovações nesse ramo. A adoção de tecnologias sustentáveis não só reduz o impacto ambiental, mas também fortalece a resiliência das comunidades urbanas. O *Building Information Modeling* (BIM) oferece uma abordagem integrada para todas as fases do ciclo de vida de um edifício, simplificando análises de desempenho energético, seleção de materiais e gestão de resíduos. Além disso, promove colaboração eficaz entre as etapas do projeto, prevenindo erros e resultando em projetos mais eficientes e integrados. A visualização tridimensional proporcionada pelo BIM aprimora a compreensão do projeto e a comunicação com todas as partes interessadas, impulsionando soluções inovadoras e sustentáveis ao longo do ciclo de vida do edifício (Araszkiewicz, 2016).A região escandinava é um exemplo de eficácia do BIM, com projetos premiados com certificação LEED, demonstrando como países desenvolvidos investem em tecnologias para melhorar a qualidade de vida da comunidade e promover práticas sustentáveis na indústria da construção. Essas iniciativas sugerem que outros países deveriam seguir o exemplo, começando com metas para bairros sustentáveis e planejamento urbano aprimorado.

3.2 Infraestrutura resiliente no contexto da engenharia civil

Dentro da Engenharia Civil e da Infraestrutura Resiliente, a questão principal abordada é: Como a implementação de infraestrutura resiliente pode minimizar os impactos dos desastres naturais nas áreas urbanas? A partir disso, identificaram-se as áreas críticas com maior impacto nas cidades: Recursos Hídricos, Construções Subterrâneas, Transporte e Sistema de Energia Elétrica, conforme resumo do Figura 3.

ÁREA DA INFRAESTRUTURA RESILIENTE	IMPACTO AMBIENTAL	SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL
Recursos Hídricos	Enchentes,secas, tempestades, aumento do nível do mar, tornados.	Preservação da drenagem natural, e criação de sistemas de medição de qualidade da potabilidade da água.
Construções Subterrâneas	Deslocamento de solo e riscos geotécnico.	Aproveitamento e otimização de espaço, e segurança contra fatores climáticos.
Transporte	Emissão de gases para o efeito estufa.	Criação de infraestruturas suspensas para ciclistas e pedestres, e investimento em mobilidade alternativa.
Sistema de Energia Elétrica	Desmoronamento das redes de abastecimento elétrico principalmente em fortes tempestades, causando acidentes e prejuizo ambiental .	Aterramento dos fios e segurança por monitoramento das redes com sátelites .

Figura 3 - Impactos ambientais e soluções sustentáveis de infraestrutura resiliente.

Por meio da visualização do Figura 3 , é possível verificar os maiores impactos ambientais dessas 4 áreas e as soluções sustentáveis que as cidades devem aderir no seu planejamento para um futuro melhor. Como, por exemplo, as emissões de gases que poluem e pioram o efeito estufa, essas emissões são causadas principalmente pela área de transporte urbano, e uma solução é o investimento em mobilidade alternativa que são a melhoria do transporte coletivo, caronas compartilhadas se tornarem hábito, mudança de desenho urbano e até mesmo a utilização de combustíveis renováveis, são soluções de mobilidade alternativa que ajudam essa área.

3.2.1 Recursos Hídricos

A água, vital para a existência humana, é tema recorrente em publicações, sendo abordada em contextos de desastres climáticos e resiliência urbana. As pesquisas destacam fenômenos como inundações, secas, tempestades e tsunamis, que impactam profundamente comunidades em todo o mundo, afetando não só o ambiente físico, mas também a segurança, a economia e a qualidade de vida das populações afetadas. Zahoor et al. (2023), Fastiggi et al. (2021), Balsells et al. (2015), McGrail

et al. (2015); Sharma et al. (2023); Touili (2021) e Lee et al. (2022) evidenciam sobre eventos hidrológicos como enchentes e inundação, afirmam que é importante a preservação da drenagem natural e do impacto da urbanização na qualidade da água. É crucial adaptar-nos e antecipar as mudanças decorrentes da instabilidade climática e do aquecimento global. Este tema está intimamente ligado à eficiência energética e à sustentabilidade, destacadas no contexto do planejamento urbano. A infraestrutura das cidades deve estar preparada para enfrentar a escassez de água, alimentos e energia, que podem ser impactados por eventos meteorológicos extremos. O estudo conduzido por Mariano e Marino (2022) examina estratégias de defesa e adaptação contra chuvas intensas, inundações e aumento do nível do mar. Em Rotterdam, tanques subterrâneos foram substituídos por um sistema inovador de coleta e retenção de águas pluviais em toda a cidade, visando reduzir custos e promover uma abordagem renovada de armazenamento de água na superfície urbana. Além de melhorar a qualidade ambiental, essa mudança fortalece a identidade dos bairros. Calhas e canais de drenagem substituíram os tanques, oferecendo soluções mais integradas e sustentáveis. Essas infraestruturas adaptáveis podem ser transformadas em espaços recreativos, como pistas de skate, promovendo usos multifuncionais do ambiente urbano e aliviando os sistemas de esgoto. O aumento do nível do mar requer medidas de proteção, como a construção de colinas artificiais e infraestruturas suspensas para ciclistas e pedestres, visando mitigar os efeitos das inundações costeiras e garantir a segurança das comunidades.

3.2.2 Construções Subterrâneas

Uma área pouco explorada na infraestrutura resiliente é a das construções subterrâneas, que não se limita apenas à falta de espaço na superfície, como ressalta Liu et al. (2021). O texto menciona eventos sísmicos que não afetam os túneis de metrô, destacando seu potencial como abrigo em situações de emergência. Além disso, aborda sistemas de drenagem subterrâneos, como os esgotos de Paris. No entanto, embora ofereçam segurança, essas infraestruturas enfrentam o desafio do alto custo de construção, o que limita seu desenvolvimento e investimento em diversas áreas, além do transporte e drenagem (Nelson, 2016).

3.2.3 Transporte

Passando para a área de transporte que se encontra dentro de infraestrutura resiliente, se deparou-se também com uma escassa quantidade de artigos dissertando sobre o assunto nesta pesquisa. Conforme o trabalho de Wu et al. (2022) sobre os efeitos das mudanças climáticas em um estudo de caso na rede rodoviária, pôde se ver que foram poucas obras que eram voltadas para essa temática de resiliência urbana nos outros meios de transporte como as dos autores Lee et al. (2022), Comert et al. (2018) , Ge e Zhang (2022) e Fonseca et al. (2017). Dos artigos selecionados não houve trabalhos sobre mobilidade alternativa, temática sobre transporte que se encaixa perfeitamente em resiliência urbana, afinal exemplos como transporte público eficiente, compartilhamento de bicicletas e veículos elétricos, bem como iniciativas de carona solidária são respostas sustentáveis na área de transporte, não apenas oferecem uma maneira mais ecológica de se deslocar e diminui os congestionamentos de grandes cidades, mas também contribuem para a melhoria da qualidade do ar, redução de emissões de gases de efeito estufa e criação de comunidades mais conectadas e acessíveis, criando uma qualidade de vida melhor para a sociedade.

3.2.4 Sistemas de energia elétrica

Nesta revisão, não foram encontrados materiais que abordassem a relevância do aterramento dos fios elétricos, especialmente em países como o Brasil, para mitigar os danos causados por

tempestades cada vez mais intensas. A dissertação de Sá (2017) aborda essa lacuna, destacando a importância da segurança energética e a vulnerabilidade das infraestruturas críticas que muitas vezes foram projetadas sem considerar mudanças futuras. Casos de apagões e falhas no sistema elétrico, tanto na Europa, EUA, Brasil e Rússia, têm se tornado mais frequentes na última década. Essa falta de segurança não apenas gera prejuízos ambientais, mas também políticos, uma vez que a dependência da comunicação digital se tornou essencial na vida cotidiana. Portanto, é crucial que haja investimento governamental na prevenção e segurança do sistema elétrico, com projetos de monitoramento e satélites para garantir a robustez e confiabilidade das redes elétricas.

3.3 Infraestrutura Verde: Soluções relacionadas com a natureza em resiliência urbana

No contexto da resiliência urbana, a infraestrutura verde emerge como uma abordagem inovadora, promovendo a integração harmoniosa entre o ambiente construído e os ecossistemas naturais. Este tópico explora como soluções baseadas na natureza podem fortalecer a capacidade das cidades de enfrentar desafios ambientais e sociais, oferecendo benefícios multifacetados que vão além da gestão de águas pluviais. Beyer e Anderson (2020) citam que as empresas concessionárias de água podem optar por investir em infraestrutura verde, como jardins de chuva, restauração de riachos e áreas verdes, em vez de construir infraestruturas convencionais. Essas soluções não só atendem às necessidades de coleta e retenção de água da chuva, mas também beneficiam outros departamentos municipais, como saúde, transporte e educação. A colaboração entre departamentos, desde a identificação das necessidades até a implementação das soluções, pode resultar em projetos multifacetados que abordam questões como manejo de águas pluviais, recreação, educação, redução da temperatura urbana, aumento da biodiversidade e melhoria da mobilidade. Isso inclui a revitalização de rios e áreas verdes, como parques, que necessitam de melhorias no ecossistema e apoio a soluções em harmonia com a natureza. Hardy et al. (2022), aplicam um conjunto de ferramentas e processos denominado Estrutura de Benefícios de Conectividade (CBF) que auxilia profissionais na identificação dos valores associados ao aprimoramento das funções dos ecossistemas, tanto em termos de benefícios ecológicos quanto sociais. Além disso, ele oferece modelos para a avaliação e classificação de ações de gestão que promovem a conectividade. Ao contrário de outros modelos que geralmente se concentram apenas nos aspectos biofísicos dos sistemas, ele destaca-se por sua capacidade de identificar os benefícios diretos proporcionados às pessoas por meio de ecossistemas funcionais e conectados. Para implantação da ferramenta, na prática, são planejadas metas e ações e separadas funções e recursos. O teste foi aplicado em um sistema ferroviário do Metrô de Portland que iria sofrer uma expansão para diminuir o tráfego de veículos de passageiros para aliviar o congestionamento, diminuir a poluição do ar e cumprir as metas de redução de carbono, entre outros objetivos. Foram levantados benefícios como a criação dos espaços verdes que seriam acessíveis a uma curta distância dos bairros, melhorando a saúde humana. Os empregos verdes podem até ser disponibilizados para apoiar as economias locais e as comunidades economicamente resilientes e a construção de trilhas para ciclismo e caminhada com vegetação diversificada oferece oportunidades de recreação e vistas de espaços verdes, estes caminhos reduzem o escoamento de contaminantes para os cursos de água e analisaram-se os riscos ao se planejar e utilizar a ferramenta CBF como danos potenciais aos sistemas causados pelas raízes das árvores e custos de manutenção das árvores. Com os riscos expostos do projeto se procurou soluções e respostas inteligentes, assim a estrutura de benefícios de conectividade estaria sendo uma ótima tecnologia para o planejamento urbano.

4 CONCLUSÕES

Em resumo, este estudo teve como objetivo explorar a resiliência urbana e sua relação com diferentes áreas da engenharia civil, como, por exemplo, o foco na infraestrutura de energia elétrica. Ao longo da análise, foi analisado como as cidades podem se adaptar e fortalecer suas infraestruturas para enfrentar desafios ambientais, climáticos e sociais. Ao abordar as perguntas-problema delineadas, identificou-se uma série de estratégias e inovações que podem ser implementadas para promover a resiliência urbana em diferentes contextos. No contexto da infraestrutura de energia elétrica, foi observada a importância de investimentos em segurança e modernização para lidar com os crescentes desafios climáticos e garantir a continuidade do fornecimento de energia. Além disso, ficou evidente a necessidade de abordagens integradas que incorporem fontes de energia renovável e tecnologias avançadas para fortalecer a infraestrutura elétrica das cidades. Em relação aos recursos hídricos, transporte e construções subterrâneas, verificou-se a escassez de trabalhos específicos, o que destaca áreas que precisam de mais atenção e pesquisa. No entanto, é notória a importância de considerar esses aspectos como parte integral da resiliência urbana, pois eles desempenham papéis fundamentais na sustentabilidade e na capacidade de resposta das cidades a desastres naturais e eventos extremos. Além disso, foram exploradas como soluções baseadas na natureza podem ser aproveitadas para fortalecer a resiliência urbana, promovendo ecossistemas saudáveis e conectados que oferecem uma série de benefícios tanto ambientais quanto sociais. Em última análise, este estudo destaca a complexidade da resiliência urbana e a necessidade de abordagens integradas que considerem uma variedade de fatores, desde infraestrutura física até aspectos sociais e ambientais. Ao enfrentar os desafios apresentados pelas mudanças climáticas e pelo crescimento urbano, é crucial adotar uma mentalidade proativa e colaborativa, trabalhando em conjunto para construir cidades mais resilientes e sustentáveis para o futuro.

REFERÊNCIAS

Adamson, S., and Medeiros, A. (2023). The greenlight for government buildings: strategies for a low-carbon building portfolio. FACETS8,1–10.

Almusaed, A., Almssad, A., Alasadi, A., Yitmen, I., and Al-Samaraee, (2023). S. Assessing the role and efficiency of thermal insulation by the “bio-green panel” in enhancing sustainability in a built environment. Sustainability 15, 10418.

Araszkiewicz, K. (2016). Green bim concept-scandinavian inspirations. Archives of Civil Engineering 62.

Balsells, M., Barroca, B., Becue, V., and Serre, D. (2015). Making urban flood resilience more operational: current practice. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, vol. 168, Thomas Telford Ltd, pp. 57–65. http://dx.doi.org/10.1680/wama.14.00051

Beyer, L., and Anderson, J. (2020). Planejamento integrado de soluções baseadas na natureza é essencial para resiliência urbana. wribrasil.

Borie, M., Ziervogel, G., Taylor, F. E., Millington, J. D., Sitas, R., and Pelling, M.(2019). Mapping (for) resilience across city scales: An opportunity to open-up conversations for more inclusive resilience policy? Environmental Science Policy 99,1–9.

Chen, C., Xu, L., Zhao, D., Xu, T., and Lei, P.(2020). A new model for describing the urban resilience considering adaptability, resistance and recovery. Safety Science 128,104756.http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104756

Comert, G., Pollard, J., Nicol, D. M., Palani, K., and Vignesh, B. (2018). Modeling cyber attacks at intelligent traffic signals. Transportation research record 2672, 1,76–89.http://dx.doi.org/10.1177/0361198118784378

Cracknell, T. M., and Abu-Hijleh, B.(2015). Measuring leed–nc applicability in design for hospitality. Frontiers of Architectural Research 4, 308–317.

Da Silva, C. A., dos Santos, E. A., Maier, S. M., and da Rosa, F. S.(2020). Urban resilience and sustainable development policies: An analysis of smart cities in the state of São Paulo. Revista de Gestão 27, 1, 61–78.http://dx.doi.org/10.1108/REGE-12-2018-0117

Datola, G., Bottero, M., and de Angelis, E. (2021). Enhancing urban resilience capacities: An analytic network process-based application. Environmental and Climate Technologies 25, 1, 1270–1283.http://dx.doi.org/10.2478/rtuect-2021-0096

De Genaro Chiroli, D. M., Menezes, M. G., Zola, F. C., Aragão, F. V., de Almeida, R. D., and Tebcherani, S. M. (2023). Integrating resilience and sustainability: A systematic analysis of resilient cities using iso 37123. International Journal of Disaster Risk Reduction 96.http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103960

De Mello, F. L. B., et al. (2022). Regulação e planejamento urbano-ambiental em processos de suburbanização: o caso do projeto sul lagoa dos ingleses, rmbh.

Elgendawy, A., Davies, P., and Chang, H.-C. (2020). Planning for cooler cities: A plan quality evaluation for urban heat island consideration. Journal of Environmental Policy &Planning 22, 4, 531–553.http://dx.doi.org/10.1080/1523908X.2020.1781605

Elnour, M., Fadli, F., Himeur, Y., Petri, I., Rezgui, Y., Meskin, N., and Ahmad, A. M. (2022). Performance and energy optimization of building automation and management systems: Towards smart sustainable carbon-neutral sports facilities. Renewable and Sustainable Energy Reviews 162, 112401.http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112401

Fastiggi, M., Meerow, S., and Miller, T. R. (2021). Governing urban resilience: Organizational structures and coordination strategies in 20 north american city governments. Urban Studies 58, 6, 1262–1285.http://dx.doi.org/10.1177/0042098020907277

Fiais, B. B., and de Souza, D. S.(2017). Construção sustentável com tijolo ecológico. Revista Engenharia em Ação UniToledo 2, 1 .

Fonseca, J. A., Estévez-Mauriz, L., Forgaci, C., and Björling, N.(2017). Spatial heterogeneity for environmental performance and resilient behavior in energy and transportation systems. Computers, Environment and Urban Systems 62, 136–145.http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.11.001

Ge, W., and Zhang, G. (2022). Resilient public transport construction in mega cities from the perspective of ecological environment governance. Journal of Environmental and Public Health.http://dx.doi.org/10.1155/2022/9143618

Gomes, J. A. P., Muse, L. P., Guedes, A. L. A., y Rodriguez, M. V. R., and Longo, O. C. (2020). Smart cities: construção sustentável e edifícios inteligentes são tendências para o futuro. Brazilian Journal of Development 6, 10, 76465–76484.

Hardy, C., de Rivera, C., Bliss-Ketchum, L., Butler, E. P., Dissanayake,S., Horn, D. A., Huffine, B., Temple, A. M., Vermeulen, M., Wallace, H., et al. (2022). Ecosystem connectivity for livable cities: a connectivity benefits framework for urban planning. Ecology and Society.http://dx.doi.org/10.5751/ES-13371-270236

Keeler, M., and Vaidya, P. (2018). Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis-2. Bookman Editora.

Lee, H., Song, K., Kim, G., and Chon, J. (2021). Flood-adaptive green infrastructure planning for urban resilience. Landscape and Ecological Engineering 17, 427–437.http://dx.doi.org/10.1007/s11355-021-00458-7

Lee, Y.-H., Kim, Y.-C., and Seo, H. (2022). Selecting disaster waste transportation routes to reduce overlapping of transportation routes after floods. Sustainability 14, 5, 2866.http://dx.doi.org/10.3390/su14052866

Leoncini, R., Montresor, S., and Rentocchini, F. (2016). Co2-reducing innovations and outsourcing: Evidence from photovoltaics and green construction in north-east Italy. Research Policy 45, 8, 1649–1659.http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.010

Liu, S.-C., Peng, F.-L., Qiao, Y.-K., and Zhang, J.-B. (2021). Evaluating disaster prevention benefits of underground space from the perspective of urban resilience. International Journal of Disaster Risk Reduction 58, 102206.http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102206

Lu, W., Tam, V. W., Chen, H., and Du, L. (2020). A holistic review of research on carbon emissions of green building construction industry. Engineering, Construction and Architectural Management 27, 5 , 1065–1092.

Majewska, A., Denis, M., Jarecka-Bidzińska, E., Jaroszewicz, J., and Krupowicz, W. (2022). Pandemic resilient cities: Possibilities of repairing polish towns and cities during covid-19 pandemic. Land Use Policy 113 , 105904.http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105904

Mariano, C., and Marino, M.(2022) Urban planning for climate change: A toolkit of actions for an integrated strategy of adaptation to heavy rains, river floods, and sea level rise.Urban Science 6, 3.http://dx.doi.org/10.3390/urbansci6030063

McGrail, S., Gaziulusoy, A. I., and Twomey, P. (2015). Framing processes in the envisioning of low-carbon, resilient cities: results from two visioning exercises. Sustainability 7, 7, 8649–8683.http://dx.doi.org/10.3390/su7078649

Nelson, P. P. (2016). A framework for the future of urban underground engineering. Tunnelling and Underground Space Technology 55, 32–39. Urban Underground Space: A Growing Imperative Perspectives and Current Research in Planning and Design for Underground Space Use.http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.023

Ossola, A., and Lin, B. B. (2021). Making nature-based solutions climate-ready for the 50 °c world. Environmental Science Policy 123, 151–159.http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.026

Qiu, D., Lv, B., and Chan, C. M.(2022). How digital platforms enhance urban resilience. Sustainability 14, 3, 1285.http://dx.doi.org/10.3390/su14031285

Sá, O. O. d. (2017). A segurança das infraestruturas críticas de energia no Brasil. PhD thesis, Universidade de São Paulo.

Schibuola, L., Tambani, C., and Buggin, A. (2022). Seawater opportunities to increase heating, ventilation, and air conditioning system efficiency in buildings and urban resilience. Frontiers in Energy Research 10, 913411.http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2022.913411

Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S. E., and Khavarian-Garmsir, A. R.(2024). Smart cities and sustainable development goals (sdgs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. Cities 146, 104659.

Sharma, S., Kumar, S., and Singh, A. (2023). Assessment of green infrastructure for sustainable urban water management. Environment, Development and Sustainability, 1–10.http://dx.doi.org/10.1007/s10668-023-03411-w

Sun, Y., Wang, Y., Zhou, X., and Chen, W.(2023). Are shrinking populations stifling urban resilience? Evidence from 111 resource-based cities in China. Cities 141, 104458.

Touili, N. Hazards, (2021). Infrastructure networks and unspecific resilience. Sustainability 13, 9, 4972.http://dx.doi.org/10.3390/su13094972

Wu, Q., Han, Z., Cui, C., Liu, F., Zhao, Y., and Xie, Z. (2022). Vulnerability identification and cascading failure spatiotemporal patterns on road network under the rainstorm disaster. ISPRS International Journal of Geo-Information 11, 11, 564.http://dx.doi.org/10.3390/ijgi11110564

Xiang, C., Liu, J., Shao, W., Mei, C., and Zhou, J. (2019). Sponge city construction in China: policy and implementation experiences. Water Policy 21, 1, 19–37.http://dx.doi.org/10.2166/wp.2018.021

Zahoor, A., Xu, T., Wang, M., Dawood, M., Afrane, S., Li, Y., Chen, J. L., and Mao, G.(2023). Natural and artificial green infrastructure (gi) for sustainable resilient cities: A scientometric analysis. Environmental Impact Assessment Review 101 , 107139.http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107139

Zhang, J., and Wang, T.(2023). Urban resilience under the Covid-19 pandemic: A quantitative assessment framework based on system dynamics. Cities 136 , 104265.http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2023.104265

Zhang, J., Zhang, M., and Li, G. (2021). Multi-stage composition of urban resilience and the influence of pre-disaster urban functionality on urban resilience. Natural Hazards 107 , 447–473.http://dx.doi.org/10.1007/s11069-021-04590-3

Zhao, R., Fang, C., Liu, J., and Zhang, L. (2022). The evaluation and obstacle analysis of urban resilience from the multidimensional perspective in chinese cities. Sustainable Cities and Society 86, 104160.http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2022.104160

Zhao, X., Chang, T., Hwang, B.-G., and Deng, X. (2017). Critical factors influencing business model innovation for sustainable buildings. Sustainability 10, 1, 33.http://dx.doi.org/10.3390/su10010033

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DE SISTEMAS DE UTILIZAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA COM COBERTURAS VERDES: CASO DE ESTUDO EM TRONDHEIM, NORUEGA

Vitor Sousa[a]; Inês Meireles[b]; José Pedro Matos[a]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, vitor.sousa@tecnico.ulisboa.pt, jose.matos@tecnico.ulisboa.pt

[b]RISCO, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, Aveiro, Portugal, imeireles@ua.pt

RESUMO

Num contexto de elevada pressão sobre os recursos hídricos e as infraestruturas de água urbanas que já se observa em várias regiões do globo e se prevê vir a expandir e agravar num cenário de alterações climáticas, urge implementar medidas que permitam satisfazer as necessidades crescentes de água e aumentar a resiliência dos espaços urbanos. Para fazer face a estes desafios, diversas cidades um pouco por todo o globo têm incentivado ativamente a instalação de soluções que contribuam para reter/deter das águas da chuva para minimizar a afluência/pico dos caudais às redes de drenagem. Os incentivos incluem apoio financeiro, desconto de taxas/impostos e/ou facilidade nos processos de licenciamento, entre outros. Em alguns casos (e.g., Basel, Toronto, Munique, Tóquio), algumas destas medidas foram mesmo tornadas obrigatórias. Entre as soluções mais usuais encontram-se as coberturas verdes e os sistemas de utilização de água da chuva. A presente comunicação pretende avaliar o desempenho de sistemas de utilização de água da chuva combinados com coberturas verdes em Trondheim na Noruega.

Palavras-chave: cobertura verde, sistema de utilização de água da chuva, simulação

1 INTRODUÇÃO

A nível do consumo urbano de água, as alternativas para aumentar resiliência dos sistemas podem ser agrupadas consoante visem: i) o aumento da eficiência do consumo; ou ii) a utilização de fontes alternativas à água da rede pública. Dentro do segundo grupo, a prática ancestral utilização da água da chuva é uma das mais utilizadas. De facto, se existem alguns exemplos raros em que a utilização da água da chuva é limitada para preservar os caudais ecológicos nos sistemas naturais existente (e.g., no Colorado a capacidade de armazenamento de água da chuva está limitada a 415 l por residência), a maior parte das entidades com responsabilidade pela gestão dos recursos hídricos e/ou dos ambientes construídos:

- Impõe regras para salvaguardar a funcionalidade das instalações e a saúde pública.
- Promove ativamente a sua utilização (e.g., através de subsídios ou redução de impostos/taxas municipais).
- Obriga a implementação de sistemas de utilização de água da chuva (e.g., na Índia, em grande parte dos estados, a instalação de sistemas de utilização de água da chuva é obrigatória em novos edifícios).

A utilização de água da chuva permite, simultaneamente, reduzir o consumo de água da rede pública e o volume de água afluente à rede de drenagem. Nas regiões com abundância de recursos hídricos, a motivação principal para a sua promoção do ponto de vista do governo (central ou local) prende-se com a redução das afluências à rede de drenagem para minimizar as descargas não-tratadas para os meios recetores e diminuir o risco de cheias urbanas. Neste contexto, é frequente a promoção de outras soluções que visem a re-naturalização do espaço urbano e o aumento da retenção das águas pluviais. Uma das soluções de re-naturalização mais difundida é a instalação de coberturas verdes.

A presente comunicação avalia o potencial da combinação de sistemas de utilização da chuva com coberturas verdes em Trondheim, na Noruega, em termos da poupança de água e retenção de água da chuva.

2 CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

Um sistema de utilização de água da chuva genérico é composto por:

- Uma superfície para recolha da água da chuva (e.g., cobertura).
- Um tanque para armazenamento a água da chuva coletada.
- O sistema a interligar a área de recolha com o tanque e o tanque com os pontos de utilização da água.

Embora seja considerado opcional, a maioria dos sistemas de utilização de água da chuva também integram um dispositivo para desviar o volume de escoamento inicial (*first-flush,* na terminologia anglo-saxónica) para a rede de drenagem pública ou outro destino (e.g., terreno). O objetivo deste dispositivo é salvaguardar a qualidade da água da chuva armazenada, visto que volume inicial de escoamento em cada evento pluviométrico tende a arrastar os detritos acumulados nas superfícies de recolha durante o período seco antecedente. Na literatura, são indicados valores entre 1 mm e 5 mm para o volume inicial a desviar.

Na modelação do desempenho de sistemas de utilização de água da chuva é usual a utilização do modelo de balanço de massa para simular o funcionamento do sistema (e.g., Silva et al. 2015). A escala

temporal utilizada nas simulações é, usualmente, diária. A simulação à escala do dia decorre de, numa grande maioria das estações udométricas, os registos de precipitação de fontes oficiais estarem disponíveis com essa resolução temporal. Além disso, exceto em situações muito particulares (e.g., reservatórios com capacidade muito inferior ao consumo diário e áreas de recolha grandes), o rigor da estimativa do desempenho dos sistemas de utilização de água da chuva não se altera para resoluções menores. Para aplicar o modelo de balanço de massa é necessária a seguinte informação:

- A precipitação no local.
- O escoamento que entra no sistema de drenagem da superfície de recolha.
- O escoamento que aflui ao tanque de armazenamento de água da chuva.
- A área da superfície de recolha de água da chuva.
- O consumo da água da chuva.

Tipicamente, o volume do tanque é a variável de dimensionamento que se pretende definir para otimizar o balanço entre os custos e os benefícios do sistema.

Os dados de precipitação foram retirados da estação VollPluSN68863, localizada em Trondheim. A estação apenas dispõe de dados detalhados da precipitação na forma líquida (quantidade de água) e sólida (espessura da neve) entre 2018 e 2023.

A modelação de sistemas de utilização de água da chuva no contexto do presente estudo encerra dois desafios para estimar o escoamento que entra no sistema de drenagem da superfície de recolha:

- Na Noruega, como é muitas regiões em climas mais frios, a precipitação ocorre sob a forma líquida e sólida. No segundo caso, existe um desfasamento temporal entre a ocorrência da precipitação e o escoamento que tem de ser considerado.
- As coberturas verdes apresentam a capacidade de reter parte do volume precipitado, que volta para a atmosfera através da evapotranspiração.

Relativamente ao primeiro desafio, utilizaram-se as duas alternativas para modelar o degelo discutidas em Passanha et al. (2024). O método dos graus-dia, usualmente implementado na generalidade dos programas de modelação hidrológica, exige a calibração, enquanto o método alternativo proposto por Passanha et al. (2024) evita essa necessidade.

Para modelar o escoamento de uma cobertura verde recorreram-se aos modelos desenvolvidos por Sousa et al. (2024) a partir dos dados obtidos no âmbito do projeto KLIMA 2050. Neste projeto foi montada uma instalação piloto na estação de tratamento de águas residuais de Høvringen (Figura 1) composta por três zonas de teste, cada uma com uma área de 8x11 m. Para além da medição do escoamento em cada zona de teste, também foi instalada uma estação meteorológica para monitorizar a precipitação e a temperatura especificamente no local. Entre as várias soluções de revestimento da cobertura, foram testadas diferentes soluções de cobertura verde.

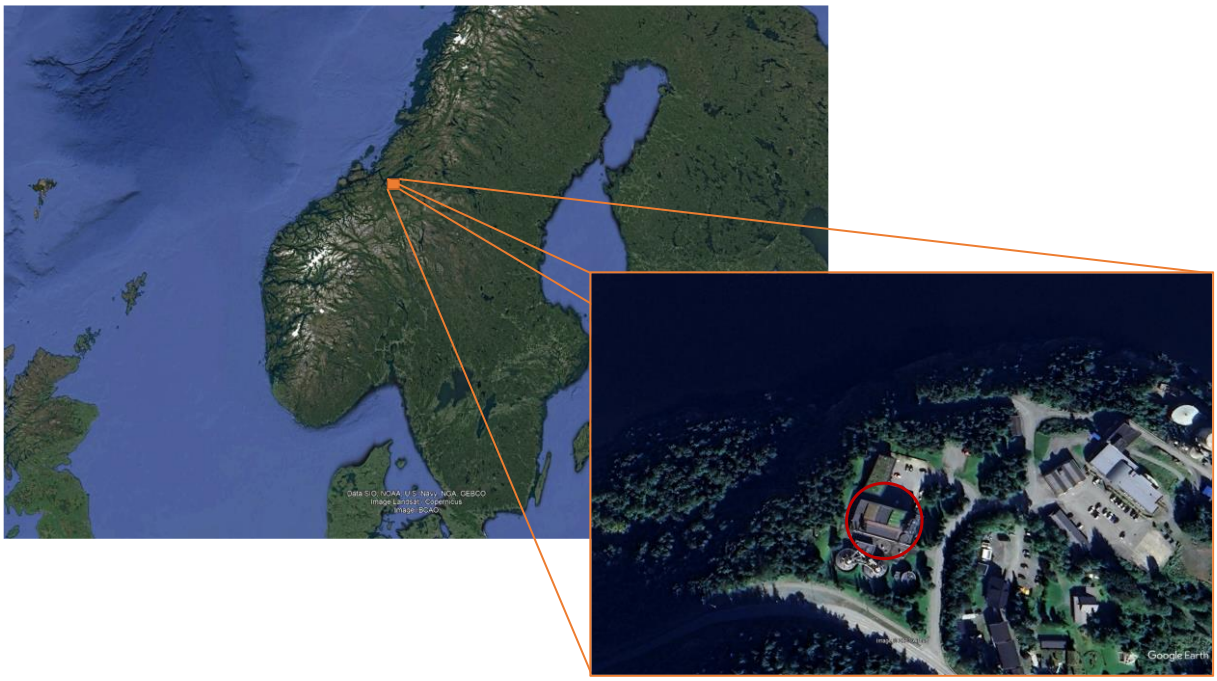


Figura 1 – Localização da cobertura verde monitorizada no âmbito do projeto KLIMA 2050.

Nas Figuras 2 e 3 apresentam-se os modelos que permitem prever o escoamento e o coeficiente de escoamento, respetivamente, a partir da precipitação acumulada do evento de precipitação. Os modelos foram desenvolvidos para serem aplicados a dados de precipitação à escala diária, o que é compatível com estudos em coberturas verdes (e.g., Stovin et al. 2012) que consideram um período de 6 horas para considerar os eventos de precipitação independentes. Mais informação sobre os modelos pode ser encontrada em Sousa et al. (2024).

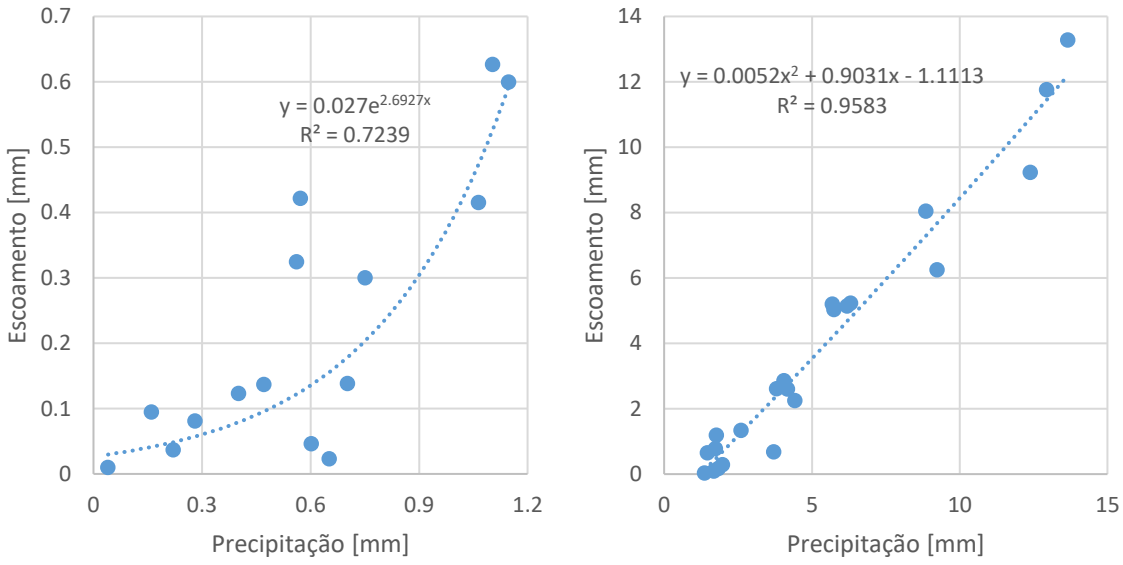


Figura 2 – Modelos de previsão do escoamento para precipitações inferiores (esquerda) e superiores (direita) a 1.2 mm

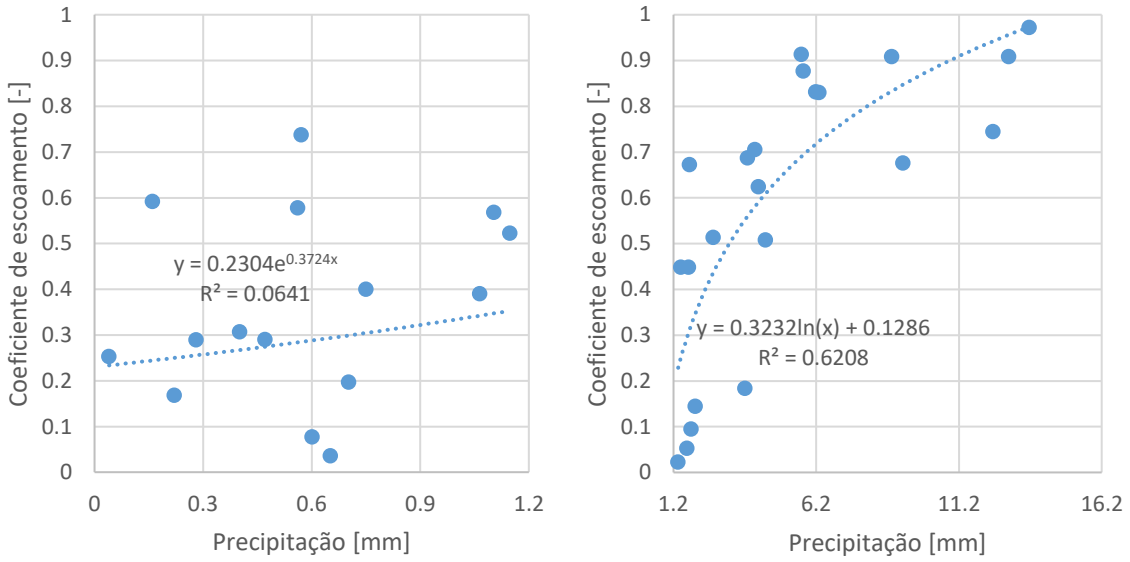


Figura 3 – Modelos de previsão do coeficiente de escoamento para precipitações inferiores (esquerda) e superiores (direita) a 1.2 mm

Relativamente à abordagem utilizada na maioria dos estudos para estimar o escoamento que aflui ao tanque de armazenamento de água da chuva, a formulação implementada difere da forma como o volume inicial de escoamento em cada evento é quantificado. Na maioria dos estudos, o volume inicial de escoamento é descontado através de um coeficiente global de escoamento entre 0.8 e 0.9 (e.g., Custódio e Ghisi 2023; Imtaez e Shadeed 2022) ou a subtração de um volume constante em cada passo de cálculo (e.g., Carollo et al. 2022). A primeira alternativa apresenta o defeito de que o volume de escoamento inicial descarregado é variável com a magnitude do evento de precipitação. A segunda alternativa implica a descarga de um volume de escoamento inicial constante todos os dias em que ocorra precipitação, independentemente de ser um evento de precipitação concentrado num único dia ou um evento com vários dias consecutivos com precipitação. No presente estudo considerou-se um volume inicial de 2 mm a descarregar que foi descontado ao nível do evento de precipitação, considerando um evento de precipitação independente sempre que ocorram pelo menos 24 horas sem precipitação antecedentes. Assim, a formulação simula a descarga dos primeiros 2 mm de precipitação de cada evento, considerando-se que em dias consecutivos com precipitação a descarga não ocorre todos os dias.

A área da superfície de recolha de água da chuva e o consumo da água da chuva dependo do edifício em análise. Como caso de estudo para instalação de um sistema de utilização de água da chuva, adotou-se o ZEB Laboratory, em Trondheim na Noruega (https://zeblab.no/). O edifício tem uma cobertura com 500 m^2 e um consumo de água diário de água potável entre 1.2 m^3 e 1.5 m^3, dependendo do mês. A proporção utilizada em usos compatíveis com água não-potável (e.g., bacias de retrete) foi estimada em 56% (Passanha et al. 2024). Na Figura 4 apresenta-se a localização relativa da cobertura verde monitorizada (a vermelho), do ZEB Laboratory (a laranja) e da estação meteorológica (a azul).

Figura 4 – Localização relativa da cobertura verde monitorizada (a vermelho), do ZEB Laboratory (a laranja) e da estação meteorológica (a azul).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em primeiro lugar testou-se se os diferentes modelos para estimar o escoamento da cobertura verde (modelos que estimam diretamente o escoamento – CV_Escoamento; modelos de que estimam o coeficiente de escoamento – CV_CoeficienteEscoamento), tendo-se constatado que conduzem a estimativas idênticas (Figura 5). Este resultado era esperado, pois apesar do aparente menor ajuste dos modelos que estimam o coeficiente de escoamento, a diferença em termos da estimativa do escoamento é mínima. Perante esta situação, apenas os modelos do escoamento foram utilizados nas restantes simulações.

A Figura 6 revela que, em Trondheim, o contributo das coberturas verdes para a retenção da água da chuva é praticamente nulo e impacta negativamente na redução de consumo de água-não potável. Esta situação resulta de uma combinação de fatores específicos do contexto, designadamente:

- O escoamento tende para o total da precipitação para eventos na ordem dos 15 mm (Figuras 2 e 3).
- Os eventos de precipitação em Trondheim tendem a prolongar-se por vários dias. Consequentemente, entre 2018 e 2023, mais de 80% da precipitação esteve associada a eventos com precipitações acumuladas superiores a 15 mm.

Apesar das pequenas diferenças decorrentes do método para estimar o escoamento degelo, em média dos eventos com precipitação acumulada superior a 15 mm é superior a 40 mm, o que associado à baixa evapotranspiração na época mais húmida explica a reduzida retenção da cobertura verde.

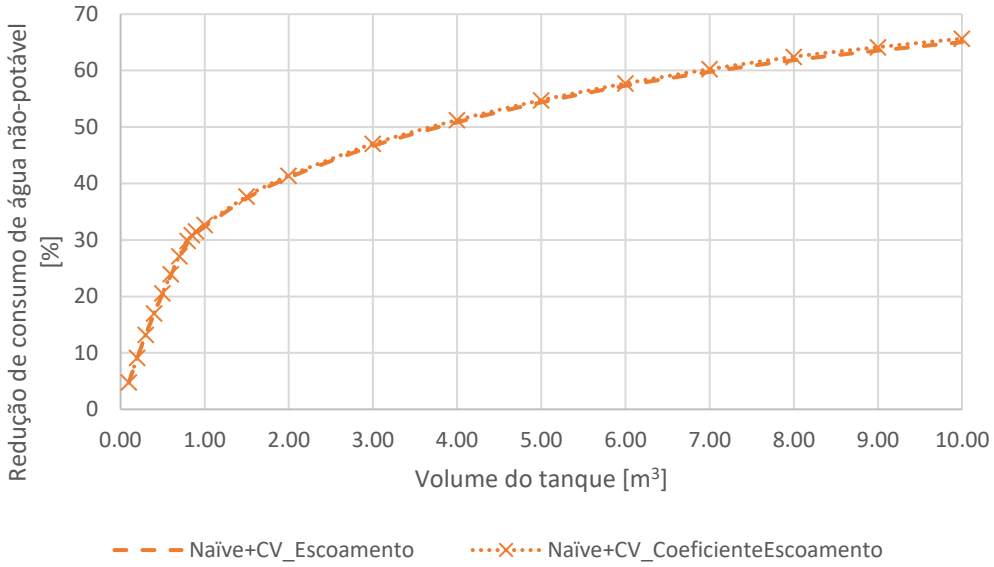


Figura 5 – Comparação dos modelos de estimativa do escoamento da cobertura verde.

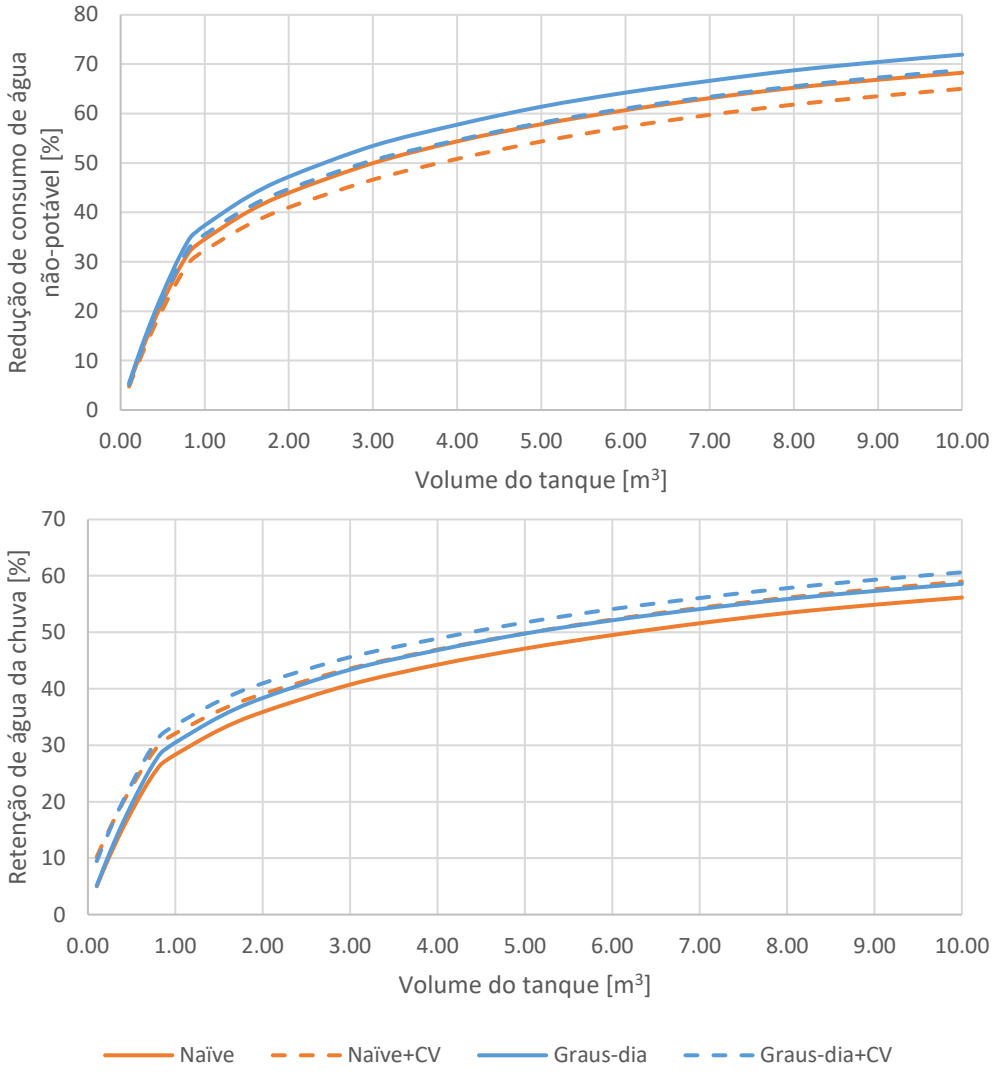


Figura 6 – Estimativa da redução de consumo de água não-potável (em cima) e da retenção de água da chuva (em baixo).

4 CONCLUSÕES

A presente comunicação explora o desempenho de um sistema de utilização de água da chuva associado a uma área de recolha em cobertura verde em Trondheim, na Noruega. A simulação desta combinação de soluções neste contexto implicou desenvolver abordagens para ter em conta que a precipitação ocorre tanto sob a forma de chuva como de neve e a cobertura verde ter um funcionamento não linear em termos de retenção da água.

Os resultados evidenciam-se que a cobertura verde tem pouco impacto tanto na redução do consumo e água para fins não-potáveis como na retenção de água da chuva. Esta situação decorre do facto dos eventos de precipitação se prolongarem por vários dias, resultando que os eventos de precipitação superiores a 15 mm representam mais de 80% de toda a precipitação durante o período analisado. Como para volumes desta magnitude o coeficiente de escoamento é 1 e durante a época húmida a evapotranspiração é reduzida, a cobertura verde contribui marginalmente para reter a água da chuva.

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi desenvolvida no âmbito do projeto GREENER (Iniciativa Bilateral nº FBR_OC2_80), financiado pelas EEA Grants.

REFERÊNCIAS

Carollo, M., Butera, I., Revelli, R. (2022). Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale. PLoS ONE 17(11):e0278107. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278107

Custódio, D.A., Ghisi, E. (2023). Impact of residential rainwater harvesting on stormwater runoff. Journal of Environmental Management, 326(Part B):116814. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116814

Imtaez, M.A., Shadeed, S. (2022). Superiority of water balance modelling for rainwater harvesting analysis and its application in deriving generalised equation for optimum tank size. Journal of Cleaner Production, 342:130991. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130991

Passanha, V., Silva, C.M., Bosco, C., Sousa, V., Sivertsen, E. (2024). Methodology for modelling rainwater harvesting with snow – Application to Trondheim, Norway. 8th IAHR Europe Congress, 4-7 June 2024, Lisbon, Portugal.

Silva C.M., Sousa V., Carvalho N.V. (2015). Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. Resources, Conservation and Recycling, 94:21-34. 10.1016/j.resconrec.2014.11.004

Sousa, V., Matos, J.P., Meireles, I., Bertolin, C. (2024). Runoff coefficient of green roofs in Trondheim, Norway. 8th IAHR Europe Congress, 4-7 June 2024, Lisbon, Portugal.

Stovin, V., Vesuviano. G., Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. Journal of Hydrology, 414–415:148-161. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROJETO GREENER: APRESENTAÇÃO E RESULTADOS PRELIMINARES

Vitor Sousa[a]; Cristina Matos Silva[a]; Inês Meireles[b]; Chiara Bertolin[c]; Gabrielle Loboccaro[c]; Hongchao Fan[c]; Stefano Cavazani[c]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, vitor.sousa@tecnico.ulisboa.pt, cristina.matos.silva@tecnico.ulisboa.pt

[b]RISCO, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, imeireles@ua.pt

[c]Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, chiara.bertolin@ntnu.no, gabriele.lobaccaro@ntnu.no, hongchao.fan@ntnu.no, stefano.cavazzani@ntnu.no

RESUMO

As coberturas verdes são soluções baseadas na natureza que apresentam benefícios tanto à escala do edifício como da cidade. À escala do edifício identificam-se benefícios diretos em termos económicos (e.g., valorização dos imóveis), ambientais (e.g., melhoria do desempenho térmico e acústico) e sociais (e.g., criação de espaços de lazer). À escala da cidade, especialmente se houver uma implementação a uma escala significativa, os benefícios diretos também se podem agrupar em termos económicos (e.g., redução dos caudais afluentes às Estações de Tratamento de Águas Residuais nas cidades com sistemas de drenagem unitários), ambientais (e.g., melhoria da qualidade do ar, redução do nível de ruído, aumento da biodiversidade) e sociais (e.g., redução do risco de cheias urbanas, redução do efeito da ilha de calor). Um dos aspetos centrais que controla grande parte dos benefícios das coberturas verdes é o seu comportamento hidrológico, sendo o objetivo central do Projeto GREENER aumentar o conhecimento existente nesta temática no contexto climático específico de Portugal.

Palavras-chave: cobertura verde, desempenho hidrológico, ensaios experimentais

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, aliado a uma crescente acumulação da mesma em aglomerados urbanos, tem exacerbado os impactos dos espaços urbanos a diversos níveis (e.g., ambientais, sociais), em especial das grandes metrópoles. A importância desta questão é tal que as Nações Unidas definiram como um dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável a promoção de "cidades e comunidades sustentáveis".

Neste contexto, as soluções baseadas na natureza estão a ser cada vez mais adotadas para melhorar a sustentabilidade dos espaços urbanos. Entre estas, as coberturas verdes apresentam múltiplos benefícios nas diferentes dimensões da sustentabilidade e a diferentes níveis/escalas dos espaços urbanos (Quadro 1)

Quadro 1 – Benefícios das coberturas verdes (D – Diretos, I – Indiretos)

Benefício/Dimensão	Ambiental	Económica	Social
Escala do Edifício			
Melhoria do desempenho térmico		D	I
Melhoria do desempenho acústico			D
Aumento da durabilidade	I	D	
Disponibilização de facilidades/serviços			D
Melhoria do comportamento ao fogo[1]			D
Potencial para produção de alimentos	I	D	I[a]
Melhoria do desempenho de painéis fotovoltaicos	I	D	I[b]
Aumento do valor dos edifícios		D	
Escala da Cidade			
Gestão das águas pluviais Redução do volume e do pico Aumento da qualidade	 D	D	I[c]
Redução do efeito de ilha de calor		I	D
Redução do ruído			D
Redução da poluição ambiental	D		I
Sequestro de carbono	D		
Aumento da biodiversidade	D		
Melhoria estética			D

1 - comparando com as membranas poliméricas
a - equidade social no acesso a alimentos
b - equidade social no acesso a energia limpa e renovável
c - através da redução do risco de cheias

De facto, apesar das coberturas verdes se enquadrarem com o objetivo de desenvolvimento sustentável da promoção de "cidades e comunidades sustentáveis", acabam por providenciar contributos importantes em vários dos outros objetivos sustentáveis. Dentro dos restantes objetivos sustentáveis, as coberturas verdes contribuem para a "água limpa e saneamento", o "consumo e produção responsável", a "saúde e bem-estar", a "energia limpa e acessível" e a "ação climática" (Figura 1).

Esta situação levou a que as instituições governativas um pouco por todo o globo tenham vindo a promover a instalação de coberturas verdes. Esta promoção tem sido feita através de estratégias que incluem a simples divulgação/informação, a criação de mecanismos de incentivo até à obrigatoriedade. Os mecanismos de incentivo incluem a disponibilização de apoios financeiros, descontos em taxas municipais, usualmente nas associadas às águas pluviais, e/ou a agilização dos processos de licenciamento. A promoção da instalação de coberturas verdes tem sido desenvolvida

acima de tudo à escala dos municípios, apresentando-se na Figura 2 um apanhado do número de municípios que oferecem subsídios para a instalação de coberturas verdes nas várias regiões do globo.

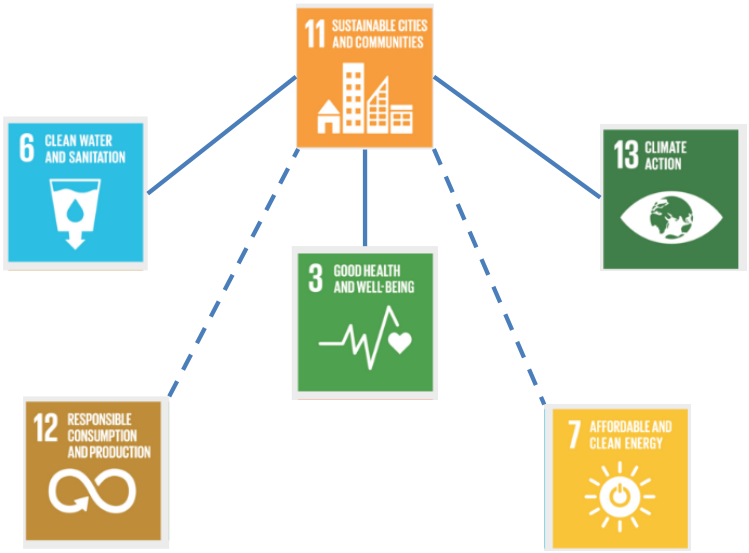


Figura 1 – Objetivos sustentáveis para os quais as coberturas verdes contribuem

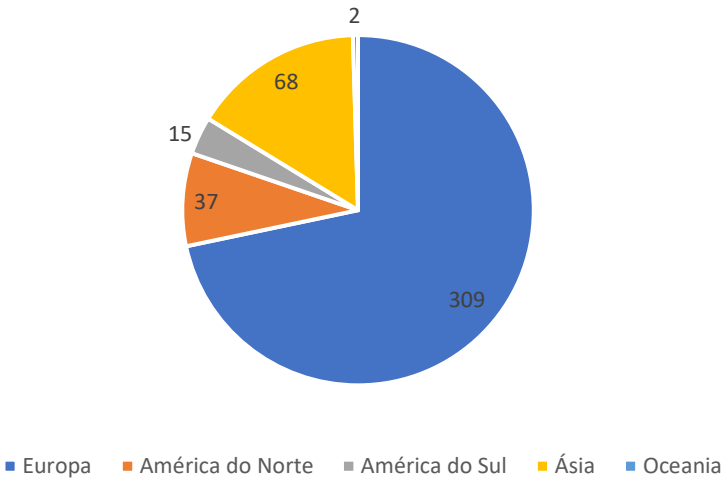
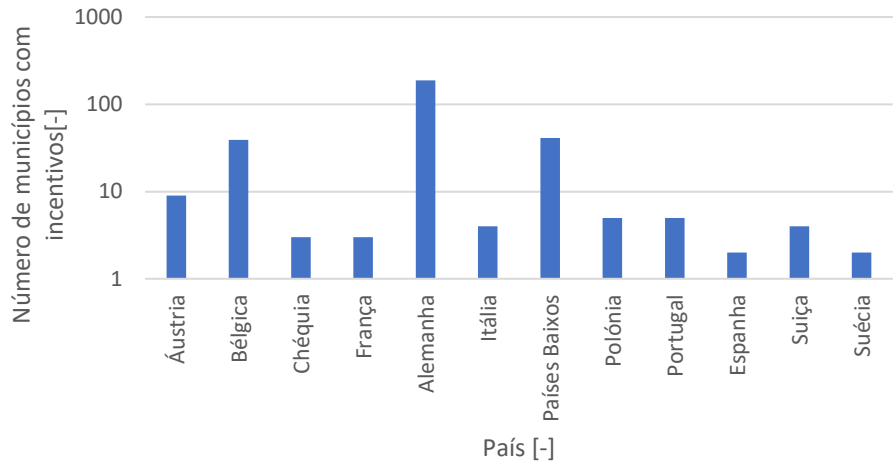


Figura 2 – Número de municípios que oferecem subsídios para a instalação de coberturas verdes por região do globo

Na Europa, a Alemanha, os Países Baixos e a Bélgica destacam-se, com diversos municípios a providenciarem diferentes tipos de incentivos (e.g., subsídios à instalação, descontos nas taxas de águas pluviais) de forma isolada ou em combinação (Figura 3). De salientar que, para além dos incentivos, algumas cidades tornaram obrigatória a instalação de coberturas verdes em novos edifícios (e.g., Estugarda, Munique, Basel, Zurique). Noutros casos, a obrigatoriedade não é direta, como por exemplo na região de Milão (e outras regiões de Itália estão a considerar seguir políticas idênticas) foi criado o conceito de invariância hidrológica que obriga os promotores a adotar medidas que limitem o escoamento pluvial proveniente de novos espaços urbanos. Em França e na Chéquia, apesar do menor número de incentivos a nível municipal, existem mecanismos de incentivo a nível nacional. Em França é obrigatória a instalação de coberturas verdes ou painéis fotovoltaicos em novos edifícios e na Chéquia há apoios para a instalação de coberturas verdes em todo o território. Em Portugal também já houve incentivos para a instalação de coberturas verdes através do Fundo Ambiental.



Dinamarca, Finlândia, Noruega, Reino Unido apenas 1 caso cada

Figura 3 – Número de municípios com incentivos à instalação de coberturas verdes (França e Chéquia incluem o incentivo nacional)

As Figuras 2 e 3 foram elaboradas com base nos resultados de estudos anteriores, nomeadamente Savarani (2019), Liberalesso et al. (2020), BuGG (2023), GRHC (2023) e Wilkinson et al. (2024), complementados com pesquisas diretas em sites de municípios na Europa.

Na Europa, a grande motivação para a promoção da instalação de coberturas verdes tem sido o seu contributo para o ciclo urbano da água, traduzido pelo facto dos incentivos em muitos casos até serem oferecidos pelas entidades gestoras dos sistemas de drenagem urbana. Assim, o projeto GREENER pretende contribuir para aumentar o conhecimento relativamente ao desempenho hidrológico das coberturas verdes. Adicionalmente, o desempenho hidrológico controla/afeta o desempenho das coberturas verdes noutras dimensões de interesse (Figura 4).

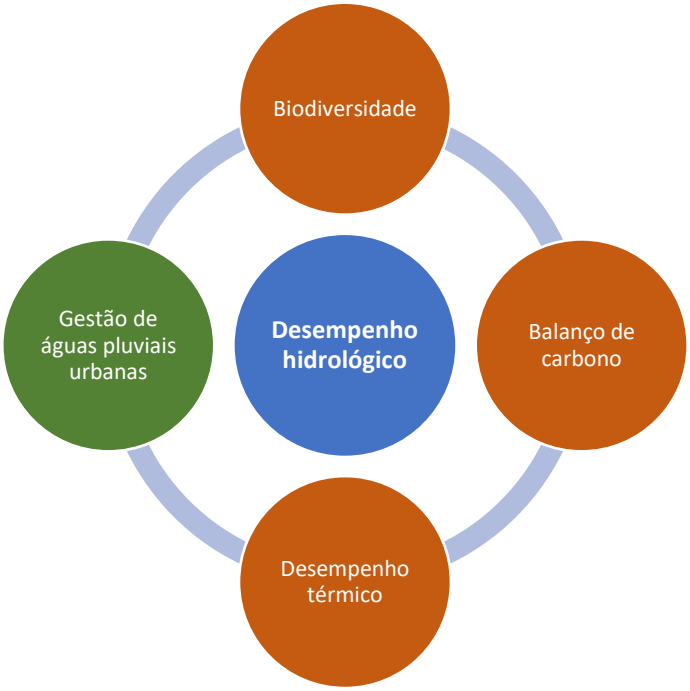


Figura 4 – Relação do desempenho hidrológico com benefícios das coberturas verdes

Para além da relação natural entre o comportamento hidrológico e a gestão das águas pluviais urbanas, a biodiversidade, o balanço de carbono e o desempenho térmico também se encontram diretamente relacionados com o comportamento hidrológico da cobertura verde. A capacidade das coberturas verdes em reter água é que vai ditar o desenvolvimento do coberto vegetal, controlando assim a biodiversidade que é capaz de subsistir. Apesar do sequestro natural do carbono por parte das plantas, em situações de stress hídrico já foi demonstrado que as coberturas verdes se tornam fontes de emissão de CO_2, com a respiração a suplantar a fotossíntese. O desempenho térmico, tanto ao nível do edifício como ao nível da cidade, depende do teor em humidade no solo. Em particular, a redução do efeito da ilha de calor decorre do arrefecimento decorrente da evaporação da água retida na cobertura verde. Assim, uma compreensão mais detalhada do comportamento hidrológico das coberturas verdes permitirá melhorar a sua gestão para potenciar os múltiplos benefícios associados.

2 ABORDAGEM E RESULTADOS

O Projeto GREENER envolve investigadores do IST, em Portugal, e da NTNU, na Noruega, contando ainda com colaborações de colegas da Universidade de Aveiro (Portugal) e do Institute of Soil, Water and Environmental Sciences ARO, Volcani Research Center (Israel). A abordagem adotada encerra 3 dimensões principais (Figura 5), designadamente:

- Revisão da literatura.
- Intercâmbio internacional.
- Instalação experimental.

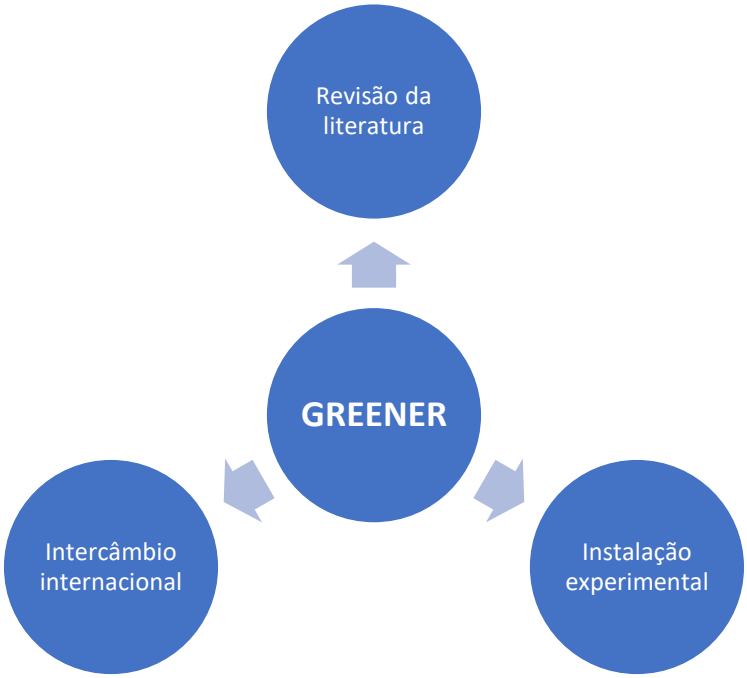


Figura 5 – Esquema da abordagem adotada no projeto GREENER

A primeira dimensão compreendeu uma recolha extensiva da literatura sobre coberturas verdes, dando ênfase na recolha de publicações indexadas na Scopus que disponibilizam os resultados sem ser em formato gráfico. Nesta pesquisa foram identificados 94 artigos, totalizando 2697 amostras da taxa de redução de escoamento e 513 amostras da taxa de redução do pico. A Figura 6 apresenta a

distribuição geográfica dos estudos analisados para a taxa de retenção do escoamento e para a taxa de redução do pico, observando-se que a grande maioria dos estudos se realizaram na Europa.

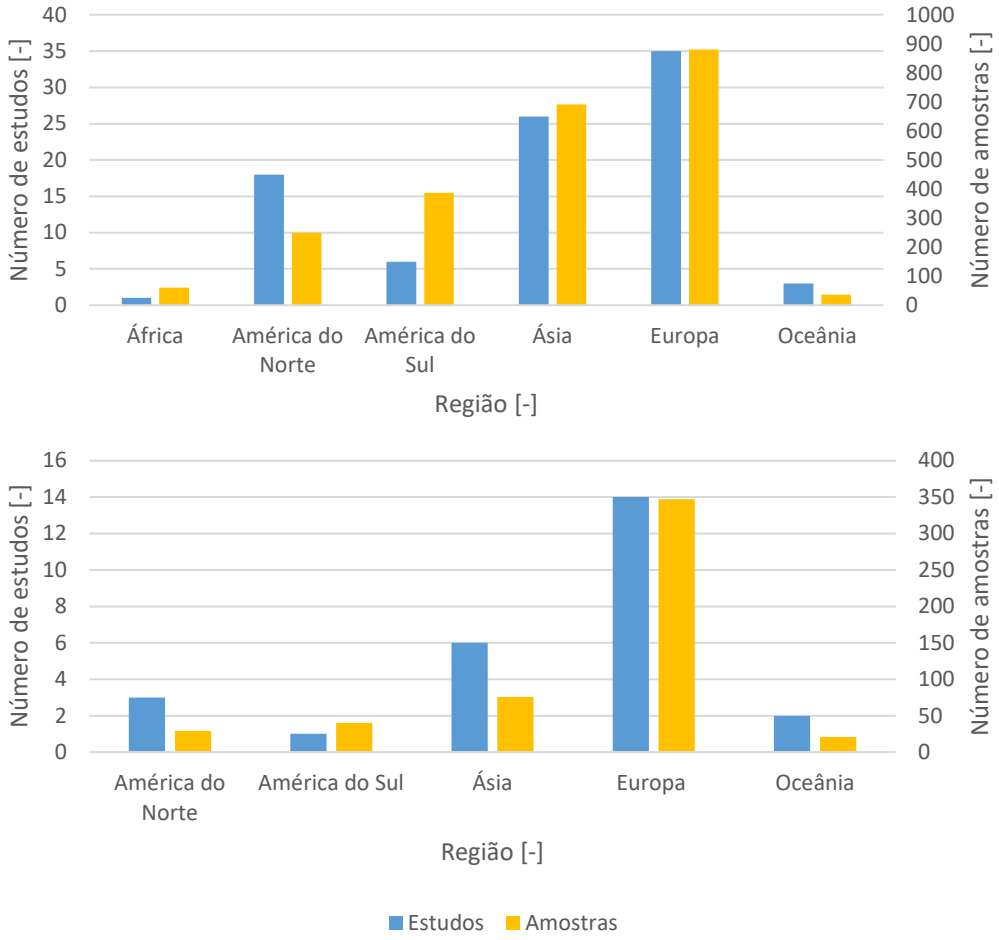


Figura 6 - Distribuição dos estudos referentes à taxa de redução do escoamento (em cima) e à taxa de redução do pico (em baixo) por região do globo

Para além destes estudos em revistas internacionais, foram identificados outros trabalhos (e.g., teses, relatórios) com dados de monitorização de coberturas verdes. Destaca-se ainda que, no âmbito do projeto KLIMA2050, os dados de monitorização da instalação piloto em Trondheim estiveram disponíveis online durante parte da duração do projeto, tendo sido recolhidos para posterior análise.

No que diz respeito ao intercâmbio internacional, para além da relação com os colegas da NTNU, da Noruega, membros do projeto GREENER, foi ainda reforçada a colaboração com colegas do SINTEF. Esta situação decorreu de colaborações anteriores ao nível de orientação conjunta de dissertações de mestrado e foi potenciada pelo projeto EVIDENCE, que está a ser desenvolvido em paralelo pela mesma equipa do IST. O projeto EVIDENCE visa desenvolver métodos para simular o desempenho de sistemas de utilização de água da chuva em climas com neve, pelo que se procurou conjugar ambos os projetos, explorando o desempenho combinado de sistemas de utilização de água da chuva e coberturas verdes. Utilizando como caso de estudo o ZEB Laboratory, na Figura 7 apresenta-se o desempenho estimado para um sistema de utilização de água da chuva isolado ou combinado com uma cobertura verde em Trondheim (a azul) e em Lisboa (a laranja). Os resultados revelam diferenças

significativas no contributo das soluções dependendo do contexto climático em que se encontram, sendo notório que a cobertura verde tem um impacto muito superior em Lisboa do que em Trondheim.

As simulações foram realizadas recorrendo a um modelo de balanço de massa com o escoamento da cobertura verde a ser estimado a partir de relações estatísticas desenvolvidas a partir de dados obtidos em instalações experimentais em ambas os locais.

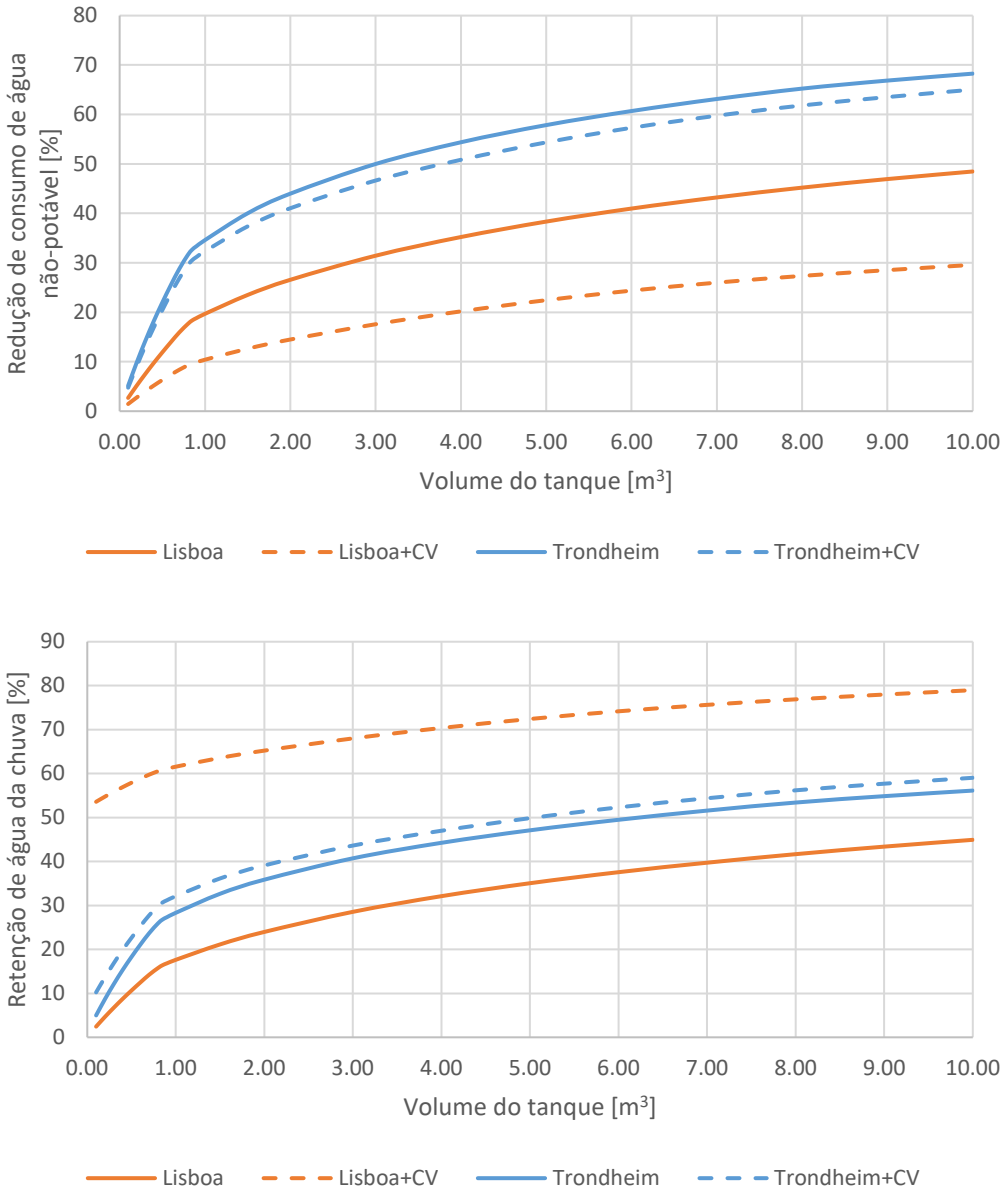


Figura 7 – Impacto das coberturas verdes no desempenho em termos de redução de consumo de água não-potável (em cima) e retenção de água da chuva (em baixo) de sistemas de utilização de água da chuva em Trondheim e Lisboa

Adicionalmente, estabeleceram-se contactos com colegas a trabalhar nestes temas na Alemanha, França e Itália. Estes contactos foram materializados em visitas por parte de elementos da equipa portuguesa, donde resultou a elaboração de 2 artigos para revistas internacionais com os colegas de Itália (um prestes a ser submetido e um em elaboração à data da submissão da presente comunicação) e 2 artigos para revistas internacionais com os colegas da Alemanha (em elaboração). Os colegas da

Alemanha também se disponibilizaram a instalar o equipamento de monitorização de que dispõem nas instalações a serem montadas no âmbito do projeto GREENER.

3 CONCLUSÕES

O projeto GREENER (Iniciativa Bilateral nº FBR_OC2_80), suportado pelas EEA Grants, visa aumentar o conhecimento sobre o comportamento hidrológico de coberturas verdes em Portugal e na Noruega, providenciando ao meio académico e à indústria ferramentas práticas que suportem a tomada de decisões. Na literatura, constata-se:

- As coberturas verdes são uma solução cuja adoção tem vindo cada vez mais a ser incentivada/apoiada do ponto de vista político. Adicionalmente, constata-se que, especialmente na Europa, a motivação primordial dos incentivos/apoios resultam da contribuição que as coberturas verdes podem dar para a gestão das águas pluviais em meio urbano.
- Uma grande maioria dos estudos sobre o comportamento hidrológico tem suportado desenvolvimento ou baseia-se na utilização de modelos complexos que, na prática, são de aplicabilidade limitada devido à parametrização e calibração que requerem.

Assim, no âmbito do projeto GREENER pretendeu-se providenciar ferramentas de base estatística cuja utilização apenas exija informação que seja facilmente acessível. Esta opção tem, naturalmente, limitações em termos de generalização. Contudo, considerando que a maioria das coberturas verdes instaladas é do tipo extensivo e que, neste tipo de coberturas verdes, o tipo de cobertura vegetal aparenta ter um efeito limitado no seu comportamento hidrológico, permite obter uma aproximação do comportamento das mesmas para a tomada de decisões a vários níveis.

Por ter a mesma equipa do IST, o projeto GREENER foi desenvolvido em paralelo com o projeto EVIDENCE, que explora o efeito na neve no desempenho de sistemas de utilização de água da chuva, comparando Portugal com a Noruega. Os resultados da simulação de sistemas de utilização de água da chuva em Portugal (Lisboa) e na Noruega (Trondheim) evidenciam que a combinação com coberturas verdes afeta mais o desempenho destes sistemas em Portugal.

A adoção de uma abordagem multidimensional permitiu aumentar o seu âmbito, expandindo a cobertura geográfica para incluir a Alemanha, França e Itália, ao mesmo tempo que se reforçou a colaboração com colegas do Brasil e de Israel. O projeto também criou condições para o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado (concluída) e uma tese de doutoramento (em curso), colaborar no desenvolvimento de uma tese de doutoramento em Itália (Politécnico de Torino) e receber um aluno de pós-doutoramento do Brasil.

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi desenvolvida no âmbito do projeto GREENER (Iniciativa Bilateral nº FBR_OC2_80), financiado pelas EEA Grants.

REFERÊNCIAS

BuGG (2023). BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2023: Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG), Deutscheland. ISSN 2750-3763

GRHC (2023). Green Roof and Wall Policy in North America: Regulations, Incentives, and Approaches. Report, Green Roofs for Healthy Cities (GRHC), USA.

Liberalesso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., Manso, M. (2020). Green Infrastructure and Public Policies: an International Review of Green Roofs and Green Walls Incentives. Land Use Policy, 96: 104693. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693

Saravani, S. (2019). A Review of Green Roof Laws & Policies: Domestic and International Examples. Guarini Center, Frank J. Guarini Center on Environmental, Energy, and Land Use Law at NYU School of Law.

Wilkinson, S. J., Ghosh, S., Pelleri, N. (2024). Mandatory or voluntary approaches to green roof implementation: a comparative study among some global cities, Journal of Environmental Planning and Management, 67(2):334-355. https://doi.org/10.1080/09640568.2022.2113768

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE COBERTURAS E BENCHMARK INTEGRADOS NUMA FERRAMENTA BIM

Maria Teresa Ferreira[a]; António Aguiar Costa [a]; José Dinis Silvestre [a]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, teresaferreira@tecnico.ulisboa.pt, aguiar.costa@tecnico.ulisboa.pt, jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O projeto e a substituição de coberturas, tanto planas como inclinadas, muitas vezes designadas como a quinta fachada, são uma prática comum e essencial na indústria da construção. No entanto, este processo apresenta desafios em termos de eficiência, relação custo-benefício e sustentabilidade. O presente artigo explora a integração de técnicas de Avaliação do Ciclo de Vida (AVC) numa ferramenta *Building Information Modeling* (BIM) através de *benchmarks* para aprimorar o processo de projeto de coberturas.

No contexto da ACV e *benchmark*, este artigo investiga as considerações de projeto e construção para coberturas com inclinações variadas. A proposta de integração de BIM e ACV permite a otimização de projetos através da opção de *benchmark,* aproveitando os recursos colaborativos e a visualização precisa do BIM e a avaliação de impactes ambientais da ACV. Esta abordagem integrada facilita a seleção e avaliação de coberturas sustentáveis e eficientes que minimizem o consumo de recursos e a pegada de carbono.

Em conclusão, a automação do projeto e da substituição de coberturas, aliada à otimização através de *benchmark* na ACV apoiada por BIM, representa um avanço significativo na indústria da construção. Esta abordagem integrada melhora a eficiência, a sustentabilidade e a tomada de decisões ao longo do ciclo de vida das coberturas, contribuindo para práticas de construção mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

Palavras-Chave: Avaliação do Ciclo de Vida, BIM, Coberturas, *Benchmark*

1 INTRODUÇÃO

As diretrizes europeias para a sustentabilidade, definidas numa primeira instância no acordo de Paris e aprofundadas posteriormente no *EU Green Deal,* estabelecem a redução de 55% ou mais de gases com efeito de estufa até 2030 e que a Europa seja um continente neutro em emissões de carbono até 2050 (EC 2019, 2020, 2021a). O *EU Green Deal* abrange diversas áreas (EC 2019) contudo a construção tem um contributo significativo para as emissões de carbono. Posteriormente a comissão europeia desenvolveu o *Level(s) framework* (EC 2021b), especificamente para mitigar os impactes do sector da construção que, por si só, é responsável por 40% da energia consumida, 1/3 dos resíduos gerados e 1/3 do consumo de água (EC 2019). Grande parte dessas emissões concentram-se nas fases de produção e construção (A) do Ciclo de Vida (CV): A1 - fornecimento de materiais primários, A2 - transporte, A3 - fabrico, A4 - instalação e A5 - construção (EN15804;2012+A2 2019). O *Level(s) framework* tem a sua estrutura dividida em 6 macro objetivos para a sustentabilidade na construção, abrangendo tanto construção nova como reabilitação: 1º - Emissões de gases com efeito de estufa ao longo do CV, 2º - Eficiência de recursos e CV de materiais circulares, 3º - Eficiência de utilização de recursos hídricos, 4º - Espaços saudáveis e confortáveis, 5º Adaptação e resiliência às alterações climáticas, 6º - Otimização do custo do CV (EC 2021b).

Dos 6 macro objetivos estabelecidos no *Level(s) framework*, o 1º - Emissões de gases com efeito de estufa ao longo do CV, que se ramifica no 1.2 Potencial de aquecimento global (*Global Warming Potencial* (GWP)) medido em CO_2 eq./m^2/ ano ao longo CV, e o 6º - Otimização do custo do CV e valor medido em €/m²/ano foram integrados numa ferramenta de *Building Information Modeling* (BIM) pelos mesmos autores em trabalhos anteriores, especificamente no projeto europeu Circular Eco BIM e em publicações subsequentes (Ferreira *et al*. 2022ab, 2023). Foi assim verificado como é que uma ferramenta BIM para a ACV pode ajudar os projetistas a melhorar o desempenho ambiental dos seus edifícios nas fases de projeto. Esta ferramenta faz a ligação automática à base de dados de Declarações Ambientais de Produto (DAP) online do Eco Portal por material ou por sistema, dependendo do elemento construtivo. Além disso, os autores encontraram uma oportunidade de desenvolvimento e integração na ferramenta BIM de soluções construtivas de coberturas planas e inclinadas sistematizadas através de um sistema de *ranking* e *benchmarks*. Assim, a pergunta de investigação a que o presente artigo se propõe responder é: Podem os projetistas otimizar ambientalmente o projeto de coberturas através de *ranking* e *benchmarks* com base em soluções construtivas propostas por um plugin BIM?

2 MÉTODOS

2.1 INTEGRAÇÃO DE IMPACTES AMBIENTAIS DE COBERTURAS PLANAS E INCLINADAS NO BIM

Como mencionado em §1, o plugin BIM para ACV já foi detalhado em trabalhos anteriores (Ferreira *et al*. 2022ab, 2023) pelo que o presente artigo foca-se na integração de um sistema de *benchmarks* nessa ferramenta BIM para redução dos impactes ambientais das coberturas em fases de projeto. A funcionalidade de "*Benchmark*" permite aos projetistas substituírem automaticamente as suas primeiras intenções de coberturas com base em dados ambientais já validados pela comunidade científica (Durão 2022, Gomes 2019) mas que não estavam integrados em nenhum software de apoio ao projeto.

Assim, a ferramenta BIM em si foi programada em C# para a API do software da Autodesk Revit 2024 e para ler a base de dados de coberturas planas e inclinadas.

2.2 IMPLEMENTAÇÃO PARA UM CASO DE ESTUDO

Em primeiro lugar, os projetistas necessitam de ter um modelo BIM desenhado no software Revit, no qual tem de já estar finalizada a correta atribuição das categorias (paredes, tetos, coberturas…). Nesta fase não é necessário haver ainda informação sobre as camadas de materiais que constituem o elemento, nem mesmo sobre o respetivo impacte ambiental, dado que isso será efetuado nos passos seguintes, automaticamente e através do plugin.

Ao abrir o plugin, o projetista seleciona o tipo de análise que pretende desenvolver entre três opções:

1. ACV, onde são carregados os indicadores ambientais necessários para realizar a análise: Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (ADP), Potencial de Acidificação (AP), Potencial de Eutrofização (EP), Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Depleção da Camada de Ozono (ODP), Potencial de Oxidação fotoquímica (POCP); além do Coeficiente de transmissão térmica (*U-Value*);
2. GWP, onde são carregados os indicadores ambientais necessários para realizar a análise: GWP total (GWPt), GWP fossil (GWPf), GWP biogénico (GWPb), GWP usos do solo (GWPl)
3. Custo, onde é carregado o indicador económico de custo em euros, necessário para realizar essa análise.

Os indicadores ambientais são carregados automaticamente pelo plugin no modelo através de parâmetros partilhados correspondentes a cada indicador ambiental necessários para realizar a análise. É possível isolar por categoria, no caso do presente caso de estudo, coberturas (*Roofs*), conforme ilustrado na Figura 1. Nessa mesma figura é possível ver o plugin a ler automaticamente as quantidades de cada elemento no modelo expressas em Área (m^2) e Volume (m^3); posteriormente a área e o volume serão automaticamente relacionados com o impacte ambiental de cada indicador na respetiva unidade de medida para obtenção do valor final.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coberturas foram divididas, numa primeira instância, em coberturas inclinadas e planas, sendo os resultados detalhados, respetivamente, em §3.1 e §3.2.

3.1 COBERTURAS INCLINADAS

Ao selecionar uma cobertura (Figura 1), o software automaticamente deteta a respetiva inclinação da pendente; ao selecionar a cobertura e clicar "*Element benchmark*", abre uma nova janela com a funcionalidade *benchmark.* Aí, no caso de ser uma cobertura inclinada, são propostas 60 soluções de coberturas (coluna 1 da Figura 2). Na Figura 2 são visíveis também mais quatro colunas onde as 60 soluções de sistemas de coberturas são categorizadas por tipo: a primeira consiste nas "Coberturas inclinadas com laje de betão e isolamento por cima da laje", a segunda categoria consiste em "Coberturas inclinadas leves com isolamento por cima", visível na Figura 3; a terceira categoria consiste em coberturas com a "Laje de betão horizontal"; e, por último, o quarto grupo são as coberturas com "Painéis compósitos horizontais".

Para cada uma das 60 soluções construtivas são carregados os indicadores ambientais AP, GWP, ODP, POCP, AP e EP, e também o *U-Value*, e os respetivos impactes ambientais por categoria, sendo possível ordenar o *ranking* do impacte ambiental por categoria como visível no canto superior esquerdo da Figura 2.

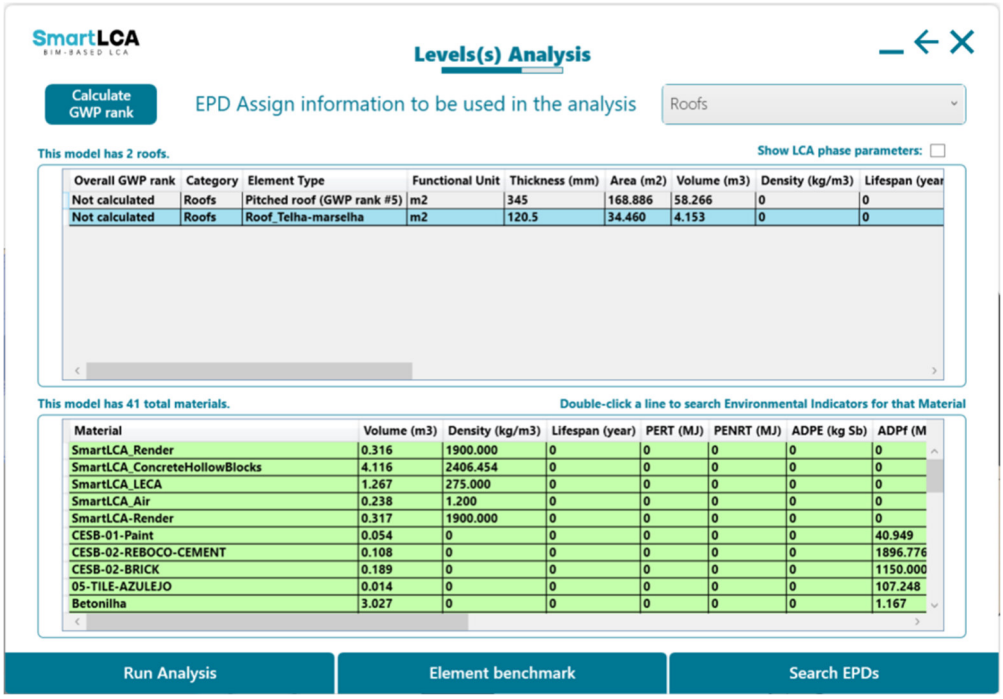


Figura 1- Objetos BIM da categoria Coberturas isolados na ferramenta.

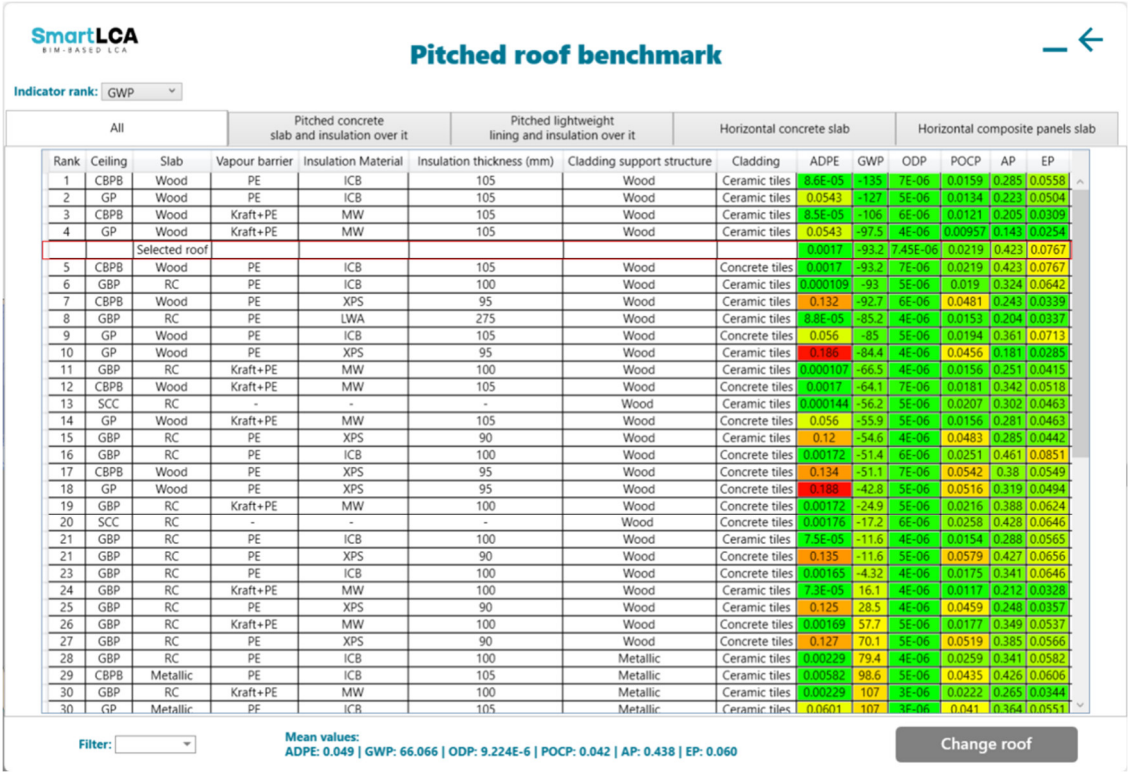
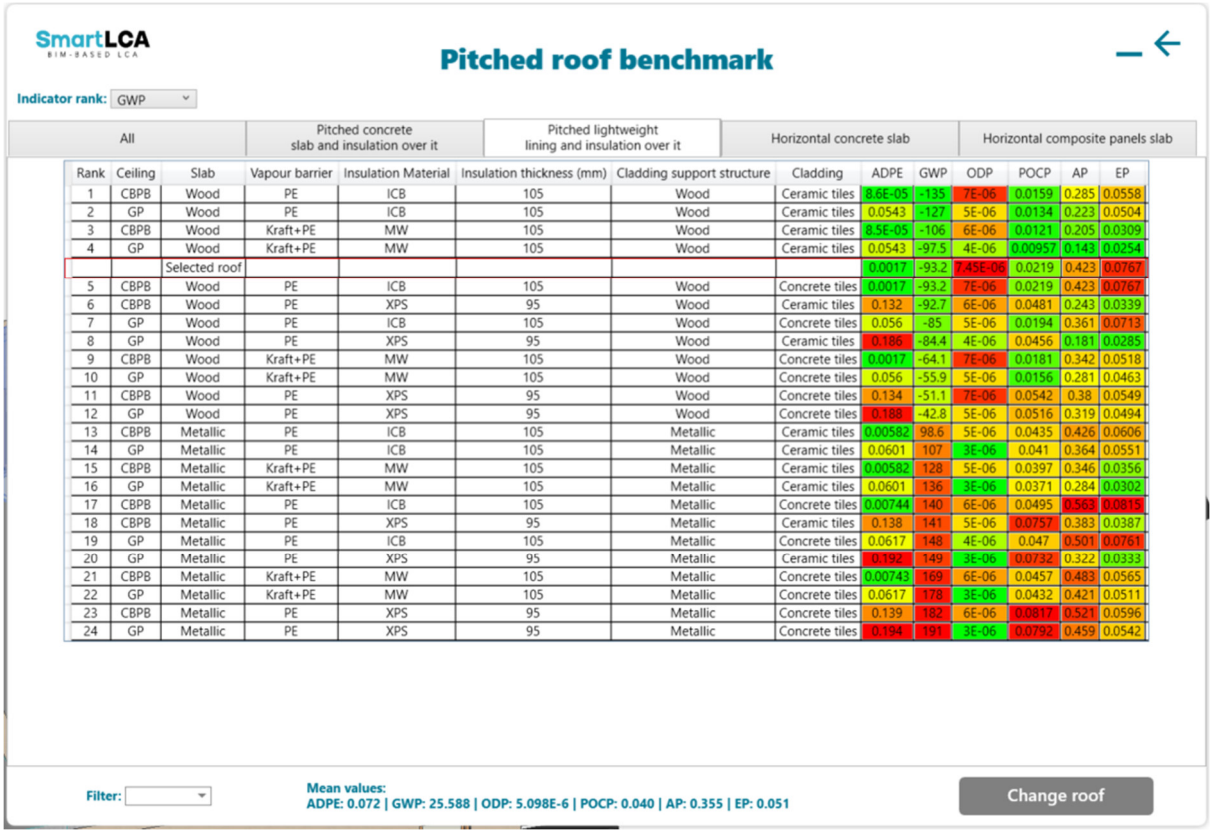


Figura 2- Coberturas inclinadas na opção *Benchmark*.



Rank	Ceiling	Slab	Vapour barrier	Insulation Material	Insulation thickness (mm)	Cladding support structure	Cladding	ADPE	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	CBPB	Wood	PE	ICB	105	Wood	Ceramic tiles	8.6E-05	-135	7E-06	0.0159	0.285	0.0558
2	GP	Wood	PE	ICB	105	Wood	Ceramic tiles	0.0543	-127	5E-06	0.0134	0.223	0.0504
3	CBPB	Wood	Kraft+PE	MW	105	Wood	Ceramic tiles	8.5E-05	-106	6E-06	0.0121	0.205	0.0309
4	GP	Wood	Kraft+PE	MW	105	Wood	Ceramic tiles	0.0543	-97.5	4E-06	0.00957	0.143	0.0254
		Selected roof						0.0017	-93.2	7.45E-06	0.0219	0.423	0.0767
5	CBPB	Wood	PE	ICB	105	Wood	Concrete tiles	0.0017	-93.2	7E-06	0.0219	0.423	0.0767
6	CBPB	Wood	PE	XPS	95	Wood	Ceramic tiles	0.132	-92.7	6E-06	0.0481	0.243	0.0339
7	GP	Wood	PE	ICB	105	Wood	Concrete tiles	0.056	-85	5E-06	0.0194	0.361	0.0713
8	GP	Wood	PE	XPS	95	Wood	Ceramic tiles	0.186	-84.4	4E-06	0.0456	0.181	0.0285
9	CBPB	Wood	Kraft+PE	MW	105	Wood	Concrete tiles	0.0017	-64.1	7E-06	0.0181	0.342	0.0518
10	GP	Wood	Kraft+PE	MW	105	Wood	Concrete tiles	0.056	-55.9	5E-06	0.0156	0.281	0.0463
11	CBPB	Wood	PE	XPS	95	Wood	Concrete tiles	0.134	-51.1	7E-06	0.0542	0.38	0.0549
12	GP	Wood	PE	XPS	95	Wood	Concrete tiles	0.188	-42.8	5E-06	0.0516	0.319	0.0494
13	CBPB	Metallic	PE	ICB	105	Metallic	Ceramic tiles	0.00582	98.6	5E-06	0.0435	0.426	0.0606
14	GP	Metallic	PE	ICB	105	Metallic	Ceramic tiles	0.0601	107	3E-06	0.041	0.364	0.0551
15	CBPB	Metallic	Kraft+PE	MW	105	Metallic	Ceramic tiles	0.00582	128	5E-06	0.0397	0.346	0.0356
16	GP	Metallic	Kraft+PE	MW	105	Metallic	Ceramic tiles	0.0601	136	3E-06	0.0371	0.284	0.0302
17	CBPB	Metallic	PE	ICB	105	Metallic	Concrete tiles	0.00744	140	6E-06	0.0495	0.563	0.0815
18	CBPB	Metallic	PE	XPS	95	Metallic	Ceramic tiles	0.138	141	5E-06	0.0757	0.383	0.0387
19	GP	Metallic	PE	ICB	105	Metallic	Concrete tiles	0.0617	148	4E-06	0.047	0.501	0.0761
20	GP	Metallic	PE	XPS	95	Metallic	Ceramic tiles	0.192	149	3E-06	0.0732	0.322	0.0333
21	CBPB	Metallic	Kraft+PE	MW	105	Metallic	Concrete tiles	0.00743	169	6E-06	0.0457	0.483	0.0565
22	GP	Metallic	Kraft+PE	MW	105	Metallic	Concrete tiles	0.0617	178	3E-06	0.0432	0.421	0.0511
23	CBPB	Metallic	PE	XPS	95	Metallic	Concrete tiles	0.139	182	6E-06	0.0817	0.521	0.0596
24	GP	Metallic	PE	XPS	95	Metallic	Concrete tiles	0.194	191	3E-06	0.0792	0.459	0.0542

Figura 3 – Cobertura inclinada por categoria - Cobertura leve.

Ao selecionar uma solução, a cobertura é automaticamente substituída no modelo BIM, incluindo todas as camadas de materiais que a constituem com as espessuras definidas na tabela das Figuras 2 e 3 - espessura por camada de material e espessura total, e os dados dos impactes ambientais por indicador ficam também gravados nos objetos BIM, especificamente nos parâmetros partilhados criados para o efeito. Obtêm-se assim como resultado no modelo a solução ilustrada na Figura 4, onde são visíveis os pormenores de uma cobertura inclinada da categoria 2 "Cobertura inclinada leve com isolamento por cima", incluindo todos os materiais que a constituem com as respetivas espessuras. Na categoria 2, tendo como base do *ranking* o indicador GWP, a cobertura está em quinto lugar; se voltarmos a observar a Figura 2, a cobertura escolhida está também em quinto lugar no *ranking* global das 60 coberturas inclinadas, tendo em conta o GWP.

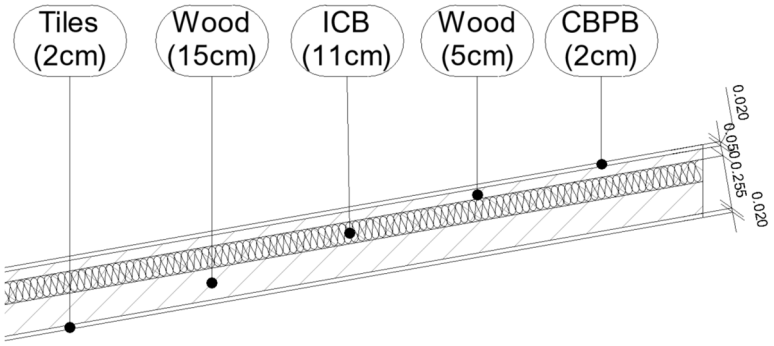


Figura 4 – Detalhe da substituição automática da cobertura inclinada escolhida no modelo BIM.

Legenda Figura 4: *Tiles* – Telhas de betão; *Wood* - Madeira; *ICB (Insulation Cork Board)* – Isolamento de placas de cortiça; *CBPB (Cement Bonded Particle Board)* – Placa de partículas de cimento.

Na figura 5 são visíveis as propriedades da cobertura no objeto BIM, com todas as camadas de materiais e as respetivas espessuras.

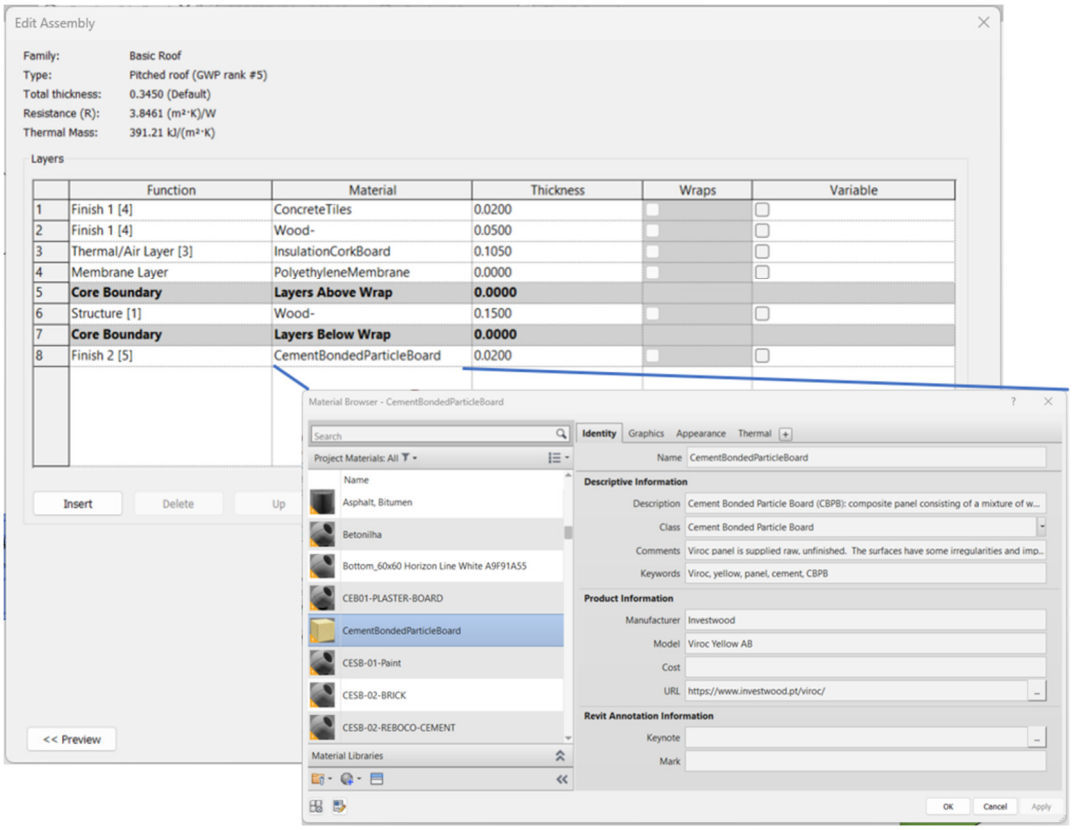


Figura 5 – Propriedades da Cobertura nas camadas que a constituem no objeto BIM.

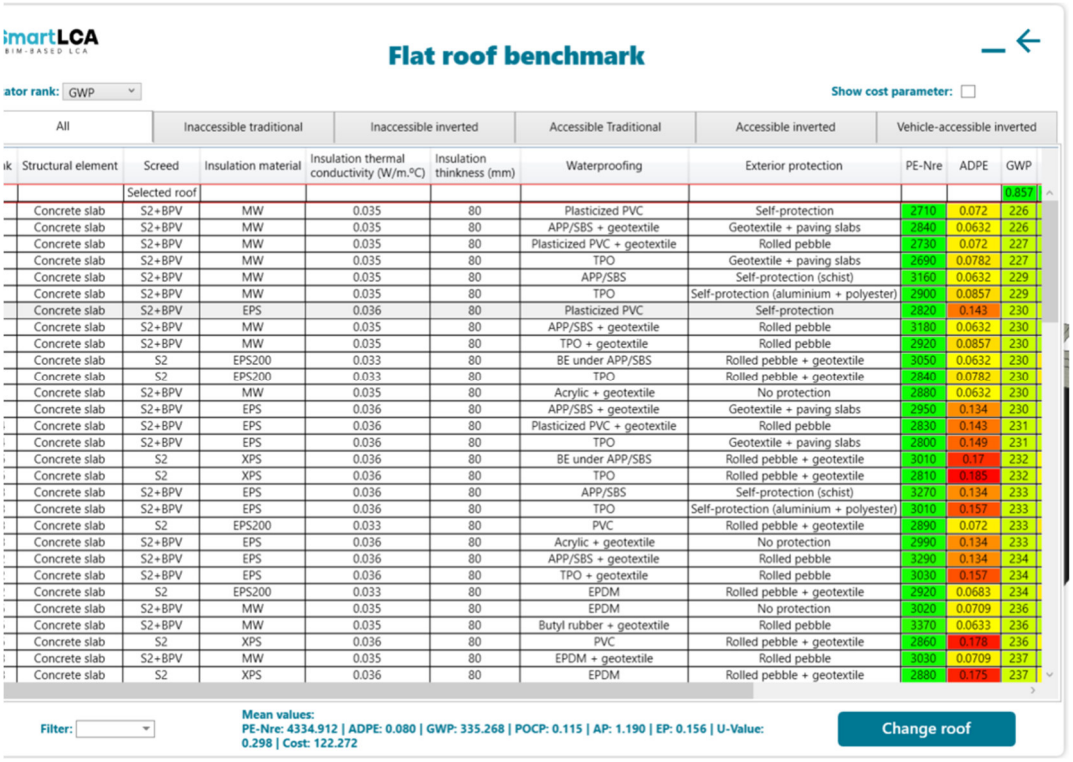
3.2 COBERTURAS PLANAS

No caso das coberturas planas, o plugin deteta automaticamente que a inclinação da cobertura modelada no plugin é mínima - apenas a necessária para o escorrimento das águas pluviais, e, ao clicar "*Element benchmark*" (Figura 1), o plugin abre a janela da Figura 6, com as 60 opções propostas para coberturas planas.

Na Figura 6 é possível ver listadas as 60 soluções de coberturas planas e, nas cinco colunas seguintes e à semelhança do que acontece nas coberturas inclinadas, as mesmas são organizadas por categoria. A primeira categoria consiste nas coberturas não-acessíveis tradicionais, a segunda categoria consiste na categoria não-acessíveis invertidas, a terceira categoria consiste nas coberturas acessíveis tradicionais, a quarta categoria consiste em acessíveis invertidas, e a quinta e última categoria consiste em acessíveis a veículos invertidas.

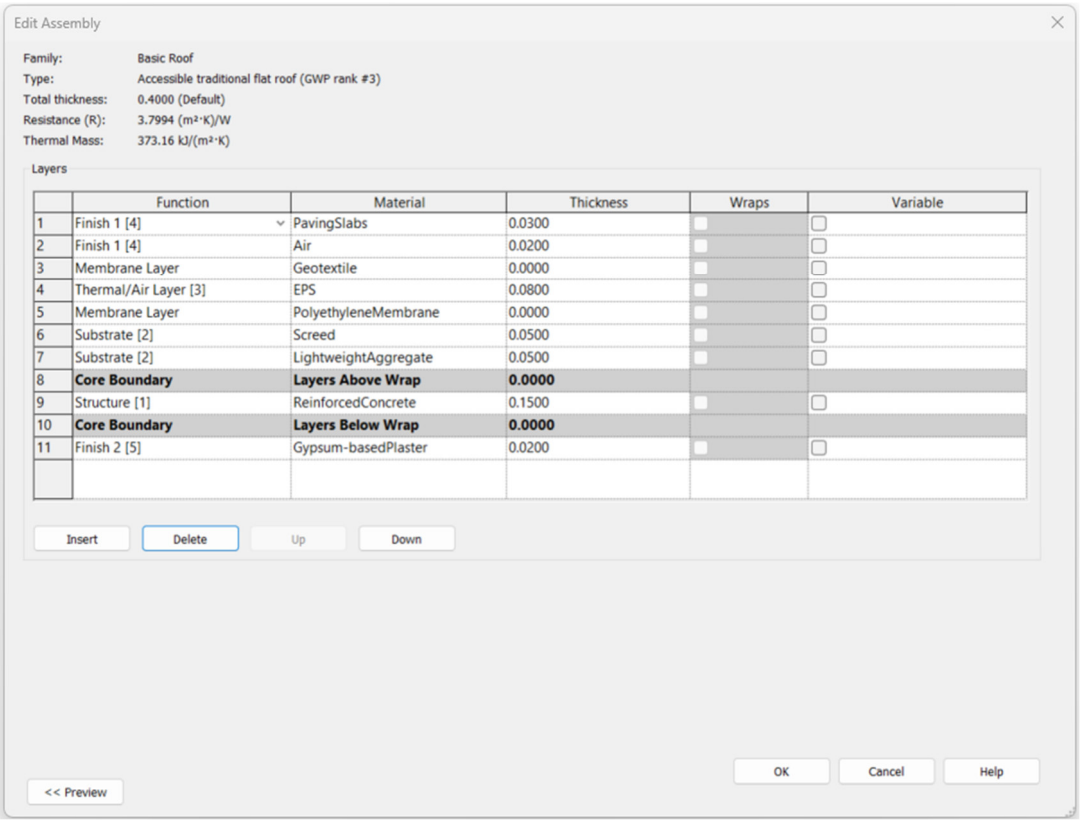
A cobertura plana selecionada pertence à categoria três - acessível tradicional, e a sua solução construtiva foi automaticamente detalhada pelo *plugin* conforme apresentado na Figura 8, onde todas as camadas que a constituem e respetivas espessuras são ilustradas ao pormenor.

Na categoria três - coberturas planas, acessíveis tradicionais, posiciona-se no 3º lugar do *ranking* tendo em conta o indicador ambiental GWP. Na Figura 7 é possível visualizar as propriedades da cobertura substituída no objeto BIM no Revit, incluindo a funcionalidade, o material e a espessura.



Structural element	Screed	Insulation material	Insulation thermal conductivity (W/m.ºC)	Insulation thinkness (mm)	Waterproofing	Exterior protection	PE-Nre	ADPE	GWP
	Selected roof								0.857
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	Plasticized PVC	Self-protection	2710	0.072	226
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	APP/SBS + geotextile	Geotextile + paving slabs	2840	0.0632	226
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	Plasticized PVC + geotextile	Rolled pebble	2730	0.072	227
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	TPO	Geotextile + paving slabs	2690	0.0782	227
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	APP/SBS	Self-protection (schist)	3160	0.0632	229
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	TPO	Self-protection (aluminium + polyester)	2900	0.0857	229
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	Plasticized PVC	Self-protection	2820	0.143	230
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	APP/SBS + geotextile	Rolled pebble	3180	0.0632	230
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	TPO + geotextile	Rolled pebble	2920	0.0857	230
Concrete slab	S2	EPS200	0.033	80	BE under APP/SBS	Rolled pebble + geotextile	3050	0.0632	230
Concrete slab	S2	EPS200	0.033	80	TPO	Rolled pebble + geotextile	2840	0.0782	230
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	Acrylic + geotextile	No protection	2880	0.0632	230
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	APP/SBS + geotextile	Geotextile + paving slabs	2950	0.134	230
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	Plasticized PVC + geotextile	Rolled pebble	2830	0.143	231
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	TPO	Geotextile + paving slabs	2800	0.149	231
Concrete slab	S2	XPS	0.036	80	BE under APP/SBS	Rolled pebble + geotextile	3010	0.17	232
Concrete slab	S2	XPS	0.036	80	TPO	Rolled pebble + geotextile	2810	0.185	232
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	APP/SBS	Self-protection (schist)	3270	0.134	233
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	TPO	Self-protection (aluminium + polyester)	3010	0.157	233
Concrete slab	S2	EPS200	0.033	80	PVC	Rolled pebble + geotextile	2890	0.072	233
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	Acrylic + geotextile	No protection	2990	0.134	233
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	APP/SBS + geotextile	Rolled pebble	3290	0.134	234
Concrete slab	S2+BPV	EPS	0.036	80	TPO + geotextile	Rolled pebble	3030	0.157	234
Concrete slab	S2	EPS200	0.033	80	EPDM	Rolled pebble + geotextile	2920	0.0683	234
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	EPDM	No protection	3020	0.0709	236
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	Butyl rubber + geotextile	Rolled pebble	3370	0.0633	236
Concrete slab	S2	XPS	0.036	80	PVC	Rolled pebble + geotextile	2860	0.178	236
Concrete slab	S2+BPV	MW	0.035	80	EPDM + geotextile	Rolled pebble	3030	0.0709	237
Concrete slab	S2	XPS	0.036	80	EPDM	Rolled pebble + geotextile	2880	0.175	237

Figura 6 – *Benchmark* de coberturas planas.



	Function	Material	Thickness	Wraps	Variable
1	Finish 1 [4]	PavingSlabs	0.0300		
2	Finish 1 [4]	Air	0.0200		
3	Membrane Layer	Geotextile	0.0000		
4	Thermal/Air Layer [3]	EPS	0.0800		
5	Membrane Layer	PolyethyleneMembrane	0.0000		
6	Substrate [2]	Screed	0.0500		
7	Substrate [2]	LightweightAggregate	0.0500		
8	**Core Boundary**	**Layers Above Wrap**	**0.0000**		
9	Structure [1]	ReinforcedConcrete	0.1500		
10	**Core Boundary**	**Layers Below Wrap**	**0.0000**		
11	Finish 2 [5]	Gypsum-basedPlaster	0.0200		

Figura 7 - Propriedades da Cobertura nas camadas que a constituem no objeto BIM, automaticamente substituídas no modelo.

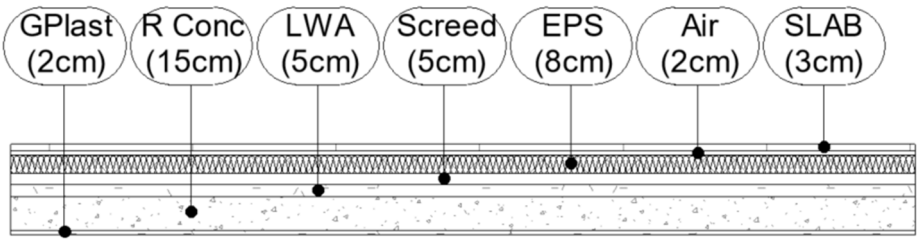


Figura 8 - Detalhe da substituição automática da cobertura plana escolhida no modelo BIM.

Legenda Figura 8: *GPlast (Gypsum based Plasterboard)* – Placas de gesso cartonado, *R Conc (Reinforced Concrete)* – Betão armado, *LWA (Light Weight Aggregate)*- Agregado leve; *Screed* – Betonilha; *EPS* – Poliestireno Expandido; *Air* – Ar; *Slab* – Laje.

3.3 RESULTADOS GLOBAIS PARA AS COBERTURAS INCLINADAS E PLANAS

Após confirmação gráfica do projeto pelos projetistas da cobertura escolhida, ao voltar a abrir o plugin é possível visualizar em tabela os resultados finais quantificados dos impactes ambientais das duas coberturas individualmente e o seu impacte global, correspondente ao somatório dos impactes das duas soluções de cobertura escolhidas (Figura 9).

O *plugin* relaciona e calcula automaticamente os resultados tendo em consideração a quantidade do elemento, material, ou sistema modelado e o seu valor de impacte ambiental (Figuras 3 e 6) por indicador e unidade de medida, seguindo os modelos analíticos explicitados em publicações anteriores (Ferreira *et al*. 2022ab, 2023); a Figura 9 consiste nos resultados finais obtidos para o caso de estudo apresentado, sendo possível visualizar os resultados obtidos conforme apresentado na mesma, exportá-los para um ficheiro Excel, ou visualizar numa tabela dentro do próprio Revit conforme Figura 10 - em gráficos, ou conforme Figura 11 - numa imagem 3D. A Figura 11, tem uma escala gráfica de cores que vão desde o verde para o elemento com menor impacte, ao encarnado para o valor com maior impacte no global de todos os elementos do projeto.

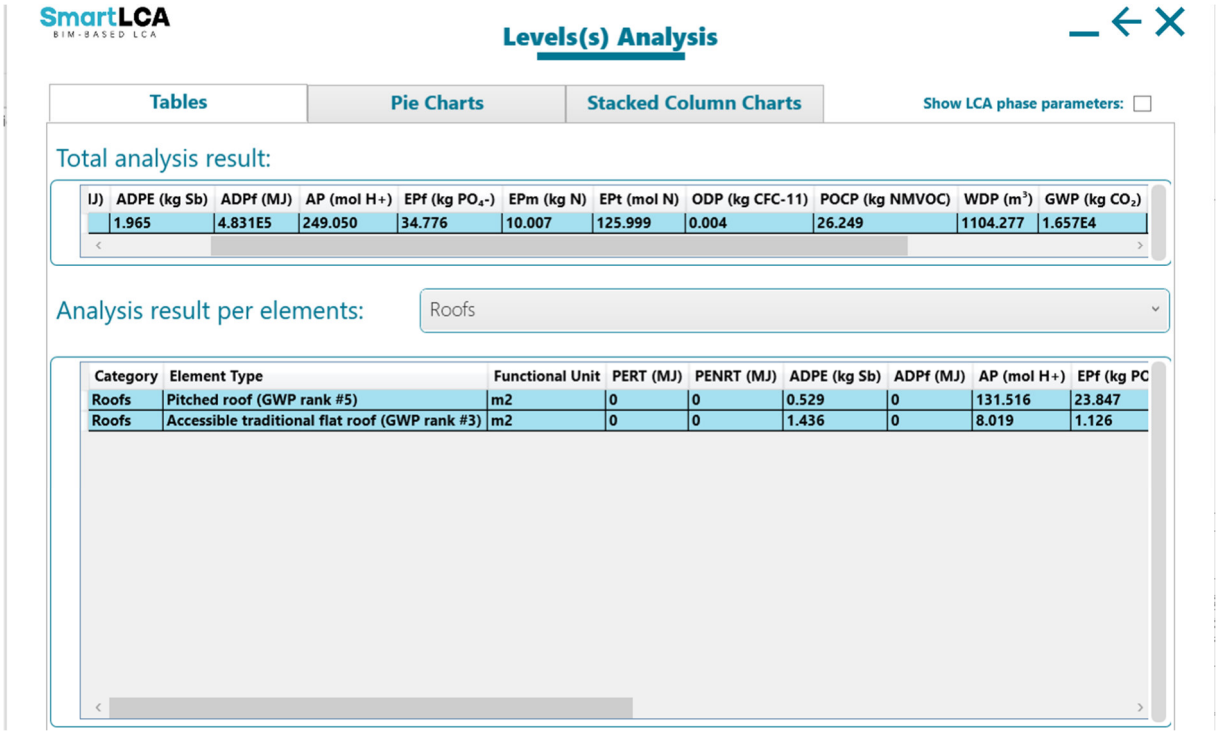


Figura 9 – Resultados da análise das coberturas na ferramenta.

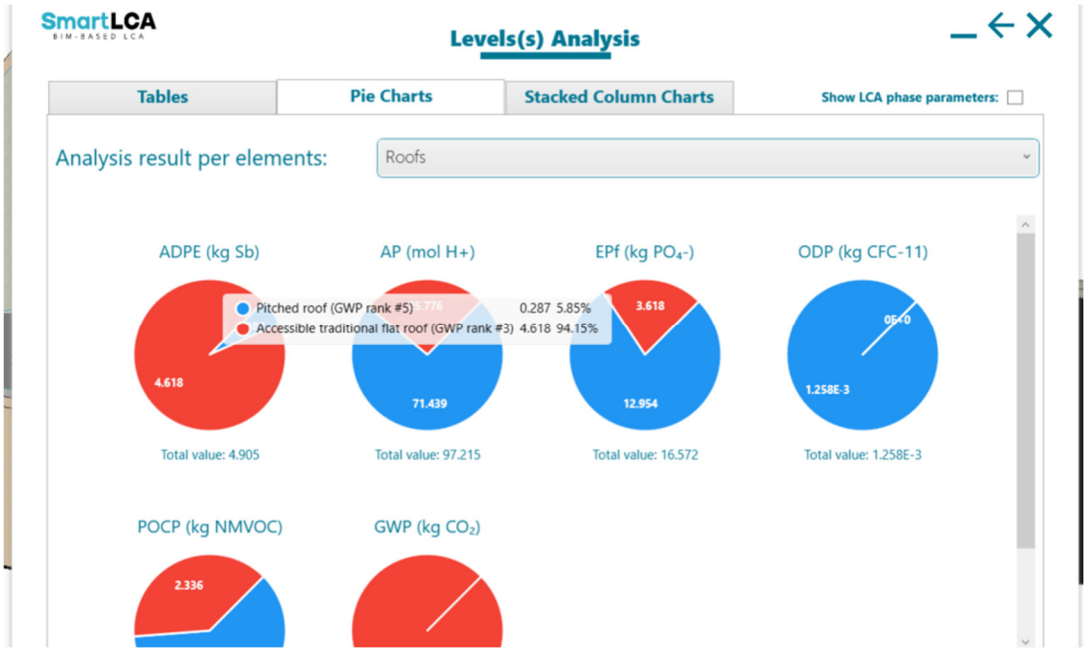


Figura 10 - Resultados da análise das coberturas na ferramenta - *Pie Charts.*

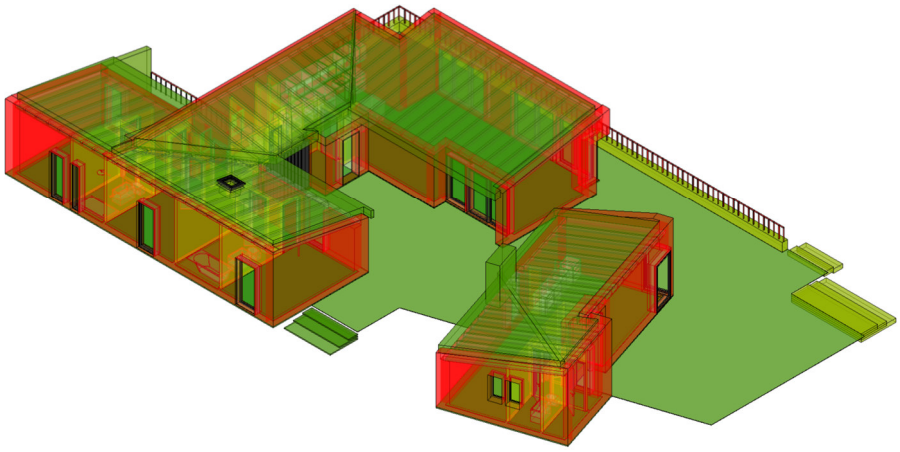


Figura 11 - Resultados da análise das coberturas na ferramenta – Visualização 3D.

4 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em conclusão, a ferramenta BIM para a ACV agiliza esta análise dos projetos com a sua automação de cálculos, acesso a bases de dados, e substituição automática de objetos BIM. Torna assim o processo de ACV muito mais rápido, embora rigorosamente medido. A facilidade no acesso aos dados dos impactes dos materiais com um sistema de *benchmark* faz com que possa ser utilizado pelos projetistas, ou outros intervenientes do setor da construção, logo nas fases preliminares do projeto para obter resultados mais tarde na fase de construção e utilização. Funciona assim como ferramenta de apoio à decisão e contribui ativamente para a mitigação das alterações climáticas e redução dos gases com efeito de estufa do setor da construção.

Para desenvolvimentos futuros , deve estender-se a investigação para outros elementos do projeto de edifícios como pavimentos, portas, janelas e estruturas, para que se possa ter um resultado global de todo o edificado. Para os autores é importante que, tal como a base de dados das coberturas, os dados relativos aos restantes elementos já tenham sido validados pela comunidade científica antes de serem integrados no plugin.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio a este trabalho ao *Civil Engineering Research and Inovation* (CERIS), Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) referência UI/BD/153398/2022. Os autores agradecem o apoio da FCT através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

Os autores gostariam ainda de expressar o seu agradecimento ao Atelier dos Remédios na pessoa do Professor Francisco Teixeira Bastos por providenciar o caso de estudo.

REFERÊNCIAS

Durão, V. (2022). Communication of environmental life cycle assessment results - Application to materials for pitched roofs. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

European Commission (2019). Communication from the European Commission: The European Green Deal. COM 640. Brussels, Belgium.

European Commission (2020). Communication 662 - A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives. Off. J. Eur. Unionfficial J. Eur. Union, p. 26.

European Commission (2021a). Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. Eur. Comm., vol. 6, no. 11, pp. 951–952.

European Commission (2021b). Level(s): Putting circularity into practice. no. 1.

EN15804:2012+A2:2019, Sustainability of construction works – Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.

Ferreira, M. T., Costa A. A, Silvestre, J. (2022a). Integração de metodologias de avaliação do ciclo de vida em ferramentas BIM. 4o Congr. Port. Build. Inf. Model. vol. 1 - ptBIM, pp. 546–557, doi: 10.21814/uminho.ed.32.46.

Ferreira, M. T., Costa A. A, Silvestre, J. (2022b). Integrated Sustainability Assessment Using Bim. Acta Polytech. CTU Proc., vol. 38, pp. 116–123. doi: 10.14311/APP.2022.38.0116.

Ferreira, M. T., Costa A. A., Silvestre, J., Brattebø H., Bohne R. A. (2023). Integrating Level (s) LCA in BIM : A tool for estimating life cycle environmental and cost impacts in design for a case study house. ECPPM 2022 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction 2022.

Gomes, R. (2019). Avaliação do ciclo de vida "Do Berço ao Berço" de soluções construtivas em edifícios: aplicação às coberturas planas. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

TÉCNICAS DE IA PARA IMPLEMENTAR PROCESSOS DE SIMULAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS

Gonçalo Araújo[ab]; Maria da Glória Gomes[a]; Ricardo Gomes[b]; Paulo Ferrão[b]; Manuel Correia Guedes[c]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ceris@tecnico.ulisboa.pt

[b]IN+, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, in3@tecnico.ulisboa.pt

[c]CiTUA, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, citua@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Técnicas de Inteligência Artificial podem ajudar a acelerar, unificar e facilitar o uso de ferramentas de simulação do desempenho de edifícios. Este estudo apresenta duas implementações de um modelo de IA desenvolvido com base em milhares de simulações do consumo energético de edifícios tipo da cidade de Lisboa. Estas duas implementações procuram resolver um problema de otimização para a minimização do consumo energético de um futuro edifício na cidade. Na primeira, o problema é resolvido exaustivamente, demonstrando tempos de computação até 100x mais rápidos que uma simulação, e estabelecendo heurísticas para o design e construção de um edifício com base nas variáveis suportadas pelo modelo. Na segunda, a implementação do modelo é feita numa aplicação web onde o utilizador pode definir as variáveis e os seus domínios para a otimização. O processo demonstra-se mais fácil e rápido do que utilizando ferramentas de simulação para obter os mesmos resultados. Ao estender esta abordagem ao desempenho lumínico, estrutural, entre outros, consegue-se uma representação holística do desempenho do edifício com uma menor complexidade e maior rapidez.

Palavras-chave: Simulação, Otimização, Inteligência Artificial, Energia nos edifícios

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas de Modelação Energética em Edifícios (MEE) trazem enormes benefícios às práticas do design e construção de projetos do parque edificado (Ferrando et al. 2020; Hensen and Lamberts 2019; Reinhart and Cerezo Davila 2016). Uma destas vantagens é a possibilidade de reproduzirem o ambiente construído ao nível do seu desempenho energético, térmico, estrutural, acústico, entre outros. No entanto, estas ferramentas MEE apresentam também barreiras que prejudicam a sua aplicação e utilização (Crawley et al. 2008; Hopfe and Hensen 2011; Nguyen, Reiter, and Rigo 2014). Uma dessas barreiras é a descrição apropriada do sistema a simular, que acaba por prejudicar a acessibilidade destas ferramentas. Em particular, é necessário um conhecimento prévio dos inputs a utilizar, assim como da metodologia de tratamento e análise dos resultados obtidos na simulação (Hopfe and Hensen 2011). Muitas vezes, descrever estes inputs é laborioso e requer formação especifica, e uma errada interpretação dos resultados pode comprometer futuras soluções. Outro desafio relaciona-se com a portabilidade destas ferramentas. De facto, são necessárias múltiplas ferramentas para simular aspetos holísticos da performance de um edifício. Como tal, é necessário um amplo e diverso conhecimento dos inputs e outputs de diferentes campos da MEE (Araújo et al. 2021; Reinhart and Cerezo Davila 2016). Finalmente, outra barreira à utilização de simulações, particularmente em processos de otimização iterativos, é o tempo computacional consumido. Este pode variar entre segundos e dias, desde geração de imagens à aplicação de expressões numéricas complexas (Aguiar, Cardoso, and Leitão 2017; Pereira and Leitão 2020).

De acordo com Chen et al., (2017), a utilização de MEE para análises e otimizações iterativas continua a ser um processo difícil, suscetível a erros, exaustivo e demorado. Para ultrapassar estas barreiras, a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (IA) tem emergido para desenvolver modelos capazes de prever os resultados destas simulações (Alizadeh, Allen, and Mistree 2020; Araujo et al. 2022; Wortmann et al. 2015). Estes modelos comparados com processos baseados em MEE acabam por ser mais rápidos na previsão dos resultados, e reduzem o número de inputs e informação necessária à sua utilização. Além disso, a sua fácil integração promove a portabilidade entre diversos modelos de IA referentes a diferentes ferramentas de MEE.

É possível treinar um modelo de IA utilizando uma Base de Dados de Edifícios (BDE) Sintética gerada e simulada através de processos algorítmicos. O presente estudo incide sobre um modelo capaz de prever os resultados das simulações energéticas dentro do conjunto de parâmetros que fazem variar a descrição do edifício. Este modelo foi desenvolvido por Araujo et al., (2022) e foi aplicado a uma otimização da reabilitação de 20 edifícios em Lisboa, Portugal. O modelo de IA desenvolvido é capaz de prever o consumo energético calculado por uma simulação do EnergyPlus (Drury et al. 2000) para um edifício em Lisboa, com um número reduzido de inputs. Esses inputs descrevem o edifício em relação à sua geometria e materialidade, com base em arquétipos por período de construção do edifício. Os resultados deste estudo demonstram eficácia aceitável e tempos de execução até 100x mais rápidos do que operações baseadas em MEE.

O presente estudo expande o trabalho desenvolvido em Araujo et al., (2022) com o objetivo de demonstrar como a utilização destes modelos de IA podem desconstruir as barreiras de portabilidade e acessibilidade associadas a MEE não só à escala urbana mas também à escala do edifício. Em particular, implementa-se o modelo desenvolvido por Araujo et al., (2022) ao contexto do design sustentável de um edifício. Para isso, é desenvolvido um problema de otimização que procura

minimizar o consumo energético de um edifício em Lisboa de acordo com as variáveis e domínios selecionados e disponíveis neste modelo.

2 DADOS E MÉTODOS

A metodologia de investigação aplicada no presente estudo pode ser descrita em 4 secções sequenciais. A descrição do Problema, o desenvolvimento da BDE, o tipo de modelo desenvolvido e a sua eficácia, e a implementação do modelo com o problema de otimização descrito.

Na primeira secção, o problema de otimização adotado neste estudo é descrito de acordo com as variáveis consideradas para o problema, e os objetivos. A segunda secção descreve a BDE desenvolvida por Araujo et al., (2022), de acordo com os seus domínios e inputs. A terceira secção descreve o modelo escolhido para as implementações neste estudo e a sua eficácia a prever os resultados da simulação de edifícios. Finalmente, a última secção aborda as duas implementações do modelo de IA selecionado.

A primeira implementação visa resolver o problema exaustivamente, extrapolando heurísticas de design. A segunda numa aplicação web que permite a um utilizador resolver o problema de otimização descrito, selecionar as variáveis desejadas, e estabelecer os seus limites.

2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema de otimização proposto no presente estudo procura minimizar o resultado simulado de consumo energético *E* de um edifício em Lisboa. As variáveis necessárias para o modelo fazer esta previsão são: o número de pisos do edifício *n*, a proporção retangular do edifício *p*, orientação θ, o rácio de envidraçado/área opaca *g*, a área de implantação do edifício *a*, e a época construtiva *e*. Como tal, o resultado de *E* [kWh m^{-2}] de um edifício pode ser descrito pela equação (1):

$$f(n, p, \theta, g, a, e) = E \tag{1}$$

Com base nesta função que se pretende minimizar, pode então definir-se o problema de otimização através do objetivo *O*, representado pela seguinte equação (2):

$$O = min\big(f(n, p, \theta, g, a, e)\big) \tag{2}$$

Para resolver este problema de otimização foi utilizado o Algoritmo Genético (AG) (Bäck and Schwefel 1993), que testa um número de iterações *i* ao longo de um número de populações definidos pelo utilizador.

2.2 BASE DE DADOS DE EDIFÍCIOS

A BDE utilizada para treinar o modelo de IA aplicado neste estudo foi desenvolvida por Araujo et al., (2022), e consiste no resultado *E* de combinações diferentes dos parâmetros da função *f*. Como tal, a BDE pode ser ilustrada pela equação (3) que representa a variação de *f* para um número *j* de combinações dos seguintes parâmetros:

$$f\left(\begin{bmatrix} n & \cdots & e \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_j & \cdots & e_j \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} E \\ \vdots \\ E_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$n \in [1 \ldots 11],\ p \in [1 \ldots 5],\ \theta \in [0 \ldots \pi],\ g \in [0.1 \ldots 0.7],\ a \in [50 \ldots 800]\ [m^2],\ e \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

Em particular, o parâmetro *e* é descrito por arquétipos, ou seja, soluções construtivas tipicamente usados nas seguintes épocas construtivas:

1. <1919
2. 1919-1945
3. 1946-1960
4. 1961-1970
5. 1971-1980
6. 1981-1990
7. 1991-1995
8. 1996-2000
9. 2001-2005
10. >2006

Refira-se que no presente estudo, de forma a não comprometer o tempo computacional das simulações optou-se por fixar os valores de coeficiente de transmissão térmica (U) dos envidraçados, pavimentos e coberturas e apenas variar os valores de U das paredes de acordo com (Santos and Matias 2006). Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em Araujo et al (2022), onde podem ser consultados os parâmetros de definição de simulação como ganhos internos, ventilação, entre outros. Estes são definidos seguindo uma tipologia residencial, através de uma providenciada pelo software Ladybug tools (Roudsari and Pak 2013) que permite adaptar estes valores ao tamanho e dimensão da residência.

Para gerar um número de soluções *j* capaz de representar uniformemente os domínios definidos na ilustração matricial da BDE na equação (3), o estudo em questão representou uniformemente os domínios dos parâmetros respetivos. Assim, o parâmetro *n* varia entre 2 e 11 pisos, em intervalos de 3 pisos; a proporção retangular entre 1 (quadrado) e 5 em intervalos de 2; Orientação entre 0º e 180º com intervalos de 45º; rácio de envidraçado entre 0.1 e 0.7, com intervalos de 0.35; e áreas entre 50 e 800 m^2 em intervalos de 50 m^2. Todas as combinações possíveis entre estes valores, para cada época construtiva, totalizam ≈64,000 edifícios simulados, que estão presentes nesta BDE.

2.3 TIPO DE MODELO

A previsão do consumo energético *E* [kW h m^{-2}] de um edifício é representado como um problema de regressão. Com esta base de dados treina-se um modelo de regressão Extra Trees (ET) disponível na biblioteca Scikit-Learn para Python (Pedregosa et al. 2019). De acordo com Araujo et al., (2022) este modelo demonstrou obter os melhores resultados de eficácia entre os vários testados, com erros médios de -2.21 [kW h m^{-2}] e um coeficiente de determinação R^2 de 0.95. De acordo com os seus resultados, com um erro médio negativo, este modelo sobrestima ligeiramente o valor do resultado da simulação, mas demonstra também ter uma eficácia aceitável para resolver o problema de otimização proposto.

2.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Este modelo é implementado de maneira a cumprir dois objetivos de investigação diferentes. O primeiro objetivo procura desconstruir barreiras de portabilidade, demonstrando como se podem obter heurísticas de design através da análise de largos espectros de valores para os parâmetros geométricos de um edifício sem recorrer a MEE. Como tal, a primeira implementação do modelo de IA desenvolvido procura resolver o problema de otimização descrito na equação que representa o objetivo *O* e que tem como domínio de parâmetros os domínios contidos na BDE utilizada.

O segundo objetivo de investigação procura desconstruir barreiras de acessibilidade a estes processos, facilitando o seu uso, e a sua interpretação. Assim, a segunda implementação do modelo é feita através de uma aplicação web, que permite aos utilizadores estabelecerem os parâmetros de design que procuram otimizar, assim como estabelecer os seus próprios domínios de variáveis de otimização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados e ilustrados em duas implementações do modelo de IA desenvolvido. De acordo com os dois objetivos de implementação, o problema de otimização *O* é resolvido para os domínios das variáveis da BDE, e para domínios e variáveis específicas definidas pelo utilizador. Deste modo, os resultados são demonstrados em duas secções. Na primeira secção, procura-se demonstrar heurísticas de design que se podem obter para um edifício em Lisboa, através dos resultados do primeiro objetivo de investigação. Na segunda, demonstra-se a acessibilidade e facilidade de geração de resultados para variáveis e os seus domínios definidos pelo utilizador.

3.1 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Para o problema de otimização com os domínios da BDE, foram efetuadas 5,000 iterações com o AG. A Figura 1 ilustra os resultados do consumo energético de todas as soluções testadas em função dos parâmetros de design *n, p,* θ, *a, e g, e* de acordo com a sua época de construção. Estas soluções demonstram mínimos de ≈25 e máximos de ≈128 [kWh m^{-2}]. A melhor solução obtida corresponde ao período de construção 3. No entanto esta construção é altamente condicionada pela sua baixa proporção retangular e rácio de envidraçado, assim como pela sua área máxima de 800 m2. Algumas heurísticas que se podem extrapolar dos resultados são que a solução com melhor consumo energético contém menores valores de proporção retangular, assemelhando-se a um quadrado como forma de implantação. Adicionalmente, melhores consumos são também verificados para áreas maiores, orientações ótimas de fachadas a 0º (Nascente) ou 180º (Poente), e menores rácios de envidraçado. Finalmente, as construções que possuem isolamento de paredes como a 6 ou 7 demonstram maior versatilidade dos seus parâmetros de design na obtenção de resultados ótimos.

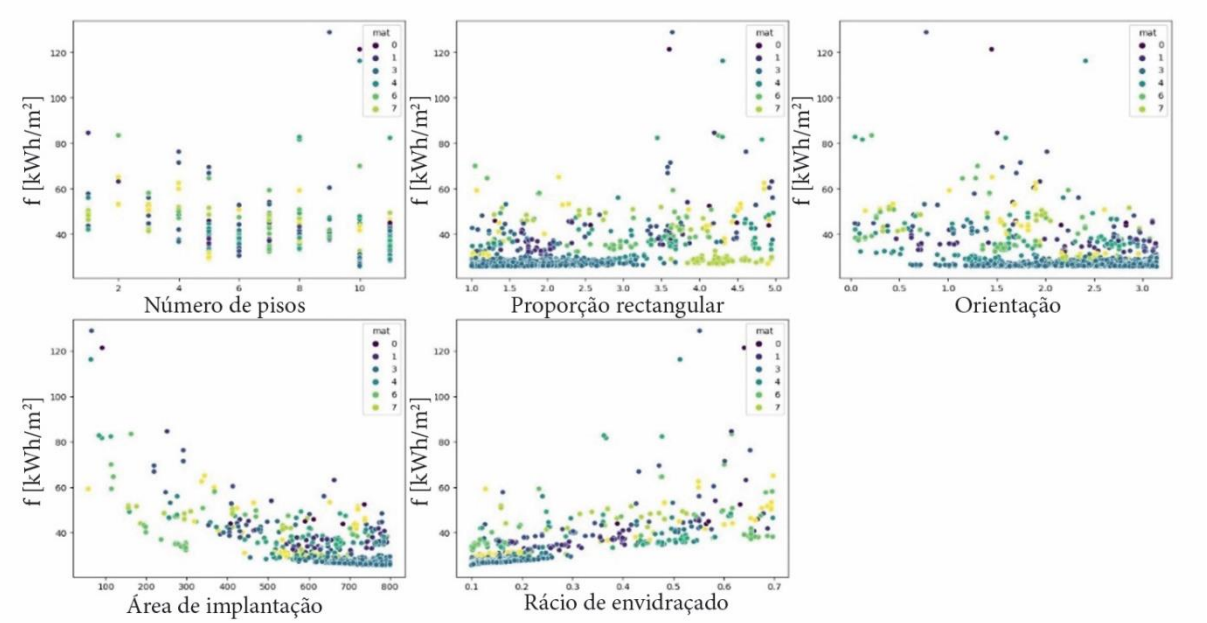


Figura 1 - Resultados do consumo energético para as 5000 iterações testadas com o algoritmo genético. Categorizado por períodos construtivos.

3.2 INTERFACE E APLICAÇÃO

O modelo de IA desenvolvido foi também implementado numa aplicação web[1] usando o pacote Streamlit para Python. A interface desenvolvida permite ao utilizador definir as variáveis que quer otimizar e manter constantes dentro, das variáveis da função *f* representada pela Equação (1), assim como os seus limites. Depois, pode-se selecionar o número de iterações desejado e o número de soluções ótimas que se quer obter (um maior número de iterações representa maiores tempos computacionais).

Na Figura 2 podem-se observar excertos dos inputs selecionados na aplicação, como a seleção dos parâmetros *n, p,* θ, e *a.* Assim que estas variáveis são escolhidas, o utilizador pode definir os valores constantes para as variáveis restantes, necessárias para a previsão do consumo energético, assim como definir os limites máximos e mínimos das variáveis de otimização. Depois da definição do problema de otimização, o utilizador pode então selecionar o número de iterações desejado e o número de soluções ótimas que são retornadas. Estas soluções podem ser visualizadas num gráfico na aplicação, ou pode ser feito o seu download em formato apropriado.

[1] https://goncalo-araujo-energy-plus-sim-app-app-energyplus-y83a4z.streamlit.app/

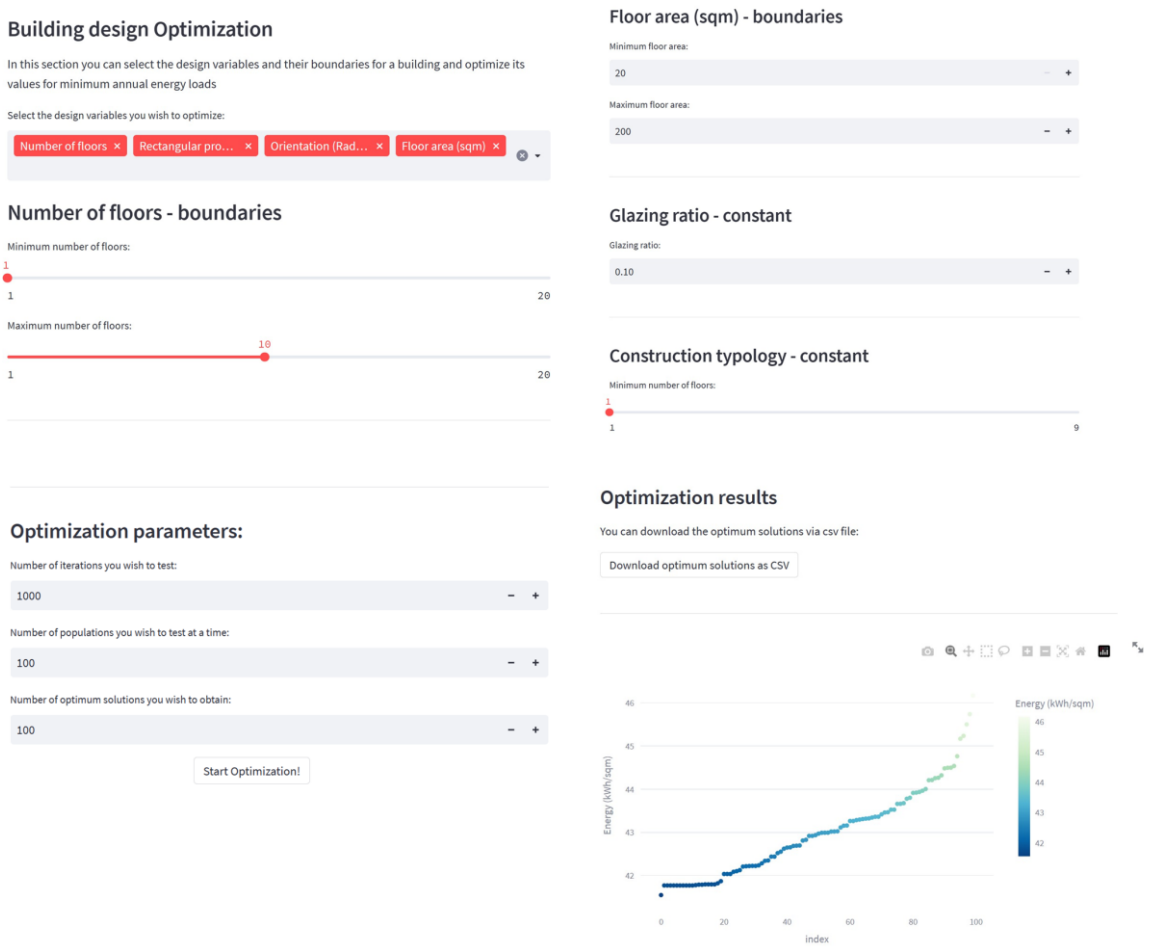


Figura 2 - Interface da aplicação web com o modelo IA desenvolvido implementado

3.3 DISCUSSÃO

O uso de ferramentas de MEE traz enormes benefícios para o planeamento do parque edificado, e para o design de edifícios. No entanto o uso destas ferramentas e implementação destas análises encontram barreiras à sua execução. Assim, e de acordo com a literatura, existem três principais barreiras à implementação destas análises e otimizações: barreiras computacionais, barreiras de portabilidade, e barreiras de acessibilidade. Dentro das barreiras computacionais, as simulações com recurso a ferramentas MEE podem ser demoradas e dispendiosas a nível energético. As barreiras de portabilidade surgem devido às diversas ferramentas existentes para simular diferentes aspetos do desempenho de edifícios. Como cada ferramenta apresenta diferentes formatos, modelos, e parâmetros, não existe transversalidade entre ferramentas. Finalmente, estas ferramentas não são geralmente acessíveis, exigindo descrições técnicas e laboriosas dos modelos antes de se obter resultados de confiança.

Para desconstruir estas barreiras, um modelo de IA capaz de prever o resultado de simulações energéticas de um edifício em Lisboa foi desenvolvido por Araujo et al. (2022). Este modelo usou uma base de dados sintética, gerada através de simulações automatizadas de milhares de arquétipos de

edifícios presentes em Lisboa, Portugal. No presente estudo, este modelo foi implementado num processo de otimização da reabilitação de um quarteirão com 21 edifícios com o objetivo de demonstrar o papel destes modelos em resolver problemas computacionais, obtendo tempos de simulação até 100x mais rápidos e obtendo altos níveis de eficácia na previsão de resultados de simulação.

O presente estudo apresenta novas implementações deste modelo de IA desenvolvido por Araujo et al. (2022), com o objetivo de demonstrar como se podem ultrapassar barreiras de portabilidade e acessibilidade à execução de análises e otimizações do desempenho de edifícios. Como tal, implementa-se o modelo num novo problema de otimização para encontrar a solução de design que minimiza o consumo energético de um edifício. Duas implementações são demonstradas para o mesmo problema que variam nos seus domínios de variáveis. Na primeira, o modelo é implementado diretamente para resolver a otimização com os domínios da base de dados usada para treinar o modelo de IA. Na segunda, o modelo é implementado numa aplicação web que permite ao utilizador estabelecer variáveis de otimização e os seus domínios, assim como definir o número de iterações desejadas e o número de soluções ótimas.

Na primeira implementação, foi possível estabelecer heurísticas de design e soluções construtivas para menores consumos energéticos. Na segunda, torna-se o processo acessível a qualquer utilizador, sem ser necessário o uso de qualquer ferramenta. Em ambos os casos, a experiência reduzida e o pequeno número de parâmetros necessários tornam estes processos mais acessíveis e transversais.

No entanto, este estudo apresenta algumas limitações, particularmente em relação ao desenvolvimento do modelo de IA e da base de dados utilizada para treinar o modelo. Consideram-se as soluções construtivas dos arquétipos por épocas de construção pouco flexíveis, limitando a escolha de materiais de construção para a simulação. Pode-se resolver este problema adicionando variáveis para diversas soluções construtivas de paredes, coberturas, pavimentos, janelas, entre outros. Outro problema prende-se ao facto de que as simulações efetuadas para gerar a base de dados não terem em conta sombreamentos e geometrias de contexto, assim como outros parâmetros mais detalhados, o que pode prejudicar a eficácia dos resultados de otimização. Pode-se ultrapassar este problema gerando rácios de sombreamento por orientação solar e fachada à simulação dos arquétipos.

Todos os problemas aparentam ser solucionáveis com a adição de variáveis discretas como materiais, sombreamento, entre outros. No entanto, um problema maior ocorre quando se torna necessário simular um número total de combinações suficientemente representativo do espaço de solução destas variáveis. Que obtém um crescimento exponencial de combinações possíveis a cada variável discreta que se adiciona. Para resolver esta problemática, podem-se explorar técnicas de tratamento e engenharia de dados para se minimizar o número de amostras necessárias de uma base de dados e assim conseguir aumentar o número de variáveis discretas. Por exemplo, pode ser explorada a geração de uma amostra com distribuição normal das variáveis, com um limite máximo aceitável face ao tempo da simulação total da amostra.

4 CONCLUSÕES

As ferramentas de simulação do desempenho de edifícios trazem benefícios à sua planificação e alterações. Estas ferramentas permitem obter informações quantitativas em relação ao desempenho de edificios em aspetos como consumo energético, estrutural, conforto térmico, Iluminação, acústica,

entre outros. No entanto, estas ferramentas apresentam barreiras à sua implementação em larga escala, ou em análises ou otimizações que envolvam múltiplas iterações. Isto acontece porque estas simulações: (1) são demoradas e computacionalmente exigentes; (2) Não são transversais (são necessárias diferentes ferramentas e modelos para diferentes análises); (3) Exigem níveis significativos de experiência técnica e conhecimento.

Ultrapassar estas barreiras pode ser conseguido com o auxílio de modelos de IA treinados para prever indicadores de desempenho de edifícios, com uma menor complexidade problemática. Neste âmbito, este estudo implementa um modelo de Inteligência Artificial num problema de otimização do consumo energético de um edifício. Este modelo foi desenvolvido com recurso a uma base de dados de edifícios sintética, gerada através de uma ferramenta de simulação energética onde se simularam milhares de arquétipos de edifícios representativos da cidade de Lisboa, Portugal. Finalmente, o modelo desenvolvido com a base de dados e implementado com duas abordagens diferentes.

Na primeira, procura-se encontrar o edifício com menor consumo energético dentro dos domínios da base de dados usada para treinar o modelo. Nesta implementação é demonstrada a rapidez do modelo em obter resultados e estabelecer heurísticas de design locais, sendo até 100x mais rápido a prever resultados do que um processo de simulação. Na segunda abordagem, demonstra-se o nível de dificuldade e transversalidade do uso deste tipo de modelos, desenvolvendo-se uma aplicação web onde o utilizador pode usar o modelo desenvolvido para prever o consumo energético de um edifício, e também estabelecer processos de otimização com variáveis especificadas, assim como os seus respetivos domínios. O número de inputs e conhecimento técnico necessários para o uso desta aplicação é consideravelmente menor quando comparado com o uso de ferramentas de simulação energética.

Estes processos podem efetivamente solucionar as problemáticas associadas com análise e otimização do desempenho de edifícios. No entanto, para se atingirem esses objetivos será necessária uma colaboração da comunidade científica e política para convergir em abordagens unificadas do desenvolvimento e uso destes modelos. Isso permitiria obter representações holísticas do desempenho de edificios de forma fácil e rápida, e por sua vez, catalisar políticas de desenvolvimento. Para isso, como trabalho futuro sugere-se o estabelecimento de uma estrutura para o desenvolvimento destes modelos em relação a: bases de dados, tipo de modelo, calibração e afinação, e implementação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido como parte do Projeto BE.Neutral – Agenda de Mobilidade para a neutralidade carbónica nas cidades, contrato número 35, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) através da União Europeia no âmbito do Next Generation EU. OS autorES agradeceM o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020); UIDB/50009/2020 DA UNIDADE DE INVESTIGAÇÃO IST-ID. Esta pesquisa foi apoiada por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com a bolsa de doutoramento ao abrigo do contrato FCT 2021.04849.BD.

REFERÊNCIAS

Aguiar, Rita, Carmo Cardoso, and António Leitão. 2017. "Algorithmic Design and Analysis Fusing Disciplines." *Disciplines and Disruption - Proceedings Catalog of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2017*: 28–37.

Alizadeh, Reza, Janet K. Allen, and Farrokh Mistree. 2020. "Managing Computational Complexity Using Surrogate Models: A Critical Review." *Research in Engineering Design* 31(3): 275–98. https://doi.org/10.1007/s00163-020-00336-7.

Araújo, Gonçalo, Inês Pereira, António Leitão, and Manuel Correia Guedes. 2021. "Conflicts in Passive Building Performance: Retrofit and Regulation of Informal Neighbourhoods." *Frontiers of Architectural Research* 10(3): 625–38.

Araujo, Gonçalo, Luis Santos, António Leitão, and Ricardo Gomes. 2022. "Ad Based Surrogate Models for Simulation and Optimization of Large Urban Areas." In *27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2022)*, Sidney, 689–98.

Bäck, Thomas, and Hans-Paul Schwefel. 1993. "An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization." *Evolutionary Computation* 1(1): 1–23.

Chen, Yixing, Tianzhen Hong, and Mary Ann Piette. 2017. "Automatic Generation and Simulation of Urban Building Energy Models Based on City Datasets for City-Scale Building Retrofit Analysis." *Applied Energy* 205(April): 323–35. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.128.

Crawley, Drury B., Jon W. Hand, Michaël Kummert, and Brent T. Griffith. 2008. "Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs." *Building and Environment* 43(4): 661–73.

Drury, B, O Curtis, K Linda, and C Frederick. 2000. "EnergyPlus : Energy Simulation Program." *ASHRAE Journal* 42(April): 49–56.

Ferrando, Martina, Francesco Causone, Tianzhen Hong, and Yixing Chen. 2020. "Urban Building Energy Modeling (UBEM) Tools: A State-of-the-Art Review of Bottom-up Physics-Based Approaches." *Sustainable Cities and Society* 62: 102408.

Hensen, Jan LM, and Roberto Lamberts, eds. 2019. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2nd ed. Routledge.

Hopfe, Christina J., and Jan L.M. Hensen. 2011. "Uncertainty Analysis in Building Performance Simulation for Design Support." *Energy and Buildings* 43(10): 2798–2805. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.034.

Nguyen, Anh-tuan, Sigrid Reiter, and Philippe Rigo. 2014. "A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis." *APPLIED ENERGY* 113: 1043–58. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061.

Pedregosa, Fabian et al. 2019. "Scikit-Learn: Machine Learning in Python." *Journal of machine Learning research* 12: 2825–30.

Pereira, Inês, and António Leitão. 2020. "More Is More: The No Free Lunch Theorem in Architecture." *Proceedings of the International Conference of Architectural Science Association* 2020-

Novem(November 2020): 765–74.

Reinhart, Christoph F., and Carlos Cerezo Davila. 2016. "Urban Building Energy Modeling - A Review of a Nascent Field." *Building and Environment* 97: 196–202. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001.

Roudsari, Mostapha Sadeghipour, and Michelle Pak. 2013. "LADYBUG : A PARAMETRIC ENVIRONMENTAL PLUGIN FOR GRASSHOPPER TO HELP DESIGNERS CREATE AN ENVIRONMENTALLY-CONSCIOUS DESIGN." In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, , 3128–35.

Santos, Pina dos, and Luís Matias. 2006. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Da Envolvente Dos Edifícios*.

Wortmann, Thomas, Alberto Costa, Giacomo Nannicini, and Thomas Schroepfer. 2015. "Advantages of Surrogate Models for Architectural Design Optimization." *Arti cial Intelligence for Engineering Design , Analysis and and Manufacturing* 29(4): 471–81.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

Transição e Futuro dos Sistemas de Certificação de Edifícios: da Eficiência Energética à Sustentabilidade Holística Integrada

Maria Catarina Santos [a]; Pedro Lima Gaspar [b]

[a] (A400 Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda | Portugal), maria.santos@a400.pt

[b] (Faculdade de Arquitectura, Universidade de Lisboa, Rua Prof. Sá Nogueira, 1349-055, Lisboa), plgaspar@fa.ulisboa.pt

RESUMO

Os edifícios são um sector chave para responder aos desafios globais da insustentabilidade: consumo de recursos (de matéria e energia), exacerbados pelo crescimento populacional e os respectivos custos ambientais, económicos e sociais. Este reconhecimento não é linear e tem-se transformado – evoluído – ao longo do tempo, tendo eco nos sistemas de certificação das edificações na Europa, orientados por critérios globais e nacionais, que procuram em geral mitigar a pegada da construção, enfatizando de forma crescente materiais eficientes, práticas construtivas sustentáveis e ambientes internos saudáveis.

Neste contexto, este artigo aborda e descreve a evolução dos processos de certificação de edifícios, evidenciando a transição das práticas iniciais, focadas sobretudo em eficiência energética e conforto ambiental, para as metodologias com uma abordagem crescentemente holística, que incorporam gestão de materiais, água e resíduos. Nos métodos mais recentes verifica-se a inclusão progressiva de aspectos sociais e de bem-estar humano, reflectindo uma compreensão alargada de sustentabilidade na construção civil.

O estudo propõe um mapeamento meticuloso da importância de cada categoria de certificação ao longo do tempo, destacando tendências emergentes e a crescente consciencialização sobre novos desafios do sector. Esta análise temporal projecta não apenas a evolução futura dos processos de certificação, mas também esboça um futuro inovador no campo, visando uma integração ainda mais completa dos aspectos ambientais, sociais e económicos na certificação de edifícios, apontando para uma nova era de avaliações mais inclusivas e adaptativas, alinhadas com as necessidades emergentes de sustentabilidade global.

Palavras-chave: Sustentabilidade na construção, Gestão de Recursos, Certificação Sustentáveis, Metodologias, Impacto social, Bem-estar humano

1 INTRODUÇÃO

O sector da construção é um dos principais responsáveis pelos desafios globais no âmbito da sustentabilidade, devido ao seu grande impacto ambiental e ao elevado consumo de recursos, energéticos e materiais. De facto, a construção consome aproximadamente 50% dos recursos extraídos mundialmente e gera mais de 30% dos resíduos globais (UNEP 2020; World Bank 2021). Só os edifícios representam cerca de 36% do consumo global de energia (IEA 2021; U.S. Department of Energy 2022). Como exemplos dos impactos negativos do sector, refira-se que actualmente o nível de extração de areia para a construção ocorre a níveis insustentáveis, com severos impactos ambientais, e que a produção de uma tonelada de cimento requer cerca de 150 litros de água e leva à emissão de 900kg de CO2 (UNEP 2019; WBCSD 2020). O sector contribui com cerca de 39% das emissões globais de CO2, sendo 28% provenientes da operação dos edifícios e 11% da construção e produção de materiais (World Green Building Council 2021; IEA 2020). Esses dados sublinham a necessidade urgente de adoptar práticas sustentáveis na construção para mitigar seus custos ambientais, económicos e sociais.

A evolução da legislação e das normas de sustentabilidade no sector da construção tem sido pontuada por uma série de marcos significativos ao longo das décadas:

- A crise do petróleo de 1973 destacou a necessidade de eficiência energética, levando à promulgação da Lei de Política Energética e Conservação dos EUA em 1975, que introduziu normas de eficiência energética (Governo dos Estados Unidos 1975).
- Em 1976, a Alemanha implementou o seu Código de Conservação de Energia na Construção (Bundesregierung 1976). Em 1978, a Lei Nacional de Energia dos EUA estabeleceu padrões mínimos de eficiência para novos edifícios (Governo dos Estados Unidos 1978). Nos anos 80, a norma ASHRAE 90-1980 foi estabelecida para edifícios comerciais e residenciais nos EUA (ASHRAE 1980).
- O relatório "Nosso Futuro Comum" de 1987 definiu o conceito de desenvolvimento sustentável, influenciando a integração de práticas sustentáveis na construção (World Commission on Environment and Development 1987).
- Em 1990, o BREEAM foi introduzido no Reino Unido como o primeiro método de avaliação ambiental de edifícios (BRE 1990). Posteriormente, o Protocolo de Quioto de 1997 e o sistema LEED de 1998 nos EUA incentivaram a redução de emissões de gases de efeito estufa e a construção sustentável (UN 1997; USGBC 1998).
- A Directiva EPBD [Directiva do Desempenho Energético dos Edifícios] de 2002 e sua revisão em 2010 reforçaram o desígnio da eficiência energética na União Europeia [UE], culminando na exigência de edifícios quase zero energia (European Parliament and Council 2002, 2010).
- Em 2012, o International Green Construction Code integrou medidas de sustentabilidade nos códigos de construção (International Code Council 2012).
- O Acordo de Paris de 2015 e os respectivos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [ODS], especialmente o ODS 11, promoveram um compromisso global para limitar o aquecimento global e tornar as cidades mais sustentáveis (UN 2015a, 2015b).
- A revisão da Directiva EPBD em 2018 introduziu novas exigências para a renovação de edifícios e sistemas de automação, e, em 2020, os Padrões de Edifícios Quase Zero Energia da UE tornaram-se obrigatórios para todos os novos edifícios (European Parliament and Council 2018).

Actualmente, os sistemas de classificação de edifícios são usados como ferramentas para implementar abordagens de desenvolvimento sustentável, numa perspectiva cada vez mais holística e abrangente (Varma e Palaniappan 2019). Os Sistemas de certificação de edifícios verdes (GBRS) trazem vários benefícios importantes, cruciais para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável: por exemplo, promovendo a redução até 35% das emissões de CO2 ou uma diminuição até 50% do consumo de energia nos edifícios (Doan *et al.* 2017; Darko *et al.* 2017; Hosseini *et al.* 2018). Além disso, promovem o uso eficiente de recursos e incentivam a adopção de práticas construtivas sustentáveis, melhorando a qualidade dos ambientes interiores e promovendo a saúde e o bem-estar dos ocupantes.

A implementação de GBRS proporciona uma abordagem padronizada para medir e promover a sustentabilidade nas construções. Contudo, é importante referir que as abordagens para a certificação de edifícios verdes não são lineares e têm-se transformado e evoluído ao longo do tempo. Neste contexto, este artigo aborda e descreve a evolução dos processos de certificação de edifícios, procurando ilustrar como essas transformações têm contribuído para a melhoria contínua da sustentabilidade no sector da construção.

2 A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO

Os sistemas de primeira geração começaram por se focar especificamente na eficiência energética e no conforto ambiental, como resposta directa às preocupações crescentes com o consumo de energia no sector da construção. Estes sistemas consideram geralmente uma ampla gama de categorias, incluindo uso de energia, uso de materiais, qualidade do ar interior, conforto dos ocupantes, ecologia e sustentabilidade, tendo sido pioneiros a estabelecer a base para outras certificações globais.

Gradualmente, a evolução das metodologias de certificação passou a adoptar uma abordagem mais holística, incorporando aspectos de bem-estar humano e social. Os sistemas mais recentes incluem ferramentas e quadros de referência gerais que incorporam uma gama de variáveis mais vasta, incluindo não só os temas de eficiência energética e ambiental, mas também na gestão de materiais, água e resíduos.

2.1 SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE PRIMEIRA GERAÇÃO

Os primeiros sistemas de certificação de edifícios verdes surgiram no final dos anos 1980 e início dos anos 1990 (Figura 1). O sistema BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*) foi desenvolvido na Inglaterra em 1990 e avalia a sustentabilidade dos edifícios através de uma série de pontos que consideram questões relacionadas com as fases de construção, uso e demolição dos edifícios. O BREEAM possui cinco classificações, de “Pass” a “Outstanding”, e é baseado em critérios qualitativos; inclui aspectos como o uso de água, uso de energia, qualidade do ar interior, saúde e conforto dos ocupantes, ecologia e sustentabilidade (BRE Global 2017). Desde a sua criação, o BREEAM tem sido aplicado em muitos países ao redor do mundo (Ahmed *et al*. 2018).

O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) foi introduzido em 1996 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), avaliando aspectos ambientais de novos edifícios e edifícios existentes, considerando distintos usos (USGBC 1998). Este sistema é actualmente um dos programas de certificação de sustentabilidade mais populares no mundo, tendo evoluído ao longo dos anos, da versão 1.0 até à actual versão 4.1, considerando aspectos de design sustentável, construção e operação de edifícios, medindo energia, uso de materiais, redução de água e resíduos, e qualidade ambiental interna. O sistema é baseado em abordagens de “*triple bottom line*”, incluindo aspectos económicos, ambientais e sociais (USGBC 1998).

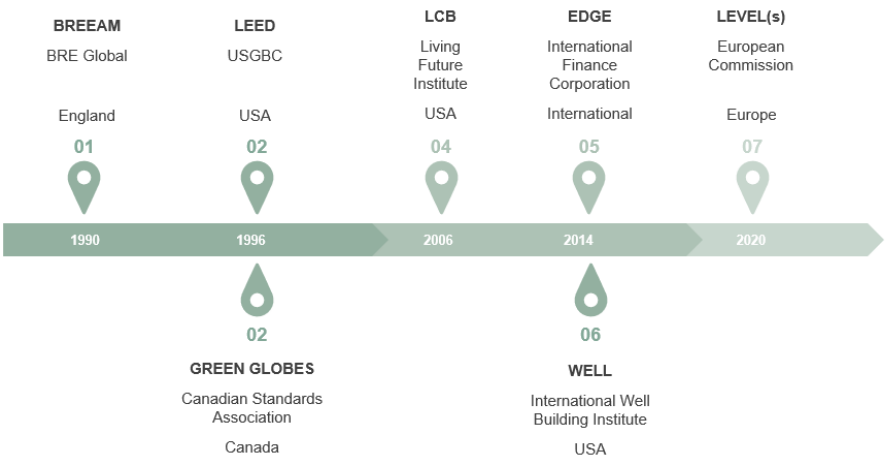


Figura 1 – Evolução no tempo do aparecimento de sistemas de certificação de edifícios verdes

Os sistemas pioneiros de certificação foram revolucionários ao estabelecer padrões de sustentabilidade. Apesar de inicialmente se concentrarem sobretudo em aspectos ambientais específicos – como eficiência energética e qualidade do ar interior – e menos numa abordagem holística que incluísse aspectos sociais e económicos, com o tempo, estes sistemas evoluíram para incorporar uma visão mais ampla e integrada da sustentabilidade. Por outro lado e apesar das limitações referidas, os sistemas de primeira geração inspiraram numerosas abordagens nacionais e regionais. Estas respostas regionais têm uma relevância inquestionável pela sua maior eficácia para atender às necessidades locais, ainda que se aceite que uma aplicação limitada a um único país ou região possa restringir a transferência de melhores práticas e inovações globais.

2.1.1 Abordagens nacionais inspiradas nos sistemas de primeira geração

Os sistemas de certificação baseados em contextos regionais ou nacionais foram projectados para medir a resposta dos edifícios aos desafios da sustentabilidade dentro de uma região ou país, compartilhando características com os sistemas internacionais de certificação de edifícios verdes (GBRS). Esses sistemas geralmente não são utilizados além de seus países de origem, pois podem não atender aos requisitos de outros contextos. No entanto, são cruciais para adaptar as práticas de construção sustentável às realidades climáticas e culturais locais. Dos principais sistemas regionais europeus destacam-se:

- HQE (*Haute Qualité Environnementale*), desenvolvido em 1994 em França e supervisionado pela Associação para Alta Qualidade Ambiental. Foca-se em 14 categorias de sustentabilidade, incluindo gestão de energia, água, resíduos, conforto ambiental e qualidade do ar (Bernardi *et al*. 2017).
- O DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*), desenvolvido pelo Conselho Alemão de Construção Sustentável em 2009, utiliza a avaliação do ciclo de vida e as normas europeias EN 15804 e EN 15978. Divide-se em seis categorias principais: qualidade ecológica, económica, sociocultural, técnica, do processo e da localização (System International | DGNB System n.d.).
- Minergie ECO, estabelecido em 1994 na Suíça, é um esquema de certificação voluntária focado na eficiência energética, ambiente interno e proteção do consumidor. Aplica uma abordagem holística ao desempenho técnico dos edifícios, avaliando tanto o impacto ecológico quanto o desempenho técnico (Home - MINERGIE Schweiz n.d.).

- *PassivHaus*, desenvolvido na Alemanha em 2014, que estabelece um rigoroso padrão de desempenho energético e estanqueidade da envolvente dos edifícios. Apesar da sua popularidade na Alemanha e Áustria, a sua aplicação enfrenta desafios em climas quentes (International Passive House Association | Criteria n.d.).
- *Miljöbyggnad*, criado em 2008 na Suécia, avalia energia, ambiente interno e materiais. É obrigatório para projetos financiados publicamente na Suécia e visa promover a construção sustentável no país (Attia *et al*. 2021).

2.2 SISTEMAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Os sistemas de segunda geração surgiram na década de 1990 e começaram por se focar especificamente na eficiência energética e no conforto ambiental, respondendo a uma necessidade crescente de reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono no sector da construção. Estes sistemas introduziram métricas quantitativas mais rigorosas e uma atenção mais detalhada na gestão de recursos, promovendo práticas de construção mais sustentáveis e eficientes, ainda que, por vezes, não considerando outros aspectos igualmente importantes, como o impacto social e a saúde dos ocupantes. De entre estes sistemas, destacam-se:

- *Green Globes*, resultante de várias adaptações feitas pela *Canadian Standards Association* a partir do BREEAM, entre 1996 e 2002, com ênfase na análise do ciclo de vida dos componentes e materiais dos edifícios. Desde então, foi adoptado mundialmente e é operado pelo *Green Building Initiative*. O sistema analisa seis categorias: gestão de projetos, eficiência energética, localização, eficiência hídrica, ambiente interior e resíduos sólidos. O *Green Globes* fornece um indicador percentual de avaliação, traduzido em quatro níveis de classificação (1=35-54%, 2=55-69%, 3=70-84%, 4=85%) (Green Building Initiative 2017).
- *Green Star*, sistema de classificação criado pelo *Green Building Council of Australia* (GBCA) em 2003, baseado no LEED e BREEAM. Avalia a sustentabilidade de edifícios em nove categorias de desempenho ambiental: gestão, qualidade ambiental do interior, energia, transportes, água, materiais, uso do solo e ecologia, emissões e inovação. Segundo o GBCA, o sistema fornece um indicador de quão ambientalmente eficientes são os edifícios e incentiva o uso de materiais amigos do ambiente. É o sistema mais utilizado no continente australiano e na África do Sul (Giama e Papadopoulos 2012).

2.3 SISTEMAS DE TERCEIRA GERAÇÃO

Os sistemas de terceira geração representam um avanço significativo em relação aos anteriores, integrando uma abordagem regenerativa (isto é, contabilizando os contributos positivos para a sustentabilidade) e focando-se no bem-estar humano e na saúde dos ocupantes. Esses sistemas têm surgido a partir da década de 2000, com o objetivo de não só reduzir os impactos negativos, mas também gerar impactos positivos no ambiente e nas pessoas; introduzindo uma visão mais holística e abrangente da sustentabilidade, e abordando de forma integrada questões sociais, económicas e ambientais. Contudo, a abrangência pretendida, traduzida necessariamente numa complexidade de critérios, e a necessidade de adaptação às condições locais podem representar barreiras para a sua adopção mais generalizada. De entre estes sistemas, destacam-se:

- *Living Building Challenge* [LBC], correspondente a um padrão ambiental global que assegura que os edifícios não prejudicam, mas sim melhoram o ambiente ao seu redor. O LBC foi desenvolvido pelo *International Living Future Institute* em 2006 e é por este descrito como uma filosofia, ferramenta de advocacia e programa de certificação, que procura incentivar e

acelerar a transição global para uma cultura de construção regenerativa. O LBC é baseado em sete áreas de desempenho: Localização, Água, Energia, Saúde e Felicidade, Materiais, Equidade e Beleza (Benhaddou, 2019).

- EDGE – *Excellence in Design for Greater Efficiencies*, desenvolvido pela *International Finance Corporation* [IFC]) como uma plataforma de construção verde que inclui i) um padrão universal para edifícios verdes, ii) uma aplicação de software baseada na web e iii) um programa de certificação (IFC 2020a, 2020b). A metodologia EDGE inclui soluções baseadas na eficiência ao longo do ciclo de vida e logo desde a fase inicial de concepção, tomando em consideração as condições climáticas locais, o tipo de ocupação e as soluções de projecto. Existem três tipos de certificações EDGE em função do nível de redução alcançado em termos de eficiência energética: EDGE Certification (mínimo de 20% de economia), EDGE Advanced (40%) e EDGE Zero Carbon (emissões de carbono zero).
- WELL *Building Standard* (WELL), correspondente a um sistema de certificação que avalia e mede a saúde dos ocupantes dos edifícios e o impacto no seu bem-estar, promovendo um ambiente saudável e produtivo. O WELL foi lançado em outubro de 2014 nos Estados Unidos e abarca dez categorias: ar, água, nutrição, luz, movimento, conforto térmico, som, mente, materiais e comunidade (International WELL Building Institute 2014). A certificação WELL avalia e atribui pontos correspondentes a cada categoria, sendo o projeto validado e certificado pelo *International WELL Building Institute*.

2.4 ABORDAGENS HOLÍSTICAS E OUTRAS FERRAMENTAS

As abordagens mais holísticas de certificação de edifícios verdes surgiram da necessidade de integrar múltiplos aspectos da sustentabilidade, abrangendo não apenas os factores ambientais, mas também os sociais e económicos. Estas metodologias destacam-se pela sua flexibilidade e capacidade de adaptação quer a diferentes contextos regionais, quer a distintos tipos de edifícios, oferecendo uma avaliação abrangente que procura um maior equilíbrio do desempenho sustentável. Destas abordagens destacam-se o SBTool e o novo quadro Level(s) da Comissão Europeia:

- O SBTool (*Sustainable Building Tool*) foi desenvolvido pela *International Initiative for a Sustainable Built Environment* (iiSBE) em 2001 como uma estrutura genérica para apoiar a avaliação de desempenho sustentável de edifícios. Em 2007, foi lançada uma versão adaptada para a necessidade de internacionalização abrangente, sendo atualmente utilizada por muitas instituições e grupos de trabalho regionais da EU, governos nacionais e locais. Esta ferramenta inclui categorias de sustentabilidade como cargas ambientais, consumo de energia e recursos, qualidade dos serviços, qualidade do ambiente interior, seleção do local, planeamento e desenvolvimento do projecto, além de aspectos económicos, sociais e culturais (Larsson 2012).
- Level(s) é uma ferramenta voluntária de análise, verificação e quantificação, baseada nos princípios da circularidade e desenvolvida pela Comissão Europeia para avaliar a sustentabilidade dos edifícios (Dodd e Donatello 2021). Este método é baseado em seis macro objetivos que abordam aspectos chave da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos edifícios: emissões de gases de efeito estufa, ciclos de vida de materiais eficientes e circulares, uso eficiente dos recursos hídricos, espaços saudáveis e confortáveis, adaptação e resiliência às mudanças climáticas, e optimização do custo e valor do ciclo de vida. Cada indicador de sustentabilidade dentro dos macro objetivos pode ser analisado em diferentes níveis, desde a concepção do projecto até à construção e ocupação, facilitando a adaptação das práticas sustentáveis em todas as fases do ciclo de vida do edifício (Cordero *et al.* 2019).

As abordagens holísticas representam um avanço significativo na promoção da sustentabilidade na construção civil, integrando diversos critérios e promovendo uma visão mais completa do impacto ambiental, social e económico dos edifícios. No entanto, a sua complexidade e a necessidade de adaptação às condições locais podem representar dificuldades para uma implementação ampla e eficaz destes modelos. Apesar destes desafios, ferramentas como o SBTool e o Level(s) são cruciais para a evolução contínua das práticas de construção sustentável, alinhando-se com os objetivos estratégicos de políticas europeias e globais.

2.5 SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal destacam-se dois sistemas de certificação: i) o LiderA, focado na sustentabilidade ambiental e eficiência energética dos edifícios, com avaliação de diversos critérios, incluindo gestão de energia, materiais, água e conforto dos ocupantes; e ii) o SBTool Portugal, resultante da adaptação do SBTool internacional, utilizado para avaliar a sustentabilidade dos edifícios em Portugal, considerando categorias como cargas ambientais, consumo de energia e recursos, e qualidade ambiental interior.

3 ESTRATÉGIA DE CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL DA UNIÃO EUROPEIA E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Nos anos mais recentes, a União Europeia tem promovido várias iniciativas e legislação para enfrentar os desafios da sustentabilidade, com ênfase na descarbonização da economia (e, por extensão, da construção que, como se viu, é um dos sectores que mais recursos consome e com maior impacto nas emissões de gases de efeito e estufa). Entre estas iniciativas, destacam-se o cumprimento dos Objectivos de Desenvolvimento Sustentável – e em particular o ODS11, que visa tornar as cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis –, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável Global, o Acordo Verde Europeu, a Onda de Renovação, a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios, as Compras Públicas Verdes, a taxonomia da UE para finanças sustentáveis, e o Relatório em quadros e certificações sustentáveis.

Os Sistemas de Certificação e Avaliação de Sustentabilidade – mesmo os das primeiras gerações – são um poderoso contributo para o cumprimento de algumas das metas climáticas e energéticas traçadas pela UE para 2030 e 2050, colocando em evidência do desempenho dos edifícios ao nível energético, ambiental, de proteção de recursos materiais e hídricos, conforto térmico, qualidade do ambiente interior das construções, da qualidade do ar, gestão dos resíduos da construção entre outros. Trata-se de indicadores partilhados – e, cada vez mais, quantificados – que traduzem uma ênfase comum relativamente a práticas sustentáveis. No entanto, aspectos como o projecto para a desconstrução e adaptação ainda apresentam oportunidades para evolução. Neste sentido, ferramentas abertas como o Level(s) apresentam uma utilidade complementar na promoção práticas harmonizadas de construção sustentável na Europa.

Nesta perspectiva, ferramentas de nova geração oferecem uma abordagem comum para avaliar a sustentabilidade dos edifícios, alinhando-se com os sistemas de certificação já utilizados e conhecidos na Europa, (BREEAM, LEED, *Green Globes*, SBTool, *Living Building Challenge*, EDGE, WELL, HQE e DGNB) – Quadro 1. Embora ferramentas como o Level(s) sejam de carácter voluntário, elas oferecem uma base comum que pode ser usada em conjunto com as certificações mais correntes para fornecer uma abordagem holística e integrada para a construção sustentável. A título de exemplo, refira-se o Regulamento de Produtos de Construção (CPR) (Regulamento (UE) Nº 305/2011), que estabelece condições harmonizadas para a comercialização de produtos de construção na UE e procura assegurar

que esses produtos sejam adequados para o uso previsto, especialmente em termos de segurança e desempenho ambiental. Este regulamento pode ser complementado pelo Level(s) que permite fornecer indicadores para a avaliação do impacto ambiental e da sustentabilidade dos produtos de construção, numa lógica de transparência no mercado de construção.

Quadro 1: Alinhamento do Level(S) com os Sistemas de certificação mais usados na Europa

Level(s)		Sistema de Certificação								
Categorias	Indicadores de sustentabilidade	BREEAM	LEED	Green Globles	SBTool	LBC	EDGE	WELL	HQE	DGNB
1. Emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de um edifício	1.1 Desempenho energético em utilização (kWh/m2/ano)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
	1.2 Potencial de Aquecimento Global do Ciclo de Vida (CO2 eq./m2/ano)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×		✓
2. Ciclo de vida de Materiais e Circularidade de Recursos	2.1 Orçamento de quantidades, materiais e vida útil	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
	2.2 Resíduos e materiais de Construção e Demolição	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2.3 Design para adaptabilidade e renovação	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	2.4 Design para desconstrução, reutilização e reciclagem	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3. Utilização eficiente dos recursos hídricos	3.1 Consumo de água em utilização (m3/ocupante/ano)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4. Espaços saudáveis e confortáveis	4.1 Qualidade do ar interior	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓
	4.2 Tempo fora do intervalo de conforto térmico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	4.3 Iluminação e conforto e visual	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	4.4 Acústica e proteção contra ruído	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
5. Adaptação e resiliência às mudanças climáticas	5.1 Proteção da saúde e conforto térmico dos ocupantes	×	×	×	×	✓	×	✓	×	×
	5.2 Aumento do risco de condições meteorológicas extremas	✓	×	×	×	×	×	×	×	✓
	5.3 Drenagem sustentável	×	×	×	×	×	✓	×	×	×
6. Custo optimizado do ciclo de vida e Valor	6.1 Custos do ciclo de vida (€/m²/ano)	×	×	×	✓	×	×	×	×	✓
	6.2 Criação de valor e fatores de risco	×	×	×	×	✓	×	×	×	×
Número total de indicadores considerados:		10	9	9	10	10	9	7	8	11

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de certificação de edifícios verdes evoluíram significativamente desde a introdução do BREEAM em 1990. A primeira geração de sistemas, incluindo BREEAM e LEED, focou-se principalmente em critérios ambientais específicos, como eficiência energética e qualidade do ar interior. Esses sistemas estabeleceram as fundações para a avaliação e quantificação de práticas sustentáveis na construção, mas frequentemente negligenciavam uma abordagem holística que incluísse aspectos sociais, como o bem-estar humano, e económicos.

A segunda geração de sistemas, expressa por sistemas como o *Green Globes* e *Green Star*, ampliou o âmbito dos parâmetros considerados nas avaliações para incluir mais aspectos de gestão de recursos (por exemplo, com um aprofundamento dos temas relacionados com a produção de resíduos, e conforto ambiental), promovendo práticas mais integradas. A terceira geração, exemplificada pelo *Living Building Challenge* e o sistema WELL, introduziu uma abordagem regenerativa, que quantificava igualmente os contributos positivos introduzidos pelos projectos no meio ambiente, para além do bem-estar humano e da saúde dos utilizadores, considerando factores como a beleza ou a qualidade das vistas que se obtêm do interior dos espaços.

Com a transição do milénio, verificou-se uma tendência emergente correspondente à integração de abordagens holísticas que abrangessem múltiplos aspectos da sustentabilidade. O Level(s), uma ferramenta desenvolvida pela Comissão Europeia, exemplifica essa tendência ao fornecer um quadro comum para avaliar a sustentabilidade dos edifícios, alinhando-se com vários sistemas de certificação reconhecidos. Além disso, verificou-se uma ênfase crescente nos temas da circularidade e na eficiência dos ciclos de vida dos materiais, como evidenciado pelas categorias e indicadores do Level(s). A adaptação às mudanças climáticas e a resiliência também têm conhecido uma atenção crescente, com novos indicadores focados na proteção contra eventos climáticos extremos e na sustentabilidade ao nível da drenagem dos solos e ecossistemas.

Apesar destes avanços significativos, o sector de construção ainda enfrenta desafios significativos na implementação de práticas sustentáveis, por exemplo decorrentes da complexidade crescente dos sistemas de certificação, que podem dificultar a adopção daquelas numa escala mais generalizada. A necessidade de adaptação às condições locais e a variabilidade dos requisitos regionais representam igualmente barreiras significativas, não obstante as diversas adaptações regionais dos sistemas originais. Por outro lado, a integração de novos conceitos, como o projecto para desconstrução e renovação, ainda se encontra numa fase relativamente inicial e requer maior investigação, desenvolvimento, divulgação e adopção pelo sector. A colaboração entre diferentes partes interessadas e a harmonização de normas e práticas afiguram-se como essenciais para superar estes desafios e promover uma transição mais completa para a construção sustentável.

O futuro da certificação de edifícios verdes aponta para uma integração ainda mais completa dos aspectos ambientais, sociais e económicos. Uma nova era de avaliações mais inclusivas e adaptativas poderá estar a surgir, alinhada com as necessidades globais de sustentabilidade. Isso inclui a adopção de tecnologias avançadas de monitorização e análise de dados, que permitirão uma avaliação contínua e dinâmica do desempenho sustentável dos edifícios ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, a colaboração entre diferentes partes interessadas e a harmonização – ainda distante – de normas e práticas afiguram-se essenciais para promover uma transição mais generalizada para a construção sustentável.

5 CONCLUSÃO

A evolução dos sistemas de certificação de edifícios verdes representa um progresso significativo em direção a práticas de construção mais sustentáveis e resilientes, tendo evoluído significativamente desde os anos 1990. De um paradigma inicial focado na conservação da energia e do conforto no interior dos espaços, as metodologias evoluíram no sentido de uma maior diversidade de factores e numa tendência de quantificação destes, por oposição a uma simples qualificação. Gradualmente, as abordagens tornaram-se mais holísticas, abarcando as dimensões ambiental, social, cultural e económica, numa tendência que se prolongou para a consideração de aspectos relacionados com o bem-estar humano, considerando variáveis como a beleza, diversidade, oferta de serviços, modos de vida saudáveis e até hábitos alimentares.

Mais recentemente, a introdução de ferramentas integradoras das diferentes categorias e variáveis da sustentabilidade – como o Level(s) – demonstra uma capacidade de adaptação e inovação do sector, oferecendo ferramentas e directrizes para uma construção sustentável alinhada com os objetivos estratégicos globais, crescentemente expressos nas políticas comuns europeias. No entanto, para enfrentar os novos desafios do sector, será necessário um esforço conjunto de todas as partes interessadas, visando a implementação eficaz e uma evolução contínua das práticas sustentáveis na construção. Até lá, quantificar as metas de neutralidade de carbono através de indicadores mensuráveis e limiares de desempenho crítico parece ser fundamental para acelerar a aceitação do mercado, preparando-o para o impacto de novas exigências regulamentares no sentido da descarbonização do sector, e informar políticas e tomadas de decisão.

REFERÊNCIAS

Ahmed, M., Abul, M., Mallick, J. (2018). World green building rating systems: A comparative study. International Conference Cum Exhibition on Building Utilities 2016, March.

Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulou, S., Betsi, M. (2021). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (NZEB) design in Southern Europe. Energy and Buildings, 231, 110618. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110618.

Benhaddou, D. (2019). Living building Challenge. June, 182–188. https://doi.org/10.1145/3128128.3128156.

Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., & Bohne, R.A. (2017). Review on the performance assessment of buildings based on real monitored data. Journal of Cleaner Production, 142, 2167-2185. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.155.

BRE Global (2017). BREEAM-International-New-Construction-2016.

Bundesregierung (1976). Energieeinsparverordnung (EnEV). Berlin: Bundesanzeiger Verlag.

Building Research Establishment (1990). BREEAM. Watford: BRE.

Cordero, R., Esteban, M., Francia, J. (2019). Building performance assessment and rating systems: Evaluating the evaluation tools. Journal of Cleaner Production, 205, 123-136. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.210.

Darko, A., Chan, A.P.C., Yang, Y., Evans, R. (2017). Building Information Modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management framework for green buildings. Journal of Cleaner Production, 149, 1048-1062. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.008.

Doan, D.T., GhaffarianHoseini, A., Naismith, N., GhaffarianHoseini, A., Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. Building and Environment, 123, 243-260. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007.

Dodd, N., Donatello, S. (2021). Level(s) - A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. European Commission.

European Parliament and Council (2002). Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council (2010). Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council (2018). Directive 2018/844/EU on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union.

Giama, E., Papadopoulos, A.M. (2012). Sustainable building management: Overview of certification schemes and standards. Advances in Building Energy Research, 6(2), 242–258. https://doi.org/10.1080/17512549.2012.740905.

Governo dos Estados Unidos (1975). Energy Policy and Conservation Act. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Governo dos Estados Unidos (1978). National Energy Act. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Green Building Initiative (2017). Green Globes for New Construction – Technical Reference Manual. https://doi.org/10.2.

Home - MINERGIE Schweiz. (n.d.). Retrieved from Minergie.

Hosseini, M.R., Banihashemi, S., Chileshe, N., e Rameezdeen, R. (2018). Sustainable construction: Analysis of the adoption of existing certification systems. Journal of Cleaner Production, 170, 913-923. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.158.

International Code Council (2012). International Green Construction Code. Washington, D.C.: ICC.

IEA - International Energy Agency (2020). "Cement." IEA.

IEA - International Energy Agency (2021). "Buildings." IEA.

IFC - International Finance Coprporation (2020a). EDGE Methodology Report.

IFC - International Finance Coprporation (2020b). EDGE User Guide.

International Passive House Association | Criteria. (n.d.). Passive House Institute.

International WELL Building Institute (2014). WELL Building Standard. New York: IWBI.

Larsson, N. (2012). SBTool 2012: Generic framework and the role of the International Initiative for a Sustainable Built Environment. Building Research & Information, 39(3), 273-282. https://doi.org/10.1080/09613218.2012.672330.

System International | DGNB system. (n.d.). Retrieved February 6, 2022, from https://www.dgnb-system.de/de/system/international/.

UN - United Nations (1997). Kyoto Protocol. Kyoto: United Nations Framework Convention on Climate Change.

UN - United Nations (2015a). Paris Agreement: United Nations Framework Convention on Climate Change.

UN - United Nations (2015b). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations.

UNEP - United Nations Environment Programme (2019). Sand and Sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources.

UNEP - United Nations Environment Programme (2020). Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.

U.S. Department of Energy (2022). Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings.

U.S. Green Building Council (1998). LEED. Washington, D.C.: USGBC.

Varma, C., Palaniappan, S. (2019). Sustainable building practices and building rating systems: An overview. Journal of Cleaner Production, 1187-1202. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.212

World Bank (2021). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.

World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future. Oxford: Oxford University Press.

World Green Building Council (2021). "Bringing Embodied Carbon Upfront." World Green Building Council.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development (2020). "Cement Sustainability Initiative." WBCSD.

Zarghami, E., Fatourehchi, D. (2020). Green building rating systems in developing countries: Case studies from Asia and the Middle East. Journal of Cleaner Production, 245, 118-137. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118137.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DO PARQUE EDIFICADO DE LISBOA COM RECURSO A TÉCNICAS DE IA

Gonçalo Araújo[ab]; Ricardo Gomes[b] , Maria da Glória Gomes[a];; Paulo Ferrão[b]; Manuel Correia Guedes[c]

[a]CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, ceris@tecnico.ulisboa.pt

[b]IN+, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, in3@tecnico.ulisboa.pt

[c]CiTUA, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, citua@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Os certificados energéticos oferecem capacidades de documentação do parque edificado de um país. Assim, a análise dos certificados energéticos apoia o desenvolvimento de políticas para desenvolvimento sustentável. No entanto, a pobreza energética dos edifícios mantém-se baixa, assim como o rácio de renovação do edificado global. Este estudo apresenta a implementação de um modelo de inteligência artificial num processo de otimização da reabilitação de uma amostra de 20 edifícios em Lisboa, Portugal. Este modelo é capaz de prever as necessidades energéticas de um edifício com base em parâmetros obtidos através de uma base de dados de certificados energéticos em Portugal. Assim, aplicou-se um algoritmo de otimização multiobjectivo para procurar as melhores combinações de intervenções por edifício que minimizam a necessidade energética média e o desvio padrão da amostra assim como o custo de intervenção médio por edifício. Os resultados da otimização demonstram correlações entre o tipo e quantidade total de intervenções por amostra para obter soluções ótimas, assim como uma correlação negativa entre o custo médio de reabilitação por edifício, a homogeneidade da amostra e a sua necessidade energética média.

Palavras-chave: Certificados Energéticos, Inteligência Artificial, Reabilitação de Edifícios, Otimização, Energia em Edifícios

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais consumidores nacionais de energia é representado pelo sector da construção e do parque edificado. Considerando que o ciclo de vida de um edifício pode chegar e até ultrapassar os 100 anos, é crucial promover a regulação energética e desenvolver ferramentas que promovam a redução do consumo energético dos edifícios, assim como as suas emissões de gases de efeito estufa, sem negligenciar o conforto e qualidades de vida dos seus ocupantes (Mourão et al. 2019). Neste contexto, o Certificado Energético (CE) de edifícios tem vindo a ser usado a nível global como estratégia de auditoria, classificação, e categorização de edifícios (Pasichnyi et al. 2019; Pérez-Lombard et al. 2009). Este instrumento apoia a implementação e prática de políticas de desenvolvimento que promovem a eficiência energética no parque edificado, ajudando a atingir as metas de desenvolvimento sustentáveis propostas por vários programas e diretivas europeias (European Parliament 2018; European Parlament 2018).

Apesar dos múltiplos benefícios e dos esforços implementados para promover a renovação de edifícios e, consequentemente, dos seus certificados energéticos, o rácio de reabilitação de edifícios a nível global mantém-se baixo, e a pobreza energética dos edifícios acaba por ser uma problemática grave e recorrente (Nidam et al. 2023; Watts, Jentsch, and James 2008a). Uma das barreiras que atrasam este processo é a falta de participação geral devido a desconhecimento do processo de certificação energética e as suas vantagens, assim como identificação dos tipos de intervenção mais indicados para cada caso (Watts, Jentsch, and James 2008b). Outra barreira identificada são os erros gerais encontrados nas bases de dados nacionais dos CE (Hardy and Glew 2019a).

(Watts, Jentsch, and James 2008) exploram como as pessoas interpretam os CE, a sua importância, e se efetuam as intervenções sugeridas. Os resultados demonstram que os processos dos CE são interpretados principalmente como uma burocracia obrigatória sem benefícios e que a maior parte das pessoas não aplica as intervenções sugeridas. Ainda, (Hardy and Glew 2019) demonstram que 36 a 62% dos CE do Reino Unido possuem algum erro, e que estes são causados maioritariamente pelos peritos ou pessoal técnico. Estes autores consideram que novas metodologias, particularmente recorrendo a técnicas de IA, podem ser desenvolvidas para prevenir e corrigir estes erros, assim como reduzir a sua complexidade. Consequentemente, modelos de IA capazes de prever o CE e respetivos indicadores de um edifício podem ajudar a atingir dois objetivos: (1) comunicar facilmente as vantagens dos CE e intervenções sugeridas num registo informativo menos complexo (Araújo et al. 2023a; Watts, Jentsch, and James 2008b; Hardy and Glew 2019b), e (2) Implementar novos processos de análise e otimização para auxiliar politicas de desenvolvimento sustentável (Gouveia and Palma 2019; Buratti, Barbanera, and Palladino 2014; Khayatian, Sarto, and Dall'O' 2016; Fan and Xia 2018).

No sentido de atingir estes objetivos, (Araújo et al. 2023) desenvolveram um modelo de IA capaz de prever um CE em Portugal e os consumos energéticos de um edifício residencial com base em 20 parâmetros. Este modelo foi treinado com uma Base de Dados de Edifícios (BDE) composta por ≈55,000 CE calculados conforme a legislação DL118/2013 (Portuguese Republic Diary 2013), com informação acerca da sua localização, ano de construção, área, soluções construtivas, tipos de equipamentos, entre outros. O modelo obteve resultados aceitáveis de eficácia na previsão destes indicadores, com erros médios de ≈1 nível de CE e de ≈40 [kWh m^{-2}] no seu consumo energético. Este modelo foi então implementado numa aplicação web[1] direcionada ao proprietário de um edifício ou fração com CE. Nesta aplicação um utilizador consegue prever o CE da sua fração ou edifício, e aceder

[1] https://goncalo-araujo-epc-app-app-epc-txb2ta.streamlit.app/

a um processo de otimização que procura a melhor combinação de intervenções integradas no "Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos", particularmente no "Programa Edifícios + Sustentáveis" (Ministério do Ambiente 2023). Este problema de otimização procura minimizar o consumo energético e o custo da intervenção, e maximizar o retorno de investimento obtido em poupanças energéticas.

Nessa implementação, demonstrou-se a utilidade da implementação destes modelos para atingir o objetivo (1) de simplificar o processo de CE junto da comunidade, permitindo uma previsão informativa acerca do desempenho energético do edifício ou fração testado pelo utilizador. O presente estudo expande a implementação do modelo desenvolvido e procura demonstrar como modelos de IA podem ser utilizados para alcançar o objetivo (2) de implementar novos processos de análise e otimização para políticas de certificação energética e reabilitação do parque edificado.

O modelo desenvolvido por (Araújo et al. 2023) é implementado para um problema de otimização de uma amostra de 20 CE da classe D ou inferior, contidos na BDE utilizada (para Lisboa). O objetivo do problema é encontrar as melhores combinações de intervenções para cada edifício que providenciam o menor consumo energético médio, menor desvio padrão do consumo energético da amostra e o menor custo médio de intervenção por edifício. Finalmente, o modelo desenvolvido, juntamente com o problema de otimização são implementados numa aplicação web.

2 DADOS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo começa por contextualizar o problema de otimização proposto, descrevendo as suas variáveis e objetivos. Sucessivamente, apresenta-se a BDE utilizada para desenvolver o modelo de IA, documentando os indicadores de desempenho que o modelo prevê, assim como os parâmetros necessários para efetuar a previsão. Na terceira secção, apresenta-se o modelo escolhido para este estudo, assim como os resultados da sua eficácia na previsão de resultados. Finalmente, a implementação do modelo é descrita de acordo com os dois tipos de implementação feitos. No primeiro, procura-se resolver o problema de otimização para uma amostra de 20 CE contidos na BDE que estejam abaixo da classe D e situados em Lisboa. Na segunda, desenvolve-se uma aplicação web que permite ao utilizador resolver o mesmo problema de otimização, mas adaptado aos seus parâmetros relativamente à amostra de CE e aos tipos de intervenção selecionados.

2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para este problema de otimização, foram considerados 8 tipos de intervenções que podem ser ou não aplicados a cada edifício e que são financiadas pelo "Programa de Edifícios +Sustentáveis" do Fundo Ambiental (FA) (Ministério do Ambiente 2023). Como tal os tipos de intervenção são documentados no Quadro 1 em relação à sua tipologia, solução, custo, rácio de financiamento proposto, e limite de financiamento.

Analisando o Quadro 1 obtém-se 8 variáveis por cada edifício para o nosso problema de otimização: Isolamento de paredes, pavimentos e coberturas; Alteração das janelas; aplicação de uma bomba de calor ar-água e outros aparelhos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC); e painéis solares para produção e armazenamento de energia e/ou para Águas Quentes e Sanitárias (AQS). Os custos adotados foram estimados através de uma pesquisa de mercado. Estes podem ser calculados com recurso a informações do CE como a área intervencionada (paredes exteriores, coberturas, pavimentos e janelas). No caso de aparelhos ou equipamentos, os custos podem ser calculados em relação ao seu custo unitário e quantidades por tipologia e número de pisos no caso de edifícios.

Quadro 1 – Variáveis que representam o tipo de intervenções possíveis para a reabilitação de cada edifício da amostra.

Intervenção (Variável)	**Solução**	**Custo [€/m2]**	**Custo [€/unidade]**	**Financiamento FA[%]**	**Limite de Financiamento [€]**
Paredes	Isolamento	50	-	65	4500
Pavimento	Isolamento	30	-	65	4500
Cobertura	Isolamento	30	-	65	4500
Janelas	PVC	260	-	85	1500
AQS	Bomba Ar-Água	-	3750	85	2500
AVAC	Multi-split	-	366	85	2500
Painéis Solares	Painel	-	1000	85	2500
	Bateria	-	500	85	
Painel solar AQS	Painel AQS	-	2000	85	2500

Os objetivos do problema de otimização foram determinados para garantir mínimos consumos energéticos médios por edifício (f_1) representado pela equação (1), e para garantir homogeneidade da amostra através da minimização do desvio padrão (f_2) representado pela equação (2). O consumo energético *E* em kW h m^{-2} é estimado para cada CE através do modelo de IA implementado, e posteriormente, f_1 e f_2 são calculados para um número *r* de intervenções e *n* edifícios. Ainda, a equação (3) representa o custo total médio por edifício (f_3), que foi adicionado como objetivo, para minimizar custos de investimento e investigar as correlações existentes entre os tipos de intervenção nos edifícios, o seu custo e o seu desempenho em responder ao problema de otimização. As seguintes equações ilustram o processo computacional aplicado para o cálculo dos objetivos da otimização:

$$f_{1(x_1,\ \ldots,\ x_{r\times n})} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}\ [\text{kW h m} - 2] \tag{1}$$

$$f_{2(x_1,\ \ldots,\ x_{r\times n})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i\ -\ f_1)^2}{n}}\ [\text{kW h m} - 2] \tag{2}$$

$$f_{3(x_1,\ \ldots,\ x_{r\times n})} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{r} C_{ji}}{n}\ [€] \tag{3}$$

Com base nestas equações, pode-se então formular o problema de otimização o_1 para *i* iterações, de acordo com a equação (4):

$$o_1\left(\begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_{1\ r\times n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i & \cdots & x_{i\ r\times n} \end{bmatrix}\right) = min\left(\begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{1i} & f_{2i} & f_{3i} \end{bmatrix}\right)$$
$$x \in \{0,1\}$$

(4)

2.2 BASE DE DADOS DE EDIFÍCIOS

A BDE utilizada para treinar o modelo de IA consiste em ≈55,000 CE localizados em Portugal, tendo sido desenvolvida e publicada por (Araújo et al. 2023), foi inicialmente tratada para integrar apenas CE com tipos de propriedade de edifícios residenciais, ou frações residenciais, excluindo edifícios comerciais. Além disso, excluíram-se ainda CE cujos valores e indicadores tenham sido calculados com fórmulas anteriores ao imposto pelo Decreto-Lei Nº 80 de 2006 devido à sua disparidade no cálculo dos indicadores energéticos (Portuguese Republic Diary 2006).

No Quadro 2 podem-se observar as informações contidas na BDE para cada CE além dos indicadores do CE como a classe, e consumo energético *E*. No grupo de detalhes gerais do CE os parâmetros existentes são o tipo de propriedade (se corresponde a um edifício ou fração), ano de construção, área útil, pé direito, tipologia (ou número de assoalhadas) e número de pisos. Para as soluções construtivas, a BDE contém o tipo e a área de construção para paredes, coberturas e pavimentos. A nível de equipamentos, documenta-se na BDE os tipos de equipamentos existentes para o uso de AQS e de AVAC, assim como o Nº de equipamentos existentes no CE, e a sua fonte energética (solar, gás, eletricidade, entre outros).

Quadro 2 – Parâmetros relativos a cada CE existentes na Base de Dados de Edifícios utilizada para desenvolver o modelo deste estudo.

Detalhes Gerais	**Soluções construtivas**	**Equipamentos**	**Janelas**
Tipo de propriedade	Tipo de parede	Fonte energética AQS	Área total [m^2]
Ano de construção	Área de paredes [m2]	Fonte energética AVAC	Tipo de janela
Área útil [m2]	Tipo de cobertura	Tipo de AQS	
Pé direito [m]	Área de cobertura [m2]	Tipo de AVAC	
Tipologia	Tipo de pavimento	Nº equipamentos AQS	
Nº de pisos		Nº equipamentos AVAC	

2.3 MODELO DE IA

A previsão das necessidades energéticas anuais de um CE é classificada como um problema de regressão, que prevê valores contínuos. Para treinar o modelo 70% dos CE foram selecionados, enquanto os restantes 30% foram usados para testar a eficácia do modelo. Foi treinado um Modelo de regressão Extra Trees disponível na biblioteca Scikit-Learn para Python (Pedregosa et al. 2019). De acordo com os resultados obtidos por (Araújo et al. 2023a), o modelo apresentou um erro médio de

40 [kW h m^{-2}] e um coeficiente de determinação (R^2) de 0.79, o que se considera aceitável para a implementação deste estudo e para a solução do problema de otimização proposto.

2.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

O modelo desenvolvido foi implementado no problema de otimização descrito. Inicialmente, itera-se sobre cada entrada de CE da amostra para utilizar o modelo e prever as suas necessidades energéticas *E*. Usam-se então as previsões totais da amostra para calcular f_1, f_2 e f_3. Cada entrada do CE é alterada para corresponder às variáveis testadas pelo algoritmo relativas ao número de edifícios e intervenções de reabilitação. Após a conclusão do problema, as soluções ótimas são registadas. As soluções ótimas são definidas como soluções não dominadas e representam a melhor solução para um objetivo que não consegue melhorar sem prejudicar outros, criando um espaço de solução ótimo designado por frente de Pareto (Censor 1977).

Numa primeira instância, o problema é testado para o número total de variáveis de intervenção por edifício, documentado no Quadro 1. É utilizado o algoritmo genético de otimização multiobjectivo NSGAIII (Deb and Jain 2014). O algoritmo corre para 40,000 iterações, ao longo de 25 divisões.

Este modelo e o problema de otimização descrito neste estudo são também implementados numa aplicação web que permite ao utilizador determinar a sua amostra de edifícios a otimizar, definir as variáveis, e os seus custos de construção. Seguidamente, o utilizador pode escolher o algoritmo de otimização e o número de iterações desejados. A lista de algoritmos de otimização compreende 4 tipos de algoritmo genético para otimização multiobjectivo: NSGAII (Deb et al. 2002), NSGAIII (Deb and Jain 2014), SPEA2 (Zitzler, Laumanns, and Thiele 2001), e IBEA (Eckart and Künzli 2004).

3 RESULTADOS

Os resultados para o problema de otimização solucionado para 40,000 iterações com o algoritmo NSGAIII é ilustrado na Figura 1. Aqui pode-se consultar a frente de Pareto obtida pelo algoritmo em relação ao consumo energético médio por edifício f_1, desvio padrão do consumo energético da amostra f_2 e custo médio de intervenções por edifício f_3. Na figura, podem-se observar dois pontos em destaque, o resultado da solução onde se aplicam todas as intervenções em todos os edifícios e o resultado onde não se aplicam nenhumas intervenções de reabilitação. Estes dois resultados permitem-nos avaliar o espaço de solução obtido.

Os resultados obtidos variam entre ≈96 e ≈178 kW h m^{-2} para f_1, e ≈16 e ≈97 kW h m^{-2} para f_2. Ainda, os custos médios de intervenção por edifício situam-se entre ≈1000 e ≈10000 €. Analisando os dados, consegue-se observar uma correlação negativa entre menores f_1 e f_2, e maiores custos de intervenção f_3. Sendo que melhores soluções podem chegar a custar entre 5,000 e 10,000 € por edifício. Ainda, observa-se que com um custo médio por edifício de ≈1500 €, obtém-se melhorias significativas de ≈50% de redução do consumo energético face ao desempenho da amostra sem nenhuma intervenção.

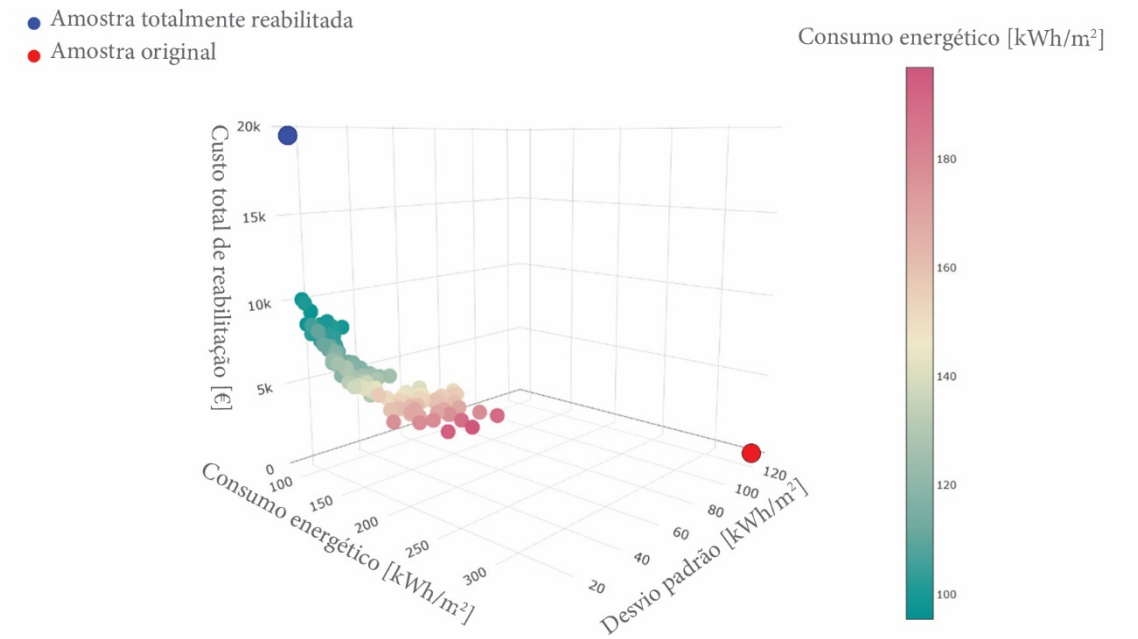


Figura 1 – Frente de Pareto obtida ao fim de 40,000 iterações com o algoritmo NSGA III. Vermelho e azul representam a amostra original e totalmente reabilitada respetivamente.

O problema de otimização trata variáveis binárias, isto é, 8 tipos de intervenção por edifício, onde cada intervenção pode ou não ser implementado. Como tal, podemos ainda analisar os resultados da análise aglomerando todos os edifícios por tipo de intervenção. A Figura 2 ilustra a mesma frente de Pareto obtida na Figura 1, mas categorizada por tipo de intervenção. Assim, consegue-se observar o total de intervenções na amostra por tipo de intervenção (e.g., total de edifícios com isolamento de paredes; janelas ou coberturas).

Pode-se então observar os resultados relativamente à percentagem de intervenções face ao total da amostra. Em relação ao isolamento de paredes pode-se verificar que as melhores soluções apresentam cerca de 65 a 100% da amostra reabilitada através deste método. O isolamento de pavimentos e coberturas apresenta um resultado mais homogéneo entre ≈50 e ≈65%. Intervenções como a reabilitação de janelas (entre ≈20%), e bombas de calor ar-água são presença menos frequente nas soluções ótimas. Finalmente, pode-se verificar que a instalação de equipamentos AVAC mais eficientes aparenta ser a intervenção mais frequente (entre ≈85 e 100%) na amostra em todas as soluções ótimas obtidas neste processo. Resultados mais homogéneos indicam que relativamente o mesmo número de intervenções é feito ao longo de todo o espaço de solução independentemente da sua densidade de aplicação na amostra. Por sua vez, resultados mais heterogéneos indicam tipos de intervenção que têm mais impacto nos objetivos da otimização em relação à amostra de edifícios.

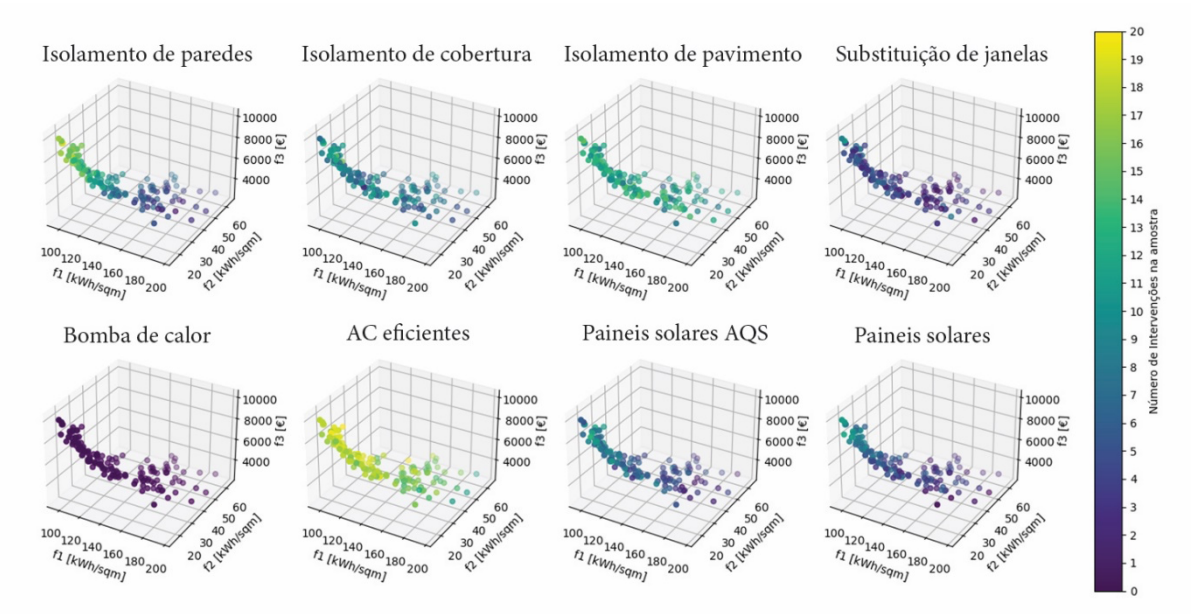


Figura 2- Frente de Pareto obtida e categorizada por quantidade de intervenções para a reabilitação da amostra de edifícios.

Finalmente, este problema de otimização e o modelo desenvolvidos são implementados numa aplicação web[2] ilustrada na Figura 3. Seguindo os passos descritos na introdução, o utilizador consegue providenciar uma amostra de edifícios, definir as variáveis e tipos de intervenção para reabilitação que quer testar, assim como o algoritmo de otimização e o número de iterações. Os resultados da otimização são então disponibilizados através de uma figura interativa da frente de Pareto obtida, assim como em formato ".csv" disponível para transferência.

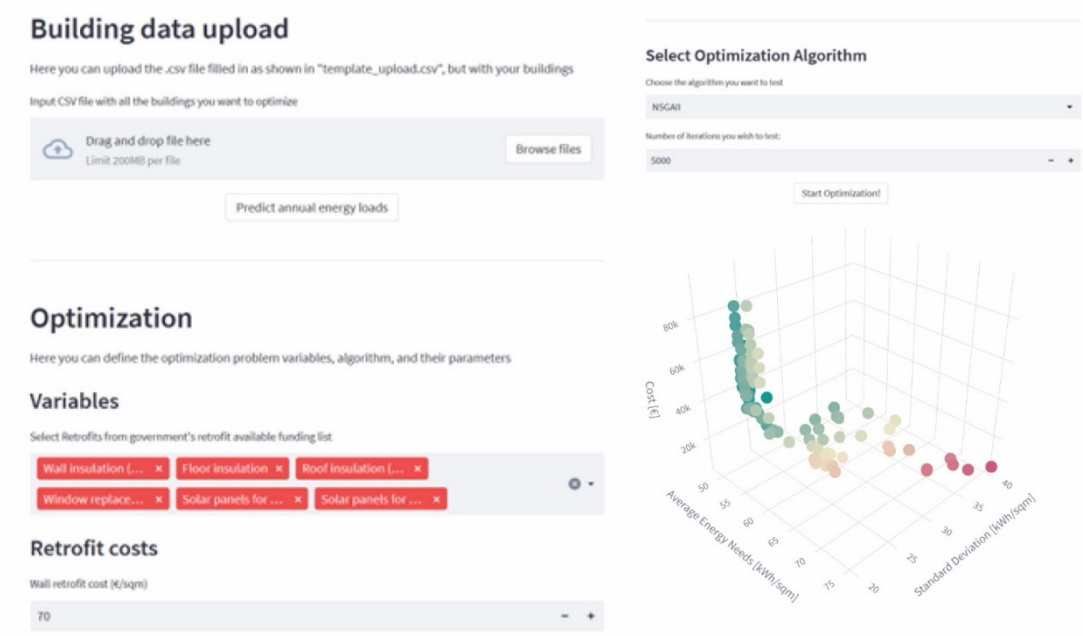


Figura 3 – Excertos da aplicação web desenvolvida para a otimização da reabilitação de uma amostra de edifícios em Portugal.

[2] https://goncalo-araujo-energy-app-adene-policy-j4nrn8.streamlit.app/

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram correlações inversas entre o custo médio da reabilitação de um edifício e as necessidades energéticas resultantes do processo de reabilitação. Demonstram também que, para a amostra estudada, com valores de investimento médio de ≈1,500 € por edifício consegue-se obter uma redução de até 50% das necessidades energéticas. Observa-se ainda que o espaço de soluções ótimas converge quando se aproxima da solução mais cara que representa 100% da reabilitação da amostra. Relativamente aos resultados obtidos que ilustram baixas percentagens de renovação como janelas, bombas de calor, ou painéis solares, podem ser explicados pelas características dos edifícios da amostra que podem não beneficiar tanto desta intervenção, e também devido ao erro associado ao custo estimado para a intervenção, que pode ser variável.

O tipo de intervenção mais utilizado nas soluções ótimas aparenta ser a implementação de equipamentos AVAC eficientes. Importa reiterar que o modelo de IA usa uma BDE de CE existentes, calculados dentro do Decreto-Lei 80/2006 (Portuguese Republic Diary 2006). Como tal, o modelo estima impactos significantes dos equipamentos AVAC na redução das necessidades energéticas dos edifícios. O que pode indicar que o papel destes equipamentos em obter melhores necessidades energéticas pode estar a ser sobrestimado (devido à frequência de uso e horários considerados). Em alternativa, algumas intervenções passivas como o isolamento de paredes, coberturas, e pavimentos em alguns edifícios apresentam resultados positivos para o consumo energético médio e o desvio padrão da amostra.

A implementação do modelo desenvolvido demonstrou a sua aplicação em casos de análise de políticas para a reabilitação de edifícios. Em particular, que a informação obtida através do programa de CE pode ser valiosa para simplificar processos de previsão de indicadores energéticos através de técnicas de IA, assim como assistir à implementação de novas estratégias de políticas de desenvolvimento. No entanto, este estudo apresenta algumas limitações relativamente ao modelo de IA desenvolvido e em relação ao problema de otimização implementado. Por um lado, a eficácia do modelo pode ser melhorada. Por outro, pode-se considerar que o problema de otimização para 20 edifícios e 40,000 iterações não encontrou o espaço de solução ótimo total. Isto indica que mais iterações seriam necessárias para encontrar novas soluções. Aumentando o número de edifícios na amostra, e considerando 8 tipos de intervenções, significa que o número de combinações possíveis aumentaria exponencialmente, tornando o processo impraticável computacionalmente.

Para aumentar a eficácia do modelo podem-se explorar novas abordagens para o desenvolvimento deste assim como para o tratamento da base de dados utilizada. Em especial, podem-se explorar: modelos de IA alternativos (e.g., redes neuronais) com melhor eficácia; a otimização dos parâmetros de execução do modelo para maximizar a eficácia; algoritmos de tratamento de dados para selecionar e filtrar os CE mais ilustrativos do problema, entre outros. Para lidar com o aumento do número de edifícios da amostra e, consequentemente, no aumento exponencial do número de variáveis de intervenções, podem-se explorar técnicas de paralelização computacional. Isto permite segmentar uma amostra grande em várias amostras, e usar vários núcleos de um processador para computar e otimizar múltiplas amostras.

5 CONCLUSÕES

O processo de certificação energética traz enormes benefícios para a auditoria, classificação e categorização do parque edificado de um país. Consequentemente, os certificados energéticos apoiam a implementação, prática, e teste de políticas de desenvolvimento para se atingirem metas de desenvolvimento sustentável. No entanto, apesar destes benefícios e de novas políticas

implementadas, o rácio de renovação do parque edificado global mantém-se baixo. Como tal, é recomendado o desenvolvimento de novas metodologias de análise e decisão. Em particular, técnicas de Inteligência Artificial podem contribuir para a aceleração e eficácia do processo de renovação do parque edificado.

Neste estudo, apresenta-se uma implementação de um processo de otimização da reabilitação de uma amostra de 20 edifícios com baixas classes de certificado energético em Lisboa, Portugal. Este processo é alavancado por um modelo de Inteligência artificial capaz de prever as necessidades energéticas de um certificado com muito menos parâmetros que o necessário para o cálculo de um certificado. Os resultados obtidos demonstram as relações existentes entre o custo de reabilitação da amostra, e os tipos de intervenção aplicados a cada edifício. A análise dos resultados indica que com custos baixos de reabilitação por edifício se podem alcançar até ≈45% de reduções das necessidades energéticas médias da amostra. Ainda, com custos altos, podem-se obter não só até ≈70% de redução da necessidade energética média da amostra, mas também um menor desvio padrão destas necessidades. Isto garante uma maior homogeneidade entre os edifícios.

Este estudo permite o desenvolvimento de novas abordagens para análises complexas da restruturação e renovação do parque edificado. Assim, tem o potencial de explorar novas abordagens para implementação de políticas de desenvolvimento para atingir metas de desenvolvimento sustentável. Para se atingirem estes objetivos, é necessário ainda explorar métodos para aumentar a eficácia dos modelos desenvolvidos, e para aumentar a capacidade de edifícios a analisar. O desenvolvimento e implementação destes modelos e análises podem também ser feitos em conjunto com outros sectores. Em particular, com realidade virtual e realidade aumentada, estes modelos e análises conseguem providenciar ambientes de visualização e edição colaborativos e instantâneos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido como parte do Projeto BE.Neutral – Agenda de Mobilidade para a neutralidade carbónica nas cidades, contrato número 35, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) através da União Europeia no âmbito do Next Generation EU. OS autorES agradeceM o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020); UIDB/50009/2020 DA UNIDADE DE INVESTIGAÇÃO IST-ID. Esta pesquisa foi apoiada por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com a bolsa de doutoramento ao abrigo do contrato FCT 2021.04849.BD.

REFERÊNCIAS

Araújo, G R, Ricardo Gomes, Paulo Ferrão, and M Glória Gomes. 2023a. “Optimizing Building Retrofit through Data Analytics: A Study of Multi-Objective Optimization and Surrogate Models Derived from Energy Performance Certificates.” *Energy and Built Environment*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.002.

———. 2023b. “Optimizing Building Retrofit through Data Analytics: A Study of Multi-Objective Optimization and Surrogate Models Derived from Energy Performance Certificates.” *Energy and Built Environment*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.002.

Buratti, C, M Barbanera, and D Palladino. 2014. “An Original Tool for Checking Energy Performance and Certification of Buildings by Means of Artificial Neural Networks.” doi:10.1016/j.apenergy.2014.01.053.

Censor, Yair. 1977. "Pareto Optimality in Multiobjective Problems." *Applied Mathematics & Optimization* 4 (1): 41–59. doi:10.1007/BF01442131.

Deb, Kalyanmoy, and Himanshu Jain. 2014. "An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 18 (4). IEEE: 577–601. doi:10.1109/TEVC.2013.2281535.

Eckart, Zitler, and Simon Künzli. 2004. "Indicator-Based Selection in Multiobjective Search." In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 832–42. Berlin: Springer.

European Parlament. 2018. "Directiva 2018/844 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 30 de Maio de 2018 Que Altera a Diretiva 2010/31/UE Relativa Ao Desempenho Energético Dos Edifícios e a Diretiva 2012/27/UE Sobre a Eficiência Energética." *Jornal Oficial Da União Europeia* L156: 75–91.

European Parliament. 2018. *Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency*. *Oficial Journal of the European Union*. Vol. L 156/76.

Fan, Yuling, and Xiaohua Xia. 2018. "Building Retrofit Optimization Models Using Notch Test Data Considering Energy Performance Certificate Compliance." *Applied Energy* 228 (April). Elsevier: 2140–52. doi:10.1016/j.apenergy.2018.07.043.

Gouveia, Joao Pedro, and Pedro Palma. 2019. "Harvesting Big Data from Residential Building Energy Performance Certificates: Retrofitting and Climate Change Mitigation Insights at a Regional Scale." *Environmental Research Letters* 14 (9). IOP Publishing. doi:10.1088/1748-9326/ab3781.

Hardy, A., and D. Glew. 2019a. "An Analysis of Errors in the Energy Performance Certificate Database." *Energy Policy* 129 (June). Elsevier: 1168–78. doi:10.1016/j.enpol.2019.03.022.

———. 2019b. "An Analysis of Errors in the Energy Performance Certificate Database." *Energy Policy* 129 (June). Elsevier: 1168–78. doi:10.1016/j.enpol.2019.03.022.

Khayatian, Fazel, Luca Sarto, and Giuliano Dall'O'. 2016. "Application of Neural Networks for Evaluating Energy Performance Certificates of Residential Buildings." *Energy and Buildings* 125. Elsevier B.V.: 45–54. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.067.

Ministério do Ambiente. 2023. "Fundo Ambiental, Ministério Do Ambiente." *Https://Www.Fundoambiental.Pt/Apoios-Prr/C13-Eficiencia-Energetica-Em-Edificios/01c13-I01-Paes-Ii.Aspx*.

Mourão, Joana, Ricardo Gomes, Luís Matias, and Samuel Niza. 2019. "Combining Embodied and Operational Energy in Buildings Refurbishment Assessment." *Energy and Buildings* 197 (August). Elsevier Ltd: 34–46. doi:10.1016/j.enbuild.2019.05.033.

Nidam, Yael, Ali Irani, Jamie Bemis, and Christoph Reinhart. 2023. "Census-Based Urban Building Energy Modeling to Evaluate the Effectiveness of Retrofit Programs." *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*.

Pasichnyi, Oleksii, Jörgen Wallin, Fabian Levihn, Hossein Shahrokni, and Olga Kordas. 2019. "Energy Performance Certificates — New Opportunities for Data-Enabled Urban Energy Policy

Instruments?" *Energy Policy* 127 (November 2018). Elsevier Ltd: 486–99. doi:10.1016/j.enpol.2018.11.051.

Pedregosa, Fabian, Gael Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, et al. 2019. "Scikit-Learn: Machine Learning in Python." *Journal of Machine Learning Research* 12: 2825–30.

Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, Rocío González, and Ismael R. Maestre. 2009. "A Review of Benchmarking, Rating and Labelling Concepts within the Framework of Building Energy Certification Schemes." *Energy and Buildings* 41 (3): 272–78. doi:10.1016/j.enbuild.2008.10.004.

Portuguese Republic Diary. 2006. *Decree-Law Nº 80/2006*. *Portuguese Republic Diary*. Portugal.

———. 2013. *Decree-Law Nº 118/2013*. *Portuguese Republic Diary*. Vol. 118. Portugal.

Watts, Christabel, Mark F Jentsch, and Patrick AB James. 2008a. "Evaluation of Domestic Energy Performance Certificates in Use." *Building Services Engineering Research and Technology* 32 (4): 361–76. doi:10.1177/0143624411404486.

———. 2008b. "Evaluation of Domestic Energy Performance Certificates in Use." *Building Services Engineering Research and Technology* 32 (4): 361–76. doi:10.1177/0143624411404486.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA CAPTURA DE CARBONO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DURANTE A FASE CONSTRUTIVA: UM ESTUDO DE CASO

Dayana Ruth Bola Oliveira [a], Melissa Pastorini Proença [b], Kathleen Dall Bello de Souza Risson [c], Carlos Alberto Damoliner[d], Edna Possan[e]

[a] Pós-doutoranda (Universidade Federal da Integração Latino-Americana e Professora Centro Universitário Dinâmica das Cataratas – UDC, Rua Castelo Branco, 440, 85852-010, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil), dayruth@gmail.com

[b] Doutoranda (Universidade Federal do Paraná e Técnica de laboratório no Instituto Federal do Paraná, Av. Araucária, 780, 85860-000, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil), melissa.pproenca@gmail.com

[c] Doutoranda (Universidade Federal da Integração Latino-Americana e Professora no Instituto Federal do Paraná, Av. Araucária, 780, 85860-000, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil), kathleen.risson@gmail.com

[d] Engenheiro Civil (CADEP Engenharia e consultoria, Rua Poços de Caldas, 380, 85869-570, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil) demoliner.carlos@gmail.com

[e] Professora Associada (Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Avenida Tancredo Neves 6731, 85867-970, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil), epossan@gmail.com

RESUMO

Uma parcela das emissões da indústria cimenteira pode ser compensada pela captura de carbono devido à carbonatação natural de materiais a base de cimento e cal, a qual tem início na fase construtiva e é potencializada na demolição. Nesse sentido, este estudo avalia o potencial de captura de carbono em argamassas de revestimentos devido à carbonatação natural durante a fase construtiva de uma edificação de múltiplos pavimentos com estrutura de concreto e envoltórias de alvenaria revestidas com argamassa. As amostras foram extraídas em ambiente interno e externo desprotegido em diferentes pavimentos com tempos de aplicação do revestimento variando entre 1 e 3 meses. A frente de carbonatação foi verificada por meio do indicador de pH com aspersão de fenolftaleína e o potencial de captura de CO_2 determinado por análise termogravimétrica. Constatou-se que a depender da espessura de aplicação do revestimento e do tempo em aberto, o material pode ser totalmente carbonatado. Para uma emissão de produção de 168 kg.CO_2/m³, a argamassa pode capturar até 100 kg.CO_2/m³ se totalmente carbonada. Neste estudo constatou-se carbonatação parcial, sendo fixado 65 Kg.CO_2/m³, totalizando 67 toneladas de CO_2 capturado durante a construção do edifício o que representa 39% das emissões de produção.

Palavras-chave: Fixação de carbono, emissões de CO_2, sustentabilidade, netzero.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor econômico que participa ativamente na evolução dos países, por meio do desenvolvimento e construção de infraestrutura urbana e habitação (Schaffartzik e Duro 2022; Scrivener, John e Gartner 2018), gerando emprego e renda. Porém também contribui na degradação do meio ambiente, pelas emissões de carbono, consumo de recursos naturais e geração de resíduos (Adesina 2020; Akhtar e Sarmah 2018). Dentro deste setor a indústria cimenteira responde por ~7% das emissões globais de CO_2 (WBCSD e IEA 2018; IEA 2018), com emissões entre 0,845 e 1,049 toneladas de CO_2/tonelada de clínquer produzido (SIDAC 2024).

Com avanço da crise climática em função do aquecimento global intensificado pela elevada concentração de CO_2 na atmosfera, recai sobre os setores produtivos a necessidade de uma produção mais limpa e sustentável. O aumento das temperaturas do planeta implica no derretimento de calotas polares e geleiras, elevação do nível do mar, com eventos climáticos extremos e de maior intensidade (Pörtner *et al.* 2022; Scafetta 2024), afetando os ecossistemas, a biodiversidade e trazendo riscos à segurança hídrica e alimentar em diversas regiões do mundo (Abbass *et al.* 2022; Hansen *et al.* 2023; Pörtner *et al.* 2022). Devido a isso, o combate às alterações climáticas é um dos pontos centrais dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a precificação de carbono é uma das estratégias globais que está sendo implementada para reduzir as emissões antropogênicas de CO_2 (PMR e ICAP 2016; CPLC 2021). Porém, para que esta alternativa efetivamente tenha efeitos, precisa-se de uma abrangência mundial (Hansen *et al.* 2023). Todavia a precificação de carbono possivelmente agregará o custo das emissões aos insumos e produtos, indicando que a redução das emissões, com a geração de produtos e processos de baixo carbono tem implicações em termos climáticos, sociais e econômicos.

As principais estratégias para redução das emissões de carbono associadas à produção do cimento envolvem o uso de combustíveis renováveis, eficiência energética e a captura e armazenamento de carbono (CCUS – do inglês “Carbon Capture Utilization and Storage”) (IEA 2018; WBCSD e IEA 2018). Devido à composição química, as matrizes cimentícias possuem potencial de capturar o CO_2 atmosférico através da carbonatação natural ao longo de todo ciclo de vida, atuando como sumidouro de CO_2 e compensando parcialmente as emissões da produção (Felix, Carrazedo e Possan 2021; Pade e Guimaraes 2007; Zajac *et al.* 2022).

A carbonatação é uma neutralização físico-química, onde o principal produto precipitado é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). No processo, o CO_2 penetra nos poros da matriz cimentícia (argamassa ou concreto) e reage com o hidróxido de cálcio, hidróxidos de silicatos de cálcio (Neves, Branco e De Brito 2013), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH). Assim, os óxidos alcalinos são convertidos em carbonatos formando produtos estáveis principalmente calcita (Neves Junior *et al.* 2013) promovendo armazenamento de longo prazo de CO_2 (Wang, Guo e Ling 2022; Sharma e Goyal 2018). Esse processo ocorre de forma natural assim que o material a base de cimento está em contato direto com o ar atmosférico, ou em processos especiais como a cura carbônica, onde o CO_2 é injetado de forma intencional à matriz cimentícia.

Em concretos com finalidade estrutural a reação de carbonatação é vista como deletéria, pois reduz o pH despassivando a amadura e corroborando na oxidação e corrosão do aço, prejudicando o desempenho e durabilidade das estruturas (Ashraf 2016; Pade e Guimaraes 2007). Nos casos de matrizes cimentícias não armadas, os carbonatos promovem o preenchimento dos poros, aumentando a resistência, propiciando uma reação benéfica (Possan *et al.* 2017).

Neste sentido, matrizes cimentícias (não armadas), como argamassas de revestimento, expostas ao ambiente com grandes áreas de superfície em contato com o CO_2 atmosférico são de grande interesse

para atuação como fixadoras de carbono. Para elementos de concreto a carbonatação é estudada há quase um século, haja vista a preocupação com durabilidade, sobretudo a corrosão das armaduras. Em revestimentos argamassados e elementos não armados, a carbonatação vem sendo estudada nas últimas décadas com o surgimento do tema de captura de carbono, demandando de estudos que indiquem a velocidade de difusão de carbono nestes materiais, sobretudo na fase construtiva. Neste sentido, este estudo visa avaliar a velocidade de carbonatação natural e o potencial de captura de carbono em revestimentos argamassados durante a fase construtiva (tempo em aberto, ou seja, sem aplicação de material de acabamento) de um empreendimento de múltiplos pavimentos com estrutura de concreto e envoltórias de alvenaria revestidas com argamassa estabilizada.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO

A pesquisa foi conduzida no edifício comercial em construção localizado no centro da cidade de Foz do Iguaçu, Paraná - Brasil (Figura 1). O objetivo do estudo foi avaliar o potencial de captura de carbono em argamassas de revestimentos devido à carbonatação natural durante a fase construtiva da edificação que conta com múltiplos pavimentos com estrutura em concreto armado e envoltórias de alvenaria de bloco de concreto e cerâmico revestidas com argamassa (chapisco e camada única).

Figura 1 – Localização da edificação em análise

Durante a fase de execução do revestimento das envoltórias do edifício, foram extraídas amostras de revestimentos argamassados em diferentes alturas e locais a fim de se obter informações em exposições de CO_2 distintas (Figura 2 e Tabela 1).

Figura 2 – Localização dos pontos de ensaio

Tabela 1 – Informações dos pontos de extração de amostras

Pvto	Ponto		Altura da extração (m)	Ambiente
Térreo	1	A	2,20	Interno
		B	1,50	
		C	0,50	
	2	A	2,20	Interno
		B	1,50	
		C	0,50	

Pvto	Ponto		Altura da extração (m)	Ambiente
3º	3	A	2,20	Externo desprotegido
		B	1,50	
		C	0,50	
	4	B	1,50	Externo desprotegido

O edifício foi revestido com argamassa estabilizada fornecida por uma empresa especializada, com proporção por m³ de 220 kg de cimento Portland CP IV, 40 kg de cal hidratada, 1300 kg de agregado miúdo, 1 litro de aditivo incorporador de ar, 2 litros de aditivo estabilizador de pega e 200 litros de água. Densidade de massa de 1800 kg/m³. A aplicação do material nas paredes foi manual, totalizando 1033 m³ de argamassa. As amostras foram extraídas uma semana antes da aplicação do material de acabamento (pintura).

2.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE AMOSTRAS

O dispositivo de corte para extração das amostras consistiu em um copo cilíndrico com borda diamantada (serra-copo). O corte foi realizado perpendicular à base, à seco, até atingir o substrato. Com uma talhadeira realizou-se a retirada da amostra, conforme procedimentos exemplificados na Figura 3, os quais foram encaminhados para o laboratório.

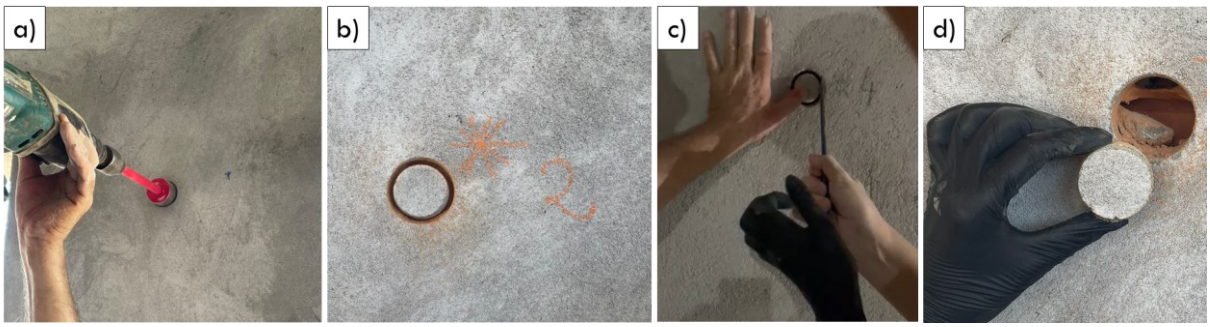


Figura 3 – Procedimento de coleta de amostras a) Dispositivo de corte; b) Corte à seco até atingir o substrato; c) Retirada de amostra com talhadeira; d) Amostra após extração.

2.3 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CARBONO

As amostras extraídas foram cortadas com auxílio de morsa para exposição da seção longitudinal e aspersão de fenolftaleína (solução de 70% de álcool, 30% de água destilada e 1% de fenolftaleína). Após 10 minutos, as profundidades de carbonatação foram aferidas com paquímetro digital em três pontos distintos da argamassa (Figura 4).

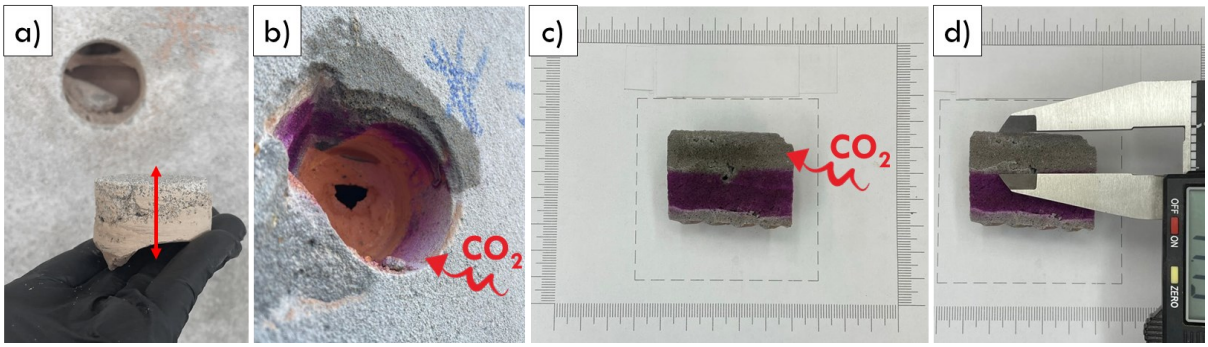


Figura 4 – a) Extração da amostra a ser analisada; b) Aspersão de fenolftaleína no local da extração; c) Aspersão de fenolftaleína para evidenciar zonas carbonatadas (CA) e não carbonatadas (NC); d) Análise da profundidade carbonatada e posterior coleta de amostras das zonas para ensaio de TG.

Com auxílio de espátula fez-se a remoção de pequenos pedaços da argamassa da zona Carbonatada (CA) e não carbonatada (NC) para posterior moagem em almofariz de ágata, peneiramento (mesh #100) e acondicionamento em eppendorf, para encaminhamento ao ensaio termogravimétrico. O potencial de fixação de carbono foi analisado com base na curva termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG). O ensaio foi realizado no equipamento Percking Elmer STA 8000, em cadinho de alumina com aproximadamente 50 mg de massa de amostra (Scrivener, Snellings e Lothenbach 2016).
A partir das análises térmicas das amostras carbonatadas (CA) e não carbonatadas (NC) foram plotados os gráficos de TG e DTG no programa OriginPro 8.5 em percentuais de massa (Figura 5). As temperaturas analisadas estão entre 400°C e 750°C, período durante o qual o CO_2 é liberado devido a decomposição do $CaCO_3$.

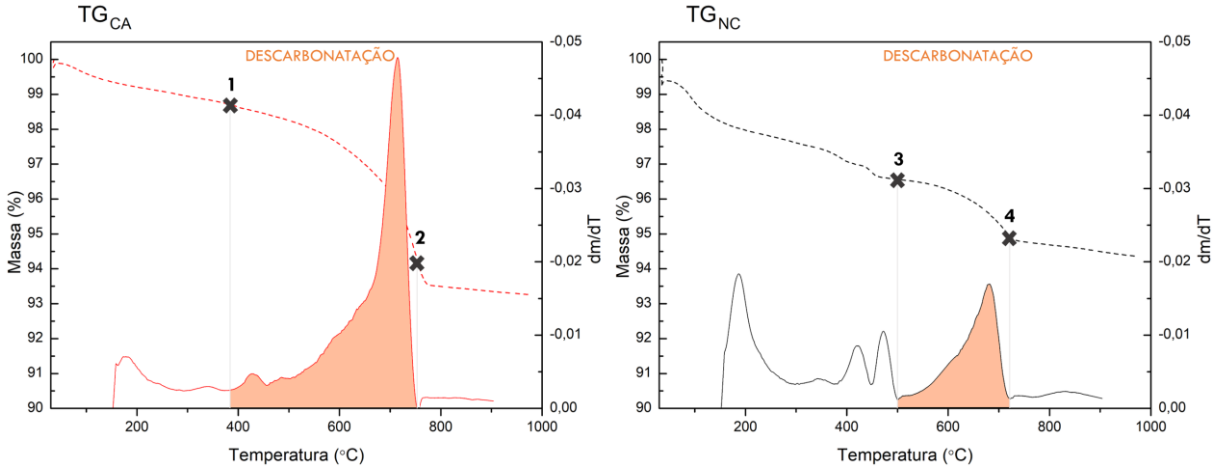


Figura 5 – Exemplo de perfis termogravimétricos de amostras CA e NC e pontos de extração de dados

Ressalta-se que uma pequena quantidade de possíveis carbonatos de magnésio hidratados amorfos, que também poderiam descarbonizar nessa faixa de temperatura, foram ignorados no cálculo de absorção de CO_2 (Li *et al.* 2023; Winnefeld *et al.* 2019; Singh, Hay e Celik 2022), assim o sequestro de CO_2 de todas as amostras é subestimado, mas o efeito ainda pode ser observado.

A partir do percentual de massa oriundo da análise da TG, a fixação de CO_2 na amostra (captura real) e a captura potencial foram calculadas (Equações de 1 a 6).

Equação 1

$$Captura\ de\ CO_2\ da\ amostra\ (\%) = \left(\left(TG_{CA}^{1} - TG_{CA}^{2}\right) - \left(TG_{NC}^{3} - TG_{NC}^{4}\right)\right) * 0{,}44$$

Equação 2

$$CaO_{eq.CaCO3}\ (\%) = CO_2 capturado\ (\%) * (\frac{MM_{CaO}}{MM_{CO_2}})$$

Equação 3

$$CaO_{livre}(\%) = CaO_{eq.CaCO3}\ (\%) - CaO_{FRX}$$

Equação 4

$$Captura\ Potencial\ de\ CO_2\ (\%) = CaO_{livre}(\%) * (\frac{MM_{CO_2}}{MM_{CaO}})$$

Equação 5

$$Grau\ de\ carbonatação\ da\ amostra\ (\%) = (\frac{Captura\ de\ CO_2\ da\ amostra\ (\%)}{Captura\ Potencial\ de\ CO_2\ (\%)} * 100$$

Equação 6

$$Captura\ Potencial\ de\ CO_2\ (kg.\frac{CO_2}{m^3}) = \frac{Captura\ Potencial\ de\ CO_2\ (\%)}{100} * Massa\ carbonatável_{argamassa\ (kg/m^3)}$$

Onde:

- $Captura\ de\ CO_2\ da\ amostra$ = % de massa retida oriunda da análise de TG da amostra;
- MM_{CaO} = massa molar do CaO (56 g/mol);
- MM_{CO_2}= massa molar do CO_2 (44 g/mol);
- CaO_{FRX} = teor proporcional de CaO presente no cimento Portland CP IV (45,27%) e na cal (73,07%) oriundos da fluorescência de raios-x, 49,55%;
- $Captura\ Potencial\ de\ CO_2$ = potencial total passível de carbonatação;
- $Massa\ carbonatável_{argamassa\ (kg/m^3)}$ = teor de massa carbonatável na argamassa (cimento Portland CP IV 220 kg/m³ e cal 40 kg/m³, total de 260 kg/m³).

O cálculo das emissões de CO_2 foram baseadas nas proporções de materiais para produção do m³ de argamassa e nos dados da literatura, sendo: emissões do cimento Portland CP IV (45 a 85% de clínquer - ABNT NBR 16697, 2018) média 0,947 kg.CO_2/kg de clínquer (SIDAC 2024). Emissões da cal 0,616 kg.CO_2/kg (John, Punhagui e Cincotto, 2014) e emissões do agregado 0,006 kg.CO_2/kg (Paz, 2023). As emissões dos aditivos não foram consideradas.

Tendo-se a quantidade de CO_2 fixada (kg/m³ de argamassa) e as emissões da produção da argamassa (kg.CO_2/m³), realizou-se o balanço das emissões, ou seja, a diferença entre o quanto a produção da argamassa emite e o quanto captura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carbonatação em materiais cimentícios ocorre principalmente devido à penetração do CO_2 atmosférico e é mais acentuada quanto maior o tempo de exposição do substrato, maior espessura e disponibilidade de área carbonatável, como evidenciado na Tabela 2 e Figura 6. Para a maior parte dos pontos avaliados, constatou-se carbonatação parcial, indicando que o tempo em aberto para as condições de contorno (clima, constituintes da mistura e espessura de aplicação) não conduziram à completa carbonatação da amostra. No ponto 2 a carbonatação foi total, ou seja, a profundidade carbonatada foi igual a espessura do revestimento, alcançando o potencial máximo de captura de carbono.

Tabela 2 - Profundidade carbonatada e captura de carbono

Ponto		Altura da extração (m)	Ambiente	Medição de CO_2 (CO_2ppm)	Profundidade carbonatada do revestimento (mm)				Profundidade carbonatada média (mm)	Tempo em aberto**	
					L1	L2	L3	L médio		Dias	Semanas
1	1A	2,20m	Interno	482	10,58	9,99	8,71	9,76	14,18	25	3,6
	1B	1,50m			7,75	8,00	7,95	7,90			
	1C	0,50m			8,00	7,50	7,50	7,67			
2	2A	2,20m	Interno	480		25 mm*		25,00		25,00	
	2B	1,50m				20 mm*		20,00		20,00	10,7
	2C	0,50m				20 mm*		20,00		20,00	
3	3A	2,20m	Externo Desprotegido	493	7,11	16,46	17,15	13,57		55	7,9
	3B	1,50m			10,26	10,88	10,14	10,43			
	3C	0,50m			12,06	14,62	13,59	13,42			
4	4B	1,50m	Externo Desprotegido	498	13,90	13,60	14,65	14,05		55	7,9

*Carbonatação completa; ** Período compreendido entre a aplicação do revestimento à extração da amostra.

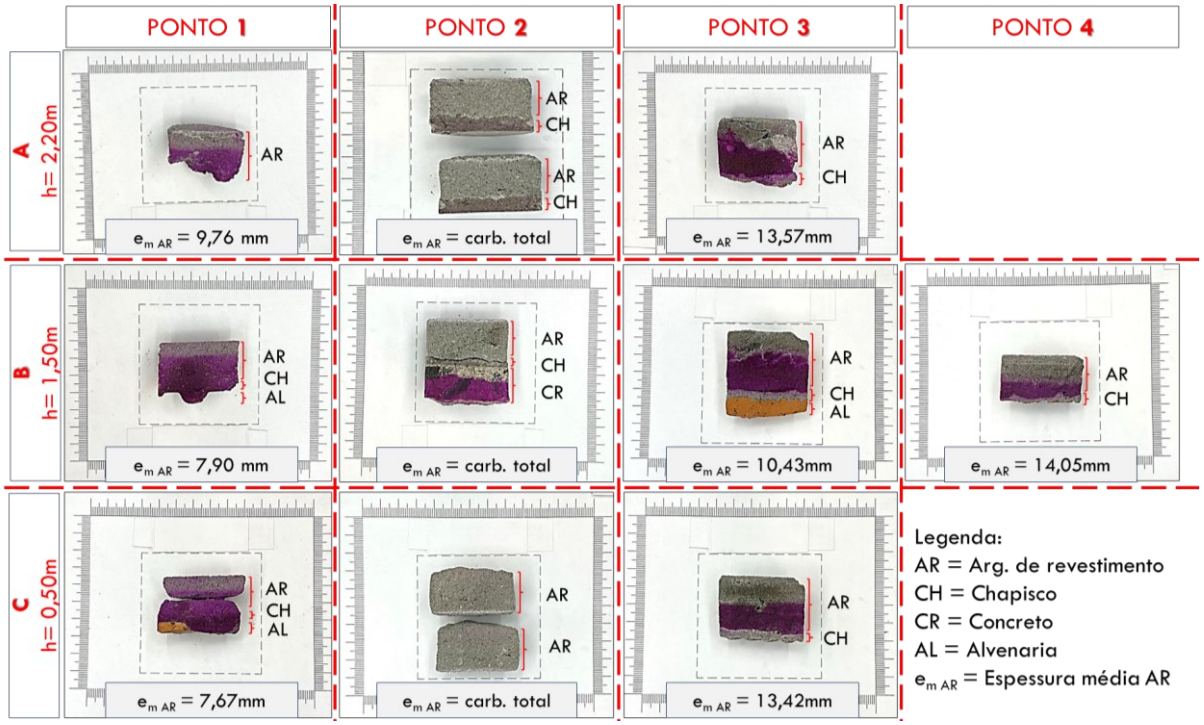


Figura 6 – Pontos de aferição da profundidade carbonatada

A solução fica incolor em meio carbonatado e adquire coloração magenta em meio íntegro. Na reação de carbonatação o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera se difunde através da porosidade da argamassa e reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) oriundo da hidratação do cimento, formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A velocidade em que a difusão de CO_2 ocorre está relacionada ao local, ao tempo de exposição ao CO_2, umidade, temperatura, tamanho de poros e a química do cimento, e determina o tempo em aberto necessário para que haja a carbonatação total do revestimento argamassado, ou seja, para que este atinja todo seu potencial de captura de carbono.

Nos pontos 1, 3 e 4 a profundidade carbonatada foi aferida, resultando em uma média de 8,44 mm para o ambiente interno e de 12,87 mm para o externo, demonstrando que a difusão de CO_2 em ambientes externos expostos a intempéries é mais elevada. A profundidade carbonatada média da

edificação foi de 14,18 mm, de uma espessura de revestimento de 22 mm, o que corresponde a um uma captura real de 65%.

Já a captura potencial foi estimada com relação ao volume total passível de carbonatação, determinadas por termogravimetria (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados da termogravimetria e análise de fixação de carbono

Dados da termogravimetria										
Dados da amostra				Amostra Não carbonatada			Amostra Carbonatada			
Ambiente	Pvto	Ponto	Tempo em aberto (dias)	TG^1_{NC} (%)	TG^2_{NC} (%)	$CaCO_3$ (%)	TG^1_{CA} (%)	TG^2_{CA} (%)	$CaCO_3$ (%)	
Interno	Térreo	1A	25	98,04	96,79	1,25	98,21	95,91	2,30	
Externo desprotegido	3Pvto	3A	55	96,54	95,02	1,52	98,49	93,48	5,01	
	3Pvto	3B	55	96,43	95,07	1,36	98,55	93,22	5,33	
	3Pvto	3C	55	96,82	95,57	1,25	97,95	92,68	5,27	
	3Pvto	4B	55	97,14	95,26	1,88	98,40	93,00	5,40	

Fixação de carbono								
Ambiente	Ponto	CO_2 capturado (%)	Teor de $CaCO_3$ (%)	$CaO_{eq.CaCO3}$ (%)	CaO_{FRX} (%)	CaO_{livre} (%)	Captura Potencial em relação ao CaO_{livre} (%)	Captura Potencial ($kgCO_2/m^3$)
Interno	1B	0,46	1,05	0,59	49,55	48,96	38,47	100,02
Externo desprotegido	3A	1,54	3,49	1,95		47,59	37,39	97,22
	3B	1,75	3,97	2,22		47,32	37,18	96,68
	3C	1,77	4,02	2,25		47,30	37,16	96,62
	4B	1,55	3,52	1,97		47,58	37,38	97,19

O potencial de captura evidencia que os ambientes internos favorecem a fixação de CO_2 em relação ao ambiente externo, uma vez que ambientes fechados e com circulações de pessoas apresentam taxas elevada de CO_2 dissolvido no ar e teor de umidade adequados (Possan, 2010), ou seja, os poros não estão saturados permitindo a difusão do gás com maior facilidade (Andrade *et al.* 2018).

A média da captura potencial e real estão apresentados na Figura 7. Os resultados demonstram que o sequestro de carbono em uma edificação em ambiente urbano pode chegar à 100 $kg.CO_2/m^3$. Contudo, a captura real da edificação (65%) promoveu uma fixação de 65 $kg.CO_2/m^3$, demonstrando que mais acentuada é a fixação de carbono, quanto maior o tempo em aberto (tempo de exposição do substrato que potencializa a difusão de CO_2 na matriz cimentícia).

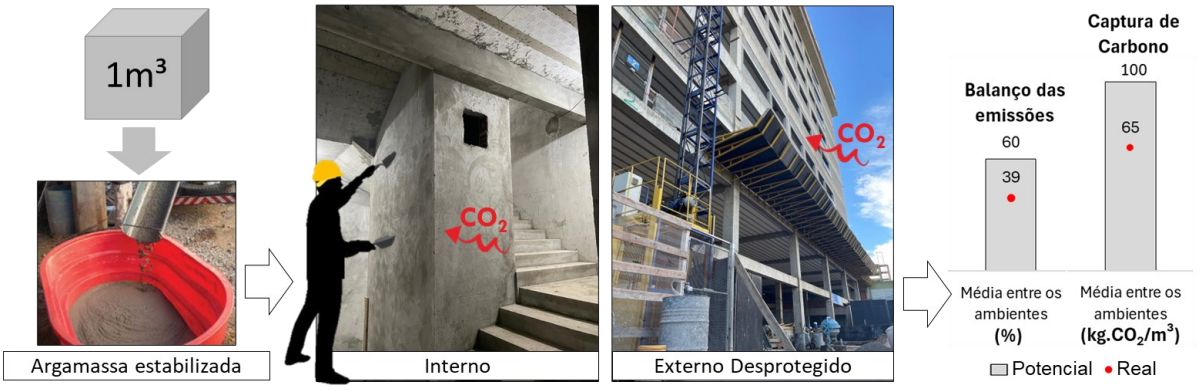


Figura 7 – Captura média potencial e real para ambientes internos e externos

A diferença entre a captura real e a potencial, demonstra que no geral, o tempo em aberto (tempo em que a argamassa ficou exposta sem a aplicação de acabamento) não foi suficiente para promover a fixação total de carbono, pois ainda apresenta potencial de carbonatar.

Observa-se ainda o potencial de estocagem de carbono, que pode ao longo da fase construtiva, do ciclo de vida e do período pós-demolição da edificação, aliviar a carga de emissão de carbono oriundas da indústria da construção. Esse processo é chamado de balanço das emissões.

Considerando que o cimento Portland CP IV contém em média 65% de clínquer (ABNT NBR 16697, 2018), e que cada m³ de argamassa consome 220 kg de cimento Portland, tem-se que em média, sejam utilizados 143 kg de clínquer, ou seja, sua produção emite em torno 135 kg.CO_2/m³. Sabendo-se que são utilizados no traço 40 kg de cal e 1300 kg de areia, tem-se emissões de 24,64 kg.CO_2/m³ de cal e 168 kg.CO_2/m³ de agregado. Totalizando 168 kg.CO_2 /m³ de argamassa produzida.

Realizando uma análise de captura real, com fixação de 65 kg.CO_2/m³, para um total 1033 m³ de argamassa aplicada na edificação, tem-se que 67 toneladas de CO_2 são capturadas, ou seja, um balanço de 39% das emissões da produção, condizentes com os estudos de Suescum-Morales *et al.* (2021), que atingiram um balanço de emissões de 29,9% e de Ruviaro *et al.* (2022) de 36,2%.

Com relação à captura potencial (100 kg.CO_2/m³), tem-se um balanço de 60%, ou seja, mais da metade das emissões geradas na produção da argamassa foram capturadas, condizentes com os resultados laboratoriais de Mazurana *et al.* (2022), em que as emissões foram próximas a 250 kg.CO_2/m³ e com potencial de captura de carbono de 100 kg.CO_2/m³, com balanço de emissões de 40%.

4 CONCLUSÕES

No estudo de caso conduzido contatou-se que durante a fase construtiva os materiais a base de cimento, especialmente as argamassas de revestimento, capturam carbono atmosférico. O montante capturado depende maiormente da espessura do revestimento, da composição química do material aplicado e do tempo em aberto (tempo da aplicação do revestimento até a aplicação de um acabamento como pintura, por exemplo).

Contatou-se por análise termogravimétrica que o valor máximo de fixação de carbono devido à reação de carbonatação para argamassas de revestimento (captura potencial) foi de 100 kg.CO_2/m³. Considerando que a produção da argamassa emite em torno de 168 kg.CO_2/m³, tem-se um balanço de 60% das emissões de CO_2 associadas à produção da argamassa. Já para o que foi efetivamente capturado pela edificação durante o tempo em aberto (captura real), tem-se a fixação de 65 kg.CO_2/m³, equivalente à 67 toneladas de CO_2 e um balanço de 39% das emissões.

Observou-se que o ambiente de exposição tem influência na difusão de CO_2, sendo que em ambientes protegidos da chuva a profundidade carbonatada tende a ser mais elevada.

Considerando que diversos fatores afetam a captura potencial e real de CO_2 para materiais a base de cimento, estudos futuros devem considerá-los a fim de minimizar os ruídos das estimativas e sobretudo, melhorar a acurácia das análises e das compensações.

REFERÊNCIAS

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H, Murshed, M., Mahmood, H., Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. Environmental Science and Pollution Research, 29 (28): 42539–59. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação, Rio de Janeiro, publicada a 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro, publicada a 2018.

Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. Environmental Challenges, 1. https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004

Akhtar, A., Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, 186: 262–81. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085

Andrade, J. J. de O., Possan, E., Squiavon, J. Z., Ortolan, T. L. P. (2018). Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. Construction and Building Materials, 161: 70–83. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089

Ashraf, Warda. (2016). Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. Construction and Building Materials, 120: 558–70. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080

Carbon Pricing Leadership Coalition, CPLC. (2021). What is carbon pricing? https://www.carbonpricingleadership.org/what

Felix, E.F., Carrazedo, R., Possan, E. (2021). Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis. Construction and Building Materials, 266. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121050

Hansen, J. E., Sato, M., Simons, Nazarenko, L. S., Schuckmann, K. V., Loeb, N. G., Osman, M. B. (2023). Global warming in the pipelin. Oxford Open Climate Change, 3 (1). https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008

IEA, International Energy Agency. (2018). Technology roadmap: Low-carbon transition in the cement industry. https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry

John, V. M., Punhagui, K. R. G., Cincotto, M. A. (2014). Indústria da Cal. In: Toneto Junior, R., Pinho, M. (Org.) Economia de Baixo Carbono - Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira. ISBN: 978- 85- 7747-103-4. Ribeirão Preto. P. 371-399.

Li, Z., Hua, Y., Chang, Z., Yue, Y., Qin, J., Qian, J. (2023). Hydration, carbonation and strength development of reactive MgO cement blended with lime (CaO) under different curing conditions. Journal of Building Engineering, 76: 107082. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107082.

Mazurana, L., P.R.S. Bittencourt, F. R. Scremin, Neves Junior, A., Possan, E. (2022). Determination of CO_2 capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147 (2): 1071–80. https://doi.org/10.1007/s10973-020-10436-0/metrics.

Neves Junior, A., Lemos, M. S., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E. De M. R., Dweck, J. (2013). Early stages hydration of high initial strength Portland cement: Part II. NCDTA and Vicat analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 113:659–65. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2757-9.

Neves, R., F. Branco, e J. De Brito. (2013). Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance. Cement and Concrete Composites, 41. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.006.

Pade, C., Guimaraes, M. (2007). The CO_2 uptake of concrete in a 100 year perspective. Cement and Concrete Research, 37 (9): 1348–56. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009.

Paz, C. F., Biela, R., Punhagui, K. R. G., Possan, E. (2023) Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 1, p. 1-14, 2023. http://dx.doi.org/10.1007/s10163-023-01594-y.

PMR e ICAP. (2016). Comercio de emisiones en la práctica: manual sobre el diseño y la implementación de sistemas de comercio de emisiones. Partnership for Market Readiness International Carbon Action Partnership, 1–211. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/f2fea1d4-88fe-5b1e-bc6d-bbb74763c003/content

Pörtner, H.-O., D. Roberts, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, et al. (2022). IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editado por Cambridge University Press. O., Roberts, DC, Tignor, M., Poloczanska, ES, Mintenbeck, K., Ale, A., Eds.

Possan, E. (2010). Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Tese (Doutorado), Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Possan, E., Thomaz, W. A., Aleandri, G. A., Felix, E. F., Santos, A.C.P. (2017). CO_2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study. Case Studies in Construction Materials, 6: 147–61. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007.

Ruviaro, A. S., Silvestro, L., Pelisser, F., de Azevedo, A. R. G., de Matos, P. R., & Gastaldini, A. L. G. (2022). Long-term effect of recycled aggregate on microstructure, mechanical properties, and CO2 sequestration of rendering mortars. Construction and Building Materials, 321, 126357. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126357

Scafetta, N.. 2024. Impacts and risks of "realistic" global warming projections for the 21st century. Geoscience Frontiers, 15 (2): 101774. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101774.

Schaffartzik, A., Duro, J. A. (2022). Dematerialization' in times of economic crisis: A regional analysis of the Spanish economy in material and monetary terms. Resources Policy, 78:102793. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102793.

Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 114: 2–26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B. (2016). A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. https://doi.org/10.1201/b19074.

Sharma, D., Goyal, S. (2018). Accelerated carbonation curing of cement mortars containing cement kiln dust : An effective way of CO_2 sequestration and carbon footprint reduction, 192: 844–54. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.027.

SIDAC, Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. (2024). Dados Do Produto - Clínquer. 2024. https://sidac.org.br/produtos/45.

Singh, I., Hay, R., Celik, K. (2022). Recovery and direct carbonation of brucite from desalination reject brine for use as a construction material. Cement and Concrete Research, 152: 106673. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106673.

Suescum-Morales, D., Cantador-Fernández, D., Ramón Jiménez, J., & María Fernández, J. (2021). Potential CO_2 capture in one-coat limestone mortar modified with Mg3Al–CO3 calcined hydrotalcites using ultrafast testing technique. Chemical Engineering Journal, 415: 129077. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129077

Wang, X., Guo, M., Ling, T. (2022). Review on CO_2 curing of non-hydraulic calcium silicates cements: Mechanism, carbonation and performance. Cement and Concrete Composites, 133 (6): 104641. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104641.

WBCSD, IEA. World Business Council For Sustainable Development, International Energy Agency. 2018. Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector: Status Review 2018, 52. https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Low-Carbon-Technology-Roadmap-for-the-Indian-Cement-Sector-Status-Review-2018

Winnefeld, F., Epifania, E., Montagnaro, F., Gartner, E. M. (2019). Further studies of the hydration of MgO-hydromagnesite blends". Cement and Concrete Research, 126: 105912. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105912.

Zajac, M., Skibsted, J. Bullerjahn, F., Skocek, J. (2022). Semi-dry carbonation of recycled concrete paste". Journal of CO_2 Utilization, 63: 102111. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102111.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A THREE-PHASE APPROACH TO MODELING THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE AND PREDICTING THE ELASTIC MODULUS

Emerson Felipe Félix[a]; Isabela da Silva Falcão[b]; Larrisa Gabriela dos Santos[b]; Lisiane Pereira Prado[a].

[a]Professor Dr., São Paulo State University (UNESP), School of Engineering and Sciences, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brazil, emerson.felix@unesp.br; lisiane.prado@unesp.br

[b]Undergraduate, UNESP – São Paulo State University (UNESP), School of Engineering and Sciences, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brazil, isabela.falcão@unesp.br; larissa-grabiela.santos@unesp.br

Abstract

The acquisition of concretes incorporating mineral admixtures and aggregates derived from Construction and Demolition Waste (CDW) of satisfactory quality, particularly concerning their mechanical attributes, poses challenges owing to the variability in physical and chemical characteristics of alternative materials and the presence of contaminants potentially undermining adherence to the cementitious matrix. Presently, finite element method (FEM) modeling at the mesoscopic scale emerges as a promising strategy for assessing material mechanical response and estimating mechanical properties such as elasticity modulus. However, implementing the conventional finite element method demands considerable computational resources for mesoscale simulations, where concrete is treated as a biphasic or triphasic medium. Acknowledging this, we introduce a positional version of the finite element method-based approach enabling mesoscale concrete analysis. This technique relies on mesh embedding of finite elements discretizing composite system materials. Additionally, a machine learning-based void ratio prediction model is integrated with FEM, enabling concrete simulation as a triphasic medium. Numerical examples are provided to validate and demonstrate the model's efficiency, compared against experimental data. Results endorse the effectiveness of this approach, implying its potential to aid concrete formulation by adjusting constituent material proportions to achieve desired mechanical performance while reducing input consumption, thereby fostering sustainable construction practices.

KEYWORDS: Concrete, Elastic Modulus, Finite Element Method, Machine Learning.

1 INTRODUCTION

Concrete with recycled aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) differs from conventional concrete due to its higher porosity, resulting in more water absorption and influencing the amount of binder required. The mortar layer affects mechanical properties such as compressive strength and modulus of elasticity. The modulus of elasticity is a crucial parameter in studying the mechanical behavior of concrete, especially concerning its deformability (Topçu, 2005).

In light of this, numerous models and formulations have been proposed over the past years to forecast the elastic modulus of concrete, considering a wide variety of concrete types, such as those used in dam construction (Topçu, 2005), concrete with recycled aggregate (Golafshani; Behnood, 2018), concrete with mineral admixtures (Uysal; Tanyildizi, 2011), Concrete under high temperatures (Lee et al., 2009) and high-strength concrete (Yan; Shi, 2010). The developed models are divided into formulations based on experimental results, elasticity theory, and the fundamentals of composite mechanics.

The most simplistic models, derived through linear and non-linear regressions, utilize the compressive strength of concrete (C_s) as the sole or primary parameter in the formulation, as indicated by Eq. (1). (ACI Committee 318-95, 1995), Eq. (2) (CSA A23.3-94, 1995) and Eq. (3) (CEB-FIP, 1993). Most of these models are recommended by national and international standards due to their ease of manipulation and the coherence of the values obtained from their use.

$$E_c = 4700\sqrt{C_s} \tag{1}$$

$$E_c = 4500\sqrt{C_s} \tag{2}$$

$$E_c = 10000(C_s + 8)^{0.33} \tag{3}$$

More sophisticated models have been developed through the theory of elasticity, concrete rheology, and composite solids' mechanics, as Eq. (4-8) (Nilsen and Monteiro, 1993). These models were determined by considering concrete as a biphasic material, with one phase associated with the mortar matrix and the other with the coarse aggregates.

$$E_c = E_m V_m + E_a V_a \quad \text{(Modelo de Voigt)} \tag{4}$$

$$E_c = \left(\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_a}{E_a}\right)^{-1} \quad \text{(Modelo de Reuss)} \tag{5}$$

$$E_c = \left[0.5\left[\left(\frac{V_a}{E_a} + \frac{1 - V_a}{E_m}\right) + \left(\frac{1}{E_a V_a + (1 - V_a)E_m}\right)\right]\right]^{-1} \quad \text{(Modelo de Hirsch)} \tag{6}$$

$$E_c = E_m\left(\frac{E_m V_m + (1 + V_a)E_a}{(1 + V_a)E_m + E_a V_m}\right) \quad \text{(Modelo de Hansen)} \tag{7}$$

$$E_c = \left[\frac{1 - \sqrt{V_a}}{E_m} + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}}\right)E_m + E_a}\right]^{-1} \quad \text{(Modelo de Counto)} \tag{8}$$

where $E_m$is the modulus of elasticity of the cementitious matrix, E_a is the modulus of elasticity of the coarse aggregate, and V_m e V_a, refers to the volumetric percentages of the cementitious matrix and

coarse aggregates, respectively.

Topçu et al. (2005) analyzed the models described in Eq. (4-8). They found that these models are an efficient alternative for estimating the modulus of elasticity of low and standard-strength concretes. Furthermore, the authors determined through the application of composite models that, for high-strength concrete, the formulations proposed by Voigt, Hirsch, and Hansen, Eq. (4, 6, and 7), respectively, are the most suitable for predicting the modulus of elasticity of the material.

For the application of the models in Eq. (4-8), it is necessary to know only the modulus of elasticity of the two constituent phases, the cementitious matrix and the coarse aggregate, and their respective volumetric proportions, parameters known during the design phase of the concrete mix. However, the elastic modulus of the cementitious matrix and aggregates are not always known parameters, especially when estimating the elastic modulus of recycled aggregates. Thus, it becomes necessary to have an expression to estimate them, increasing the uncertainties and the prediction errors.

With the advancement of computing and the emergence of machine learning techniques, numerical models have been developed over time (Demir, 2005; Golafshani and Behnood, 2018; Behnood et al., 2015) aiming to reduce uncertainties in analytical formulations and expand their applicability. Particularly in the last decade, Finite Element Method (FEM) has been employed in the analysis and modeling of the mechanical behavior of concrete at macro and/or mesoscale levels, allowing the representation of the material as a heterogeneous medium, considering its different constituent phases (Lee et al., 2009; Chunsheng et al., 2014).

Thus, a positional version of the finite element method-based technique (PFEM) was used to model the mechanical behavior of concrete made with recycled coarse aggregate at the mesoscale, allowing for an assessment of the composite elastic modulus. The discretization of composite system materials through mesh embedding of finite elements is the foundation of this technique. Integrating a void ratio prediction model based on machine learning with PFEM enabled concrete simulation as a triphasic medium. Experiments utilizing recycled aggregate in concrete were conducted to validate and demonstrate the technique's efficacy.

2 MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION

The initial presentation focuses on the direct finite element method (FEM) particulate technique for modeling reinforced elastic materials. Next, we propose a model that uses Multi-Layer Perceptron artificial neural networks to forecast the void ratio of concrete. This model is incorporated into the numerical simulation code, enabling mesoscale modeling of concrete by treating it as a three-phase system: mortar, coarse aggregate, and voids. Finally, an experimental campaign was conducted to assess the approach's effectiveness.

2.1 CONCRETE FEM MODEL BASED ON POSITION FORMULATION

With the purpose to model the mechanical properties of any phase of the particulate composite, a direct Finite Element Method (FEM) based on locations, as presented by Paccola and Coda (2016), was employed. We initiated the description using the total energy stationary concept and explained the PFEM formulation. Assuming there are no dissipative potentials and just considering static applications, the Eq. (9) represents the total energy of any solid, whereas Eq. (10) represents the variance in this energy.

$$\prod = U + P \tag{9}$$

$$\delta\prod = \delta U + \delta P = 0 \quad (10)$$

where *U* is the strain energy stored in all phases of the composite and *P* is the potential energy of external forces.

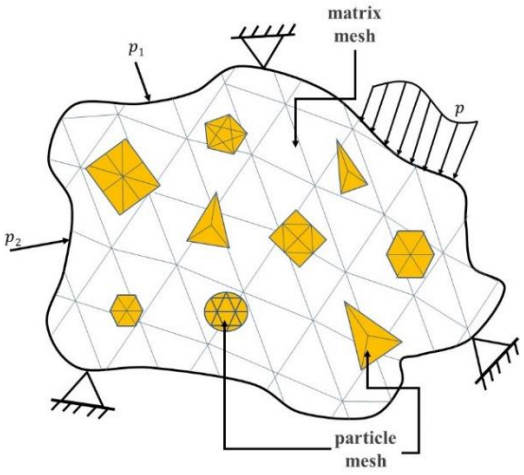


Figure 1.a. Generic body discretization.

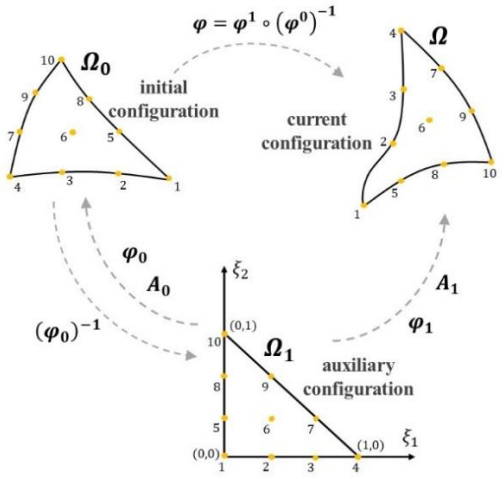


Figure 1.b. Initial and current configuration.

Given that the matrix and particle are depicted and simulated using a two-dimensional (2D) finite element, the initial and final body configuration may be determined from the kinematic description of a generic 2D solid finite element, as illustrated in Figure 1.b. Figure 1.b and the finite element configuration shown are only illustrative, and the formulations can be applied to any other element.

To provide a precise definition of the FEM formulation proposed by Paccola and Coda (2016), the following guide is presented. The change of configuration function of a finite element is defined by expressing the corresponding Green Strain. Next, the strain energy is explained. Next, the mechanism for incorporating finite element particles into the issue without introducing new degrees of freedom is discussed. In conclusion, they consider the influence of external conservative forces and utilize total energy stationary to derive the nonlinear equilibrium equations. The Newton-Raphson method is employed to solve the nonlinear equations, resulting in the desired solution.

2.1.1 Change of configuration function

Figure 1.b depicts the initial configuration of a finite element belonging to any phase of the composite Ω_0. It also illustrates the current body configuration Ω. The auxiliary configuration Ω_1 is used to generate the Lagrange polynomials ϕ_j that compose the initial and currents mappings, as showed in the Eq. (11) and (12).

$$x_i = \varphi_i^0 = \phi_j(\xi_1, \xi_2) X_i^j \quad (11)$$

$$y_i = \varphi_i^1 = \phi_j(\xi_1, \xi_2) Y_i^j \quad (12)$$

where X_i^j and Y_i^j refer to the initial and current nodal positions, respectively. The term *i* refers to the finite element nodes and *j* their directions and degree of freedom.

Next, in Eq. (13), the current configuration is determined by utilizing the initial and auxiliary mappings. The gradient of the configuration function, which is employed here to determine the deformation function, is presented in Eq. (14). The gradients of the mappings are represented by Eq. (15)., i.e., $\boldsymbol{A^1}$ and $\boldsymbol{A^0}$ are determined.

$$\varphi = \varphi^1 \circ (\varphi^0)^{-1} \quad (13)$$

$$Grad(\vec{\varphi}) = Grad(\vec{\varphi}^1) \cdot (Grad(\vec{\varphi}^0))^{-1} = \boldsymbol{A}^1 \cdot (\boldsymbol{A}^0)^{-1} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{A}^0 = \frac{\partial \varphi^0}{\partial \xi} = \phi \cdot \vec{X} \quad and \quad \boldsymbol{A}^1 = \frac{\partial \varphi^1}{\partial \xi} = \phi \cdot \vec{Y} \quad (15)$$

where $Grad(\cdot)$ represent the gradient of a function, $\boldsymbol{A^1}$ and $\boldsymbol{A^0}$ are the gradients mappings ξ and refers to the dimensionless coordinates of the auxiliary configuration.

2.1.2 Energy strain

The Green strain can be determined from the gradients of the mappings, as shown in Eq. (18), using Eq. (15) and the deformation gradient from Eq. (14).

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{A}^t \cdot \boldsymbol{A} - \boldsymbol{I}) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{C} - \boldsymbol{I}) \quad (16)$$

where $\boldsymbol{E}$ is the Green strain, $\boldsymbol{I}$ is the identity matrix and $\boldsymbol{C}$ is the Cauchy-Green stretch tensor.

From the Green strain one writes the expressions of the specific strain energy, which defines, respectively, the plane stress (Eq. (17)) or the plane strain of Saint-Venant-Kirchhoff constitutive laws (Eq. (18)).

$$u^{pStress} = \frac{1}{2}[K(\boldsymbol{E}_{11}^2 + \boldsymbol{E}_{22}^2) + 2\upsilon K(\boldsymbol{E}_{11}E_{22}) + 2G(\boldsymbol{E}_{12}^2 + \boldsymbol{E}_{21}^2)] \quad (17)$$

$$u^{pStrain} = \frac{1}{2}[(1-\upsilon)\overline{K}(\boldsymbol{E}_{11}^2 + \boldsymbol{E}_{22}^2) + 2\upsilon\overline{K}(\boldsymbol{E}_{11}\boldsymbol{E}_{22}) + 2G(\boldsymbol{E}_{12}^2 + \boldsymbol{E}_{21}^2)] \quad (18)$$

where $K = \frac{\mathfrak{E}}{(1-\upsilon^2)}$, $\overline{K} = \frac{\mathfrak{E}}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$, $G = \frac{\mathfrak{E}}{2(1+\upsilon)}$, $\mathfrak{E}$ is the longitudinal elastic modulus and υ is the Poisson ratio.

The eq. (15-18) shows that in a finite element, the specific strain energy depends on the current positions of nodes. This is also true for any solid considering the matrix and particles (Paccola and Coda, 2016).

Therefore, the strain energy for any material can be found by integrating Eq. (17) or (18) within the volume defined by Eq. (19). The strain energy of an entire body is the cumulative total of all energies generated across finite elements.

$$U = \int_{V_0} u(\vec{Y}) dV_0 \quad (19)$$

By utilizing the strain energy equation (Eq. (19)), it is possible to get two more important quantities for the simulation process: the internal force (Eq. (20)) and the Hessian matrix (Eq. (21)). The equation can be solved using variational calculus and the chain rule, starting with a trial location, $\vec{Y}$.

$$\overrightarrow{F_{int}} = \frac{\partial U}{\partial \vec{Y}} = \int_{V_0} \frac{\partial u}{\partial \boldsymbol{E}} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y}} dV_0 = \int_{V_0} \boldsymbol{S} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y}} dV_0 \quad (20)$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{\partial^2 U}{\partial \vec{Y} \partial \vec{Y}} = \frac{\partial}{\partial \vec{Y}} \int_{V_0} \frac{\partial u}{\partial \boldsymbol{E}} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y}} dV_0 = \int_{V_0} \left(\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y}} : \frac{\partial^2 u}{\partial \boldsymbol{E} \partial \boldsymbol{E}} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y}} + \boldsymbol{S} : \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \vec{Y} \partial \vec{Y}} \right) dV_0 \quad (21)$$

where $\overrightarrow{F_{int}}$ is the internal force, $\boldsymbol{S}$ refers to the second Piola-Kirchhoff stress and $\boldsymbol{H}$ is the Hessian matrix.

2.1.3 Energy Particles inclusion via kinematics compatibility

This section presents the technique defined by Paccola and Coda (2016) to incorporate finite particles into the matrix without introducing additional degrees of freedom. The formulation's fundamental

concept is that the position of a particle node is expressed as a function of the positions of the nodes of a solid finite element to which the particles belong. To carry out this procedure, it is necessary to ensure a flawless bond between the particle and the solid and distribute the stored strain energy between them.

As stated earlier, it is essential to express the positions of the particle nodes as a mathematical function of the positions of the solid finite element nodes. To do so, we will use the shape functions of the solid finite element. Thus, it is necessary to know the dimensionless coordinates $\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right)$ of the particle's nodes at the initial configuration of the problem. To solve the system of nonlinear equations, Eq. (22), the Newton-Raphson approach is employed, as described in Paccola and Coda's (2016) work.

$$X_{Pi} = \phi_l\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right) X_{li} \tag{22}$$

in which ϕ_l are the solid finite element shape functions, X_{Pi} are the initial coordinates of particle node *P* generated regardless of the solid mesh and X_{li} are the finite element nodes that contains the particle node.

Knowing the solid finite element shape functions and the current nodal positions of the matrix, the value of all particles' nodal positions is determined, as shown in Eq. (23).

$$Y_{Pi} = \phi_l\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right) Y_{li} \tag{23}$$

where Y_{Pi} are the current coordinates of particle node *P* generated regardless of the solid mesh and Y_{li} are the current positions of the solid nodes.

To establish the required kinematic relationships for the proposed link, it is essential to calculate the particle coordinates with respect to solid coordinates, as demonstrated in Eq. (24). Eq. (24) demonstrates that the particle node is a member of the solid finite element, the term $\partial Y_{pi}/\partial Y_{\beta\alpha} = \phi_\beta\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right)$ if the direction α of the solid position is equal to direction *i* of the analyzed particle.

$$\frac{\partial Y_{pi}}{\partial Y_{\beta\alpha}} = \frac{\partial Y_{li}}{\partial Y_{\beta\alpha}} \phi_l\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right) = \delta_{\alpha i}\delta_{\beta l}\phi_l\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right) = \delta_{\alpha i}\phi_\beta\left(\xi_1^p, \xi_2^p\right) \tag{24}$$

in which the particle node belongs to the solid finite element, Y_{Pi} are the current coordinates of particle node *P* generated regardless of the solid mesh and Y_{li} are the current positions of the solid nodes.

To determine the individual effect caused by the particles in the composite, the strain energy, as described in Eq. (9), was divided into two components: one attributed to the matrix and another attributed to the particles. It is crucial to note that every particle has the potential to possess various shapes and be composed of diverse materials. Hence, the eq. (25) represents the overall energy, which, through mathematical manipulation, yields the internal force and Hessian matrix for a composite solid consisting of both a matrix and particles. Both eq. (26) and (27) were derived from eq. (25) by considering the placements of the nodes.

$$U = U_{mat} + U_p \tag{25}$$

$$\overrightarrow{F_i} = \frac{\partial\left(U_{mat} + U_p\right)}{\partial Y_{\beta\alpha}} = \frac{\partial U_{mat}}{\partial Y_{\beta\alpha}} + \frac{\partial U_p}{\partial Y_{(p)i}} \frac{\partial Y_{(p)i}}{\partial Y_{\beta\alpha}} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{\partial^2\left(U_{mat} + U_p\right)}{\partial Y_{\beta\alpha}\partial Y_{\eta\gamma}} = \int_{V_0} \frac{\partial^2 u_{mat}}{\partial Y_{\beta\alpha}\partial Y_{\eta\gamma}} dV_0 + \int_{V_0{}^p} \frac{\partial^2 u_p}{\partial Y_{\beta\alpha}\partial Y_{\eta\gamma}} dV_0{}^p \tag{27}$$

The final element in Eq. (27) represents the particles, and the chain rule is employed to establish a direct relationship between the degrees of freedom of the particles and the degrees of freedom of the matrix, as demonstrated in Eq. (28).

$$\frac{\partial^2 u_p}{\partial Y_{\beta\alpha}\partial Y_{\eta\gamma}} = \frac{\partial^2 u_p}{\partial Y^p_{\rho\omega}\partial Y^p_{\rho w}}\frac{\partial Y^p_{\rho\omega}}{\partial Y_{\beta\alpha}}\frac{\partial Y^p_{\rho w}}{\partial Y_{\eta\gamma}} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial Y^p_{\rho\omega}\partial Y^p_{\theta\pi}}\frac{\partial Y^p_{\rho\omega}}{\partial Y_{\beta\alpha}}\frac{\partial Y^p_{\theta\pi}}{\partial Y_{\eta\gamma}} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial Y^p_{\theta\pi}\partial Y^p_{\rho\omega}}\frac{\partial Y^p_{\theta\pi}}{\partial Y_{\beta\alpha}}\frac{\partial Y^p_{\rho\omega}}{\partial Y_{\eta\gamma}} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial Y^p_{\theta\pi}\partial Y^p_{\theta\pi}}\frac{\partial Y^p_{\theta\pi}}{\partial Y_{\beta\alpha}}\frac{\partial Y^p_{\theta\pi}}{\partial Y_{\eta\gamma}} \quad (28)$$

In which the superior index *P* indicates the particle nodes.

2.2 CONCRETE VOID RATIO MODEL BASED ON MACHINE LEARNING

Initially, a database was constructed from experimental results available in the literature (Ahmad et al., 2013; Athayde, 2020; Cartuxo et al., 2010; Costa and José, 2010; Estolano et al., 2018; Filho, 2021; Frotte et al., 2017; Gerin and Mayara, 2020; Maia et. al., 2022; Nogueira, 2020; Nunes, 2017; Pedro et. al, 2014; Silva, 2017; Tedesco, 2016; Tenório et al., 2007; Vieira et al., 2016; Younsi et al., 2010). This database comprised 154 data from various experimental campaigns. The data collection aimed to be representative and relevant to the study's objective, focusing on concrete developed with partial or total replacement of coarse aggregates with mixed construction and demolition waste, which includes cementitious materials mixed with ceramics and others. The concretes were produced considering three mineral admixtures: fly ash, blast furnace slag, and silica fume. The collected data were divided into subsets: 70% for training, 10% for cross-validation, and 20% for model testing analysis.

Table 1 – Dataset's characteristics.

Parameter	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
CTYPE	-	1.00	4.00	1.41	0.65
CC	kg/m³	126.05	500.00	334.19	86.84
ATYPE	-	0.00	3.00	1.22	0.45
AC	kg/m³	790.75	2474.50	1602.66	375.93
SR	%	0.00	1.00	0.51	0.37
W/B	-	0.27	1.02	0.57	0.13
IV	%	5.60	37.20	15.65	6.12

The selection of variables for the modeling process is crucial for properly processing information through machine learning techniques and appropriately mapping input and output data. In this work the following parameters were used to map the void ratio (IV): cement consumption in kg/m³ (CC); type of cement (CTYPE) (1 – CEM I, 2 – CEM II, 3 – CEM III; and 4 – CEM IV); type of recycled aggregate (ATYPE) (0 –natural aggregate; 1 –CDW derived from cementitious materials; and 2 –CDW derived from mixed materials); the recycled aggregate substitution rate in % (SR); the proportion of aggregates relative to cement (AC); and the water/binder ratio (W/B). Table 1 provides the statistical values of the attributes used in developing, validating, and testing the predictive models.

This study modeled the void ratio using Multi-Layer Perceptron type of Artificial Neural Networks (ANNs). ANNs are computational systems with neurons that operate similarly to the human nervous system. They can accurately represent intricate functions with a high generalization ability (Haykin, 2008). Furthermore, these networks can uncover implicit information that is not explicitly given to them and map the connections between inputs and outputs. This characteristic has contributed to their increasing use in solving engineering challenges (Braga et al., 2000).

The backpropagation training algorithm (Rumelhart et al., 1986) is a key factor in the popularity and extensive use of ANNs. It is straightforward to build using the gradient descent optimization technique.

Because of its simplicity, the majority of research in civil engineering that uses artificial neural networks (ANNs) relies on the backpropagation algorithm for training the network (Abambres & Lantsoght, 2019; Félix et al., 2021).

In the modeling procedure, 100 distinct ANN structures were created by manipulating the number of neurons in two hidden layers. Each layer contained between 1 and 10 neurons. The database was partitioned into three subsets: 70% of the data was allocated for training, 15% for validation, and 15% for testing. The purpose of this division was to carry out cross-validation. Parallel implementation of cross-validation was employed during the training stage to mitigate overfitting. The artificial neural networks (ANNs) underwent training using a maximum of 500,000 iterations, a learning rate 0.1, and a sigmoid activation function. The networks were consistently initiated with synaptic weights of 0.5.

Machine learning models are evaluated using many metrics in the literature, including mean error, mean absolute error, and root mean square error (RMSE) (Eq. (21)), among others. RMSE was employed in this investigation because of its ability to provide a metric that is measured in the same unit as the target variable. As stated in Equation 21, the root mean square error computes the average magnitude of errors, emphasizing larger errors. This makes it appropriate for scenarios where significant errors have more importance or negative impact (Almeida et al., 2023; Chai et al., 2014). In addition, the coefficient of determination, denoted as R^2 and calculated using Eq. (22), was employed to assess the independent variables' predictive power in explaining the dependent variable's variability.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - t_i)^2}{n}} \tag{21}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=0}^{n}(t_i - \underline{t})(y_i - \underline{y})}{\sum_{i=0}^{n}(t_i - \underline{t})^2(y_i - \underline{y})^2}\right) \tag{22}$$

in which Y_i are the real values and O_i are the model predictions. n is the amount of data samples evaluated, $\bar{Y}$ are the average of real values and $\bar{O}$ represent the means of model outputs.

2.3 EXPERIMENTAL TESTS

The current investigation employed Portland cement CP V, which possesses a compressive strength class of 32 MPa. The determination of the binder's specific gravity (3.15 g/cm³) and specific surface area (1.7 m²/g) was carried out according to the standards NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) and NBR 16372:2015 (ABNT, 2015). Quartz sand was utilized as the fine aggregates. Coarse aggregate was obtained by using natural gneiss-derived gravel and a mixture of recycled construction and demolition waste (Figure 3). The aggregates underwent characterization tests to determine their particle size distribution, specific gravity, bulk density, water absorption, and fineness modulus. The results of these tests are shown in Table 2.

Figure 3 – Coarse aggregates.

Table 2 – Physical characterization of aggregates.

Property	Fine Aggreg.	Natural Coarse Aggreg.	CDW Coarse Aggreg.
Unit mass (kg/m³)	1515.10	1530.26	1225.00
Bulk density (kg/m³)	2332.52	2857.14	2222.00
Water absorption (%)	0.31	2.86	4.95
Fineness modulus	2.65	4.52	4.46

The present research developed a standard mix design using natural aggregates for concrete with a characteristic compressive strength of 30 MPa. The mixture formulation adhered to the ABCP methodology, with a slump target of (120±20) mm. Concretes with CDW aggregates were produced using the same proportion (Table 3), but with different levels of substitution of natural aggregate with recycled aggregate (0% - C30R0, 25% - C30R25, 50% - C30R50, 75% - C30R75, and 100% - C30R100). The concretes were molded into cylindrical specimens measuring 10 cm in diameter and 20 cm of height. The specimens were removed from the mold after 24 hours and then immersed in a water tank for 28 days to undergo curing.

Table 3 – Material proportions to produce 1m³ of concrete.

Concrete	Cement (Kg/m³)	Sand (Kg)	Natural aggr. (Kg)	CDW aggre. (Kg)	Water (Kg)
C30R0	354.00	800.00	1024.00	0.00	184.00
C30R25	354.00	800.00	768.00	256.00	184.00
C30R50	354.00	800.00	512.00	512.00	184.00
C30R75	354.00	800.00	256.00	768.00	184.00
C30R100	354.00	800.00	0.00	1024.00	184.00

The NBR 9778 (ABNT, 2005) defines the void ratio as the ratio between the volume of permeable pores and the total volume of the sample and establishes guidelines for determining this parameter. The void ratio (in %) is computed by using Eq. (23) as specified in the standard, using hydrostatic mass (M_i), the sample mass (Ms), and the saturated mass (M_{SAT}).

$$IV = \frac{M_{SAT} - M_S}{M_{SAT} - M_I} \times 100 \quad (23)$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 ANN-BASED MODELS PERFORMANCE

The training of artificial neural networks (ANNs) was conducted by examining 100 different topologies, in which the number of neurons in two hidden layers ranged from 1 to 10. The weighted coefficient of determination (R^2-Weighted) was used to determine the top five topologies with the highest performances, as shown in Table 4. This coefficient was determined by multiplying the sum of training performance by 0.4 and test performance by 0.6. This parameter aimed to identify the model that exhibited the most effective generalization.

Figure 4 depicts the distribution of residuals generated by the most successful ANN model, which had a topology of [6-6-6-1]. This model achieved an overall R^2 of 0.936 and an RMSE of 0.015 (1.5%). Figure 5 depicts the results of the analysis conducted on the significance of input parameters in predicting

the void ratio for this model. The three most relevant parameters in modeling the void ratio in concrete with construction and demolition waste (CDW) are cement, with an importance of 35%; coarse aggregate cement rate, with an importance of 20%; and recycled aggregate substitution rate, with an importance of 15%. The other parameters showed importance equal to or less than 10%. Therefore, the experimental campaign was conducted to validate the obtained results.

Table 4 –ANNs with the 5 best performances.

Topology	R^2-Weighted	R^2-Train	R^2-Test	R^2-Overal	RMSE
[6-6-6-1]	0.933	0.937	0.930	0.936	0.015
[6-5-6-1]	0.907	0.932	0.891	0.924	0.017
[6-5-7-1]	0.905	0.935	0.885	0.925	0.016
[6-9-7-1]	0.899	0.913	0.889	0.909	0.018
[6-5-5-1]	0.889	0.921	0.868	0.910	0.018

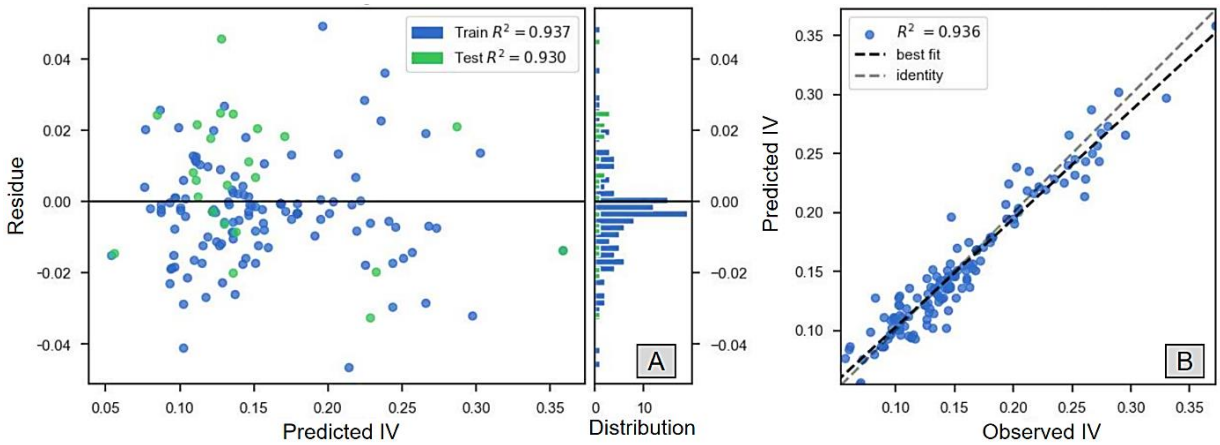


Figure 4 – (a) Residuals and (b) dispersion of observed and predicted IV values.

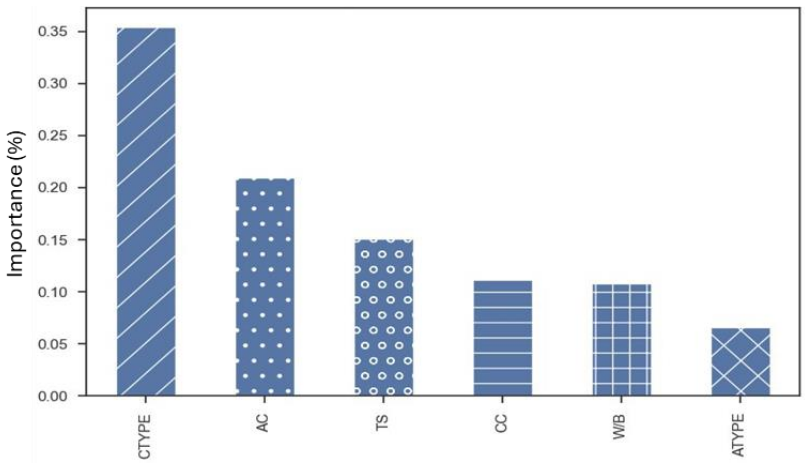


Figure 5 – Importance relative analysis.

3.2 EXPERIMENTAL RESULTS AND ELASTIC MODULUS PREDICTION

The predicted values or void ratio were compared with the experimental to evaluate the model's effectiveness in predicting the void ratio in concretes with CDW. Figure 6 presents the results obtained for each type of concrete analyzed, demonstrating the model's accuracy in replicating the

experimental data and confirming its practical applicability.

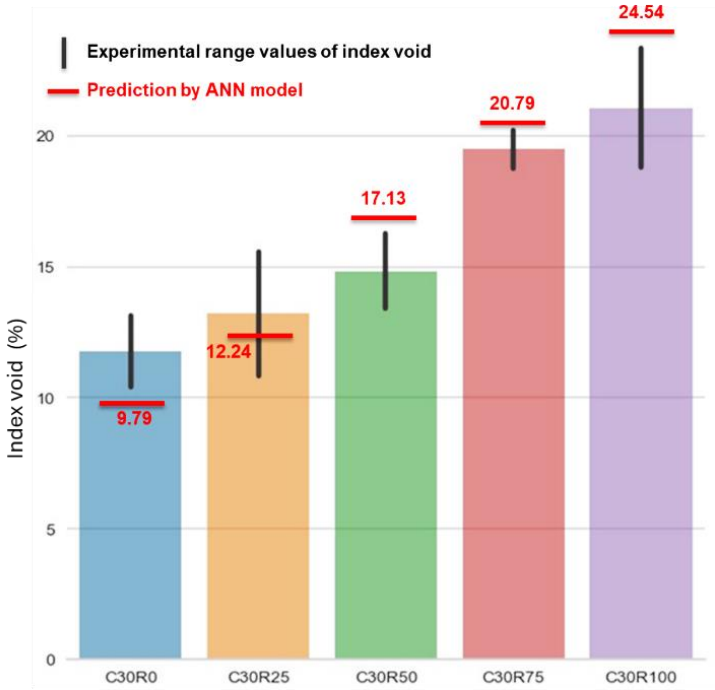


Figure 6 – Comparison between the predicted and experimental void.

The results presented in Figure 6 show that the predictions differed on average by 11.26% from the mean values obtained in the experimental campaign. Most predictions, except for the C30100 concrete mix, would be within the observed ranges of the experimental campaign, given the model's average margin of error, which is approximately 1.7%.

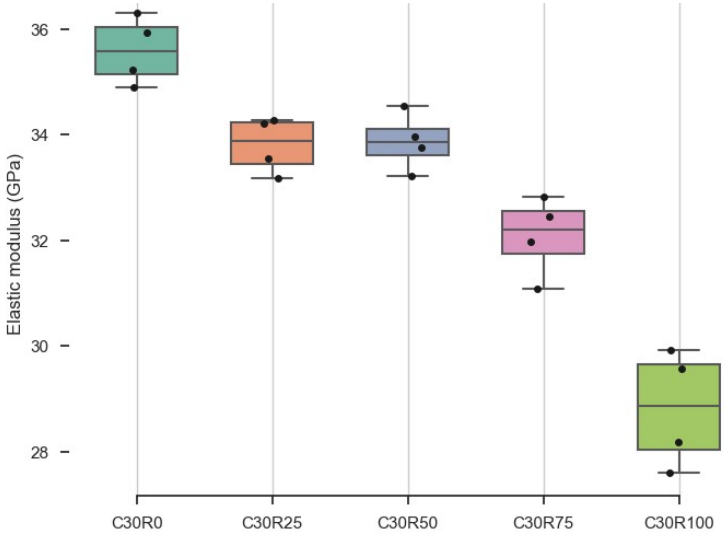


Figure 7 – Elastic modulus of concrete.

Although the main purpose of this investigation is to simulate the mechanical behavior of concrete and estimate the elastic modulus of concretes using CDW, Figure 7 shows the experimentally measured values. The modulus of elasticity is penalized as the substitution rate of natural coarse aggregate with CDW increases, as the results indicate. A penalty of 4.6% is imposed on average for a 25% increase in the substitution rate. Nevertheless, a reduction of 17.14% was achieved through a 100% substitution. The numerical modeling of concrete's mechanical behavior was conducted using the code built with

PFEM and the void ratio model, utilizing the known average elasticity modulus values. At first, modeling was carried out for the C30R0 and C30R100 concretes, representing situations where only natural or recycled aggregates are used. The initial simulations yielded values of 37.74 GPa and 28.78 GPa for the modulus of elasticity of the C30R0 and C30R100 concretes, respectively. These values indicate 0.42% and 0.56% deviation from the experimentally measured average values. The performances were reached by adjusting the modulus of elasticity of the mortar to 21.30 GPa, the natural aggregates to 63.10 GPa, and the CDW aggregate to 56.70 GPa.

The elastic modulus was determined by mesoscale simulations, which involved calibrating the modulus of elasticity values of the aggregates and mortar and utilizing an ANN-based model to forecast the void ratio. The results produced from the simulations in Figure 8 are compared with the experimentally average values.

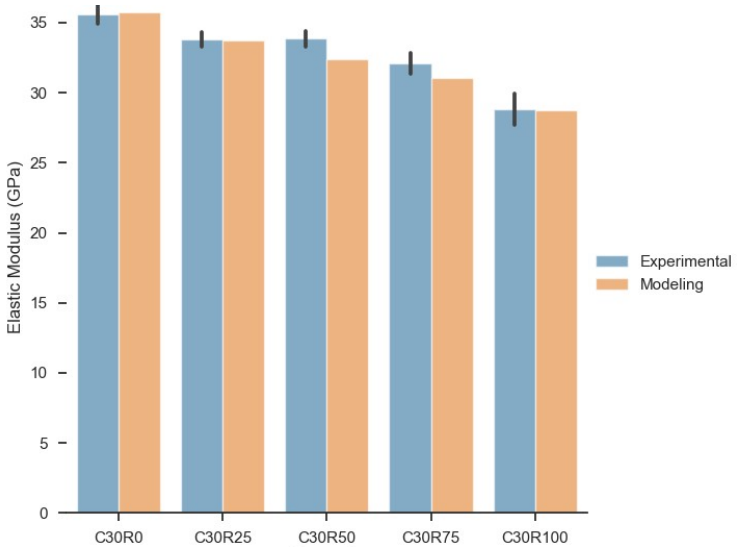


Figure 8 – Comparison of experimental and numerical simulations.

The results demonstrate that the developed approach effectively represents the mechanical properties of concrete at the mesoscale. It produces elastic modulus values that align with experimental results. This approach can be used to measure the mechanical properties of the various phases that make up concrete. Specifically, it enables the estimation of the elastic modulus of recycled aggregates, which can be analyzed to assess its suitability.

4 CONCLUSIONS

The study's results indicate that modeling the mechanical behavior of concrete and determining the elastic modulus of concrete that includes construction and demolition waste is effective. The utilization of artificial neural networks and mesoscale simulations resulted in the identification of several significant discoveries:

- The training of the ANN consisted of examining 100 distinct structures, and the most effective models were determined using the weighted coefficient of determination. The highest-performing configuration, [6-6-6-1], scored an overall coefficient of determination of 0.936 and a root mean square error of 0.015.
- The analysis revealed that the presence of CDW has a considerable impact on concrete's mechanical and physical characteristics, especially when it comes to forecasting void ratio. The parameters that were discovered to be significant were the cement type and the aggregate substitution rates.
- The developed approach enhances understanding of concrete mechanics and supports

sustainable construction practices by optimizing material proportions and performance predictions.

Overall, this research provides a strong framework that combines ANN-based modeling with mesoscale simulations to enhance the comprehension and utilization of recycled aggregates in manufacturing concrete. This approach shows potential for assessing concrete compositions and encouraging sustainable construction practices by efficiently using resources.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the São Paulo Research Foundation (FAPESP) (Grant #2023/04364-9), São Paulo State University (UNESP) EDITAL 06/2023-PROPe and the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES).

REFERENCES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16372. (2015). Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7211. (2005). Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9778. (2005). Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 23. (2001). Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 27. (2001). Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro.

ACI Committee 318-95. (1995). Building code requirements for reinforced concrete, Metric System, American Concrete Institute, Detroit.

Ahmad, S., & Azad, A. K. (2013). An exploratory study on correlating the permeability of concrete with its porosity and tortuosity. Advances in cement research, 25(5), 288-294.

Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. Progress in energy and combustion science, 3, 327-363.

Almeida, T. A. D. C., Felix, E. F., de Sousa, C. M. A., Pedroso, G. O. M., Motta, M. F. B., & Prado, L. P. (2023). Influence of the ANN Hyperparameters on the Forecast Accuracy of RAC's Compressive Strength. Materials, 16(24), 7683.

Behnood, A., Olek, J. e Glinicki, M. A. (2015). Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm, Construction and Building Materials, vol. 94, pp. 137-147, 2015.

Cartuxo, F., De Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J., & Ledesma, E. (2016). Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers. Materials, 9(2), 98, 2016.

Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code. (1990). European Standard for Design of Concrete Structures, London.

Costa, J. Y.A. (2018). Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto.

CSA A23.3-94. (1995). Design of concrete structures, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada.

Demir, F. (2005). A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete—fuzzy logic, Cement and Concrete Research, vol. 35, nº 8, pp. 1531-1538.

Estolano, V., et al. (2018). Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. Matéria (rio De Janeiro). 23(1), e–11974.

Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2021). Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis. Construction and Building Materials, v. 266, p. 121050.

Filho, F. V. C. (2021). Avaliação da resistência à compressão e ao ataque por ácido sulfúrico de concretos com agregados graúdos reciclados de idades distintas. 107 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes.

Frotté, C., Núbila, C. S. A. D., Nagalli, A., Mazer, W., Macioski, G., Oliveira, L. O. S. (2017). Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. Revista Matéria. v.22, n.2.

Gerin, M. T. (2020). Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força.

Golafshani, E. M. e Behnood, A. (2018). Application of soft computing methods for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete, Journal of Cleaner Production, vol. 176, nº 1, pp. 1163-1176.

Golafshani, E. M. e Behnood, A. (2018). Automatic regression methods for formulation of elastic modulus of recycled aggregate concrete, Applied Soft Computing, vol. 64, pp. 377-400.

Lee, J., Xi, Y., Willam, K. e Jung, Y. (2009). A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures, Cement and Concrete Research, vol. 39, nº 9, pp. 754-762.

Maia, P. S., Silva Júnior, L. A., Salles, P. V., Carvalho, M. V. S. (2022). Technical evaluation of structural concrete made with coarse aggregate from construction and demolition waste. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e45011830582, DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30582.

Nilsen, A. U. e Monteiro, J. M. (1993). Concrete: A three phase material, Cement and Concrete Research, vol. 23, nº 1, pp. 147-151.

Nogueira, D. V., Lima, R. V., e Gomes, K. N. A. E. S. (2020). Influência do Metacaulim para o tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto. Brazilian Journal of Development, 6(3), 15326–15339.

Nunes, W. C. (2007). Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Dissertação de mestrado (UFG).

Pedro, D., De Brito, J., e Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. Construction and Building Materials, 71, 141-151..

Silva, J. B. D. (2017). Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de concreto.

Tedesco, M. (2016). Estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural.

Tenório, J. J. L. (2007). Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.

Topçu, İ. B. (2005). Alternative estimation of the modulus of elasticity for dam concrete, Cement and Concrete Research, vol. 35, nº 11, pp. 2199-2202.

Uysal, M. e Tanyildizi, H. (2011). Predicting the core compressive strength of self-compacting concrete (SCC) mixtures with mineral additives using artificial neural network, Construction and Buildings Materials, 25(11), pp. 4105-4111.

Vieira, T., Alves, A., De Brito, J., Correia, J. R., & Silva, R. V. (2016). Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. Materials & design, 90, 767-776.

Yan, K. e Shi, C. (2010). Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by support vector machine, Construction and Building Materials, vol. 24, nº 8, pp. 1479-1485.

Zhou, C., Li, K., & Ma, F. (2014). Numerical and statistical analysis of elastic modulus of concrete as a three-phase heterogeneous composite. Computers & Structures, 139, 33-42.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

APLICAÇÃO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA NA AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM AGREGADOS DE RCD FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS

Isabela da Silva Falcão[a]; Larissa Gabriela dos Santos[a]; Emerson Felipe Félix[b]

[a]Graduandas, Faculdade de Engenharia e Ciências (UNESP), Guaratinguetá, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 12516-410, Guaratinguetá, Brasil, isabela.falcao@unesp.br , larissa-gabriela.santos@unesp.br

[b]Professor Dr., Faculdade de Engenharia e Ciências (UNESP), Guaratinguetá, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 12516-410, Guaratinguetá, Brasil, emerson.felix@unesp.br

RESUMO

O crescente interesse na utilização de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) como agregados para o concreto impulsiona a busca por soluções sustentáveis na construção civil, promovendo a circularidade dos resíduos. Embora diversos estudos avaliem a resistência mecânica dos compósitos produzidos com RCD, a durabilidade desses materiais ainda é pouco compreendida. Este estudo investiga como o uso de RCD afeta a durabilidade do concreto, especialmente em relação à difusão de íons cloreto, crucial para a integridade estrutural ao longo do tempo. Utilizando técnicas avançadas de Aprendizado de Máquina, como Florestas Aleatórias e Redes Neurais Artificiais, foram desenvolvidos modelos para prever a concentração de cloretos em concretos com agregados de RCD. Os resultados destacam a eficácia das Redes Neurais na previsão desse índice, ressaltando a importância do fator água/aglomerante. Além disso, esses modelos estimam propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, reduzindo a necessidade de ensaios experimentais. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento sustentável da construção civil, oferecendo uma metodologia precisa, ágil e economicamente viável.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição; Durabilidade; Difusão de Cloretos; Aprendizado de Máquina.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel significativo na economia global, porém, também é uma das principais fontes de impacto ambiental, responsável por uma parcela substancial das emissões de gases de efeito estufa e pela geração de resíduos. Em meio a uma crescente conscientização sobre a necessidade de práticas mais sustentáveis, surge a busca por alternativas que minimizem esses impactos e promovam a circularidade dos materiais na construção civil.

Nesse contexto, a reutilização de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) tem sido amplamente explorada como uma estratégia para mitigar os efeitos negativos da indústria da construção no meio ambiente. A utilização de RCD como agregados para a produção de concreto não apenas reduz a demanda por materiais naturais, mas também contribui para a redução do volume de resíduos depositados em aterros sanitários (BEHNOOD, 2018).

No entanto, a adoção desses materiais reciclados levanta questões sobre a durabilidade e a qualidade das estruturas construídas. Um dos principais desafios enfrentados é a avaliação da difusão de cloretos, um indicador crítico da durabilidade do concreto para fins estruturais. A heterogeneidade dos compostos, a substituição de materiais e o uso de adições complicam a determinação precisa desse parâmetro, tornando-a uma tarefa desafiadora e onerosa (ANGULO, 2005).

A busca por soluções que abordem essas questões de maneira abrangente e eficaz tem impulsionado a adoção de abordagens inovadoras, como o uso de técnicas de Aprendizado de Máquina. Estas técnicas têm demonstrado uma capacidade promissora de prever e entender a difusão de cloretos em concretos com presença de agregados reciclados, oferecendo uma alternativa viável e eficiente aos métodos tradicionais de análise (Dierkens et al., 2019; ZHANG et al., 2013).

Diante desse cenário, este artigo propõe uma abordagem que integra o conhecimento da construção civil com a capacidade de modelagem e predição das técnicas de Aprendizado de Máquina. O objetivo é desenvolver modelos precisos e confiáveis que possam avaliar a durabilidade de concretos sustentáveis, considerando a substituição de agregados naturais por reciclados de RCD e outras variáveis relevantes. Através desta abordagem, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento e para a promoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil..

Assim, este estudo visa corroborar com o desenvolvimento de modelos de predição do coeficiente de difusão de cloretos em concretos com RCD e que proporcionar estudos de dosagem visando compósitos com maior durabilidade e sustentável, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão de resíduos na construção civil e promovendo uma transição para uma economia mais circular e sustentável.

1.1 APRENDIZADO DE MÁQUINAS

O uso do Aprendizado de Máquina tem se destacado como uma ferramenta analítica promissora em diversas áreas do conhecimento, inclusive nas Engenharias. Na construção civil, essa técnica é empregada não apenas para a predição de propriedades, mas também para a otimização da dosagem do concreto, controle de qualidade e análise estrutural. Dentre as várias técnicas de Aprendizado de Máquina disponíveis, este estudo foca nas florestas aleatórias e redes neurais artificiais, reconhecidas por sua eficácia na resolução de problemas complexos e multidimensionais.

As florestas randômicas são definidas pela composição de várias árvores de decisão. Árvore de decisão é uma técnica de aprendizado de máquina que utiliza uma estrutura de árvore para tomar decisões

com base em condições lógicas, sendo amplamente utilizadas em problemas de classificação e regressão (BREIMAN, et al., 1984). Uma árvore de decisão é composta por nós e arestas. O nó raiz representa a variável de entrada inicial, e cada nó interno representa uma decisão baseada em uma condição específica. As arestas conectam os nós e representam o fluxo de decisão. Os nós representam as saídas ou as decisões finais (HASTIE, et al., 2009). Assim, considerando o funcionamento de uma árvore de decisão, na Figura 1 é apresentado um exemplo ilustrativo de uma árvore construída para a avaliação do estado limite de abertura de fissuras em estruturas de concreto armado (ELS-W).

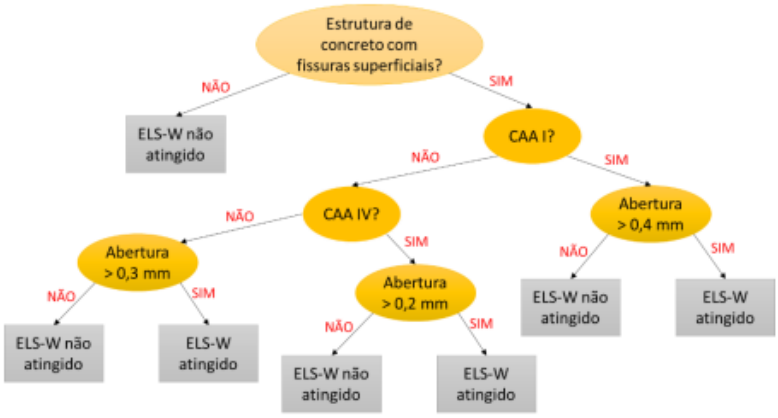


Figura 1 - Representação de um modelo com árvore de decisão para avaliação do Estado Limite de Serviço de estruturas de concreto armado. Falcão et. al. (2023).

As redes neurais artificiais (RNA) são estruturas computacionais inspiradas no funcionamento do cérebro humano, constituídas por neurônios artificiais que processam informações e resolvem problemas de Aprendizado de Máquina (KROGH, 2008). Esses neurônios recebem conexões sinápticas ponderadas, realizam cálculos de soma ponderada, aplicam funções de ativação não-lineares e geram saídas para as camadas subsequentes. Assim, as RNA são organizadas em camadas de entrada, ocultas e de saída, com os pesos sinápticos ajustados durante o treinamento.

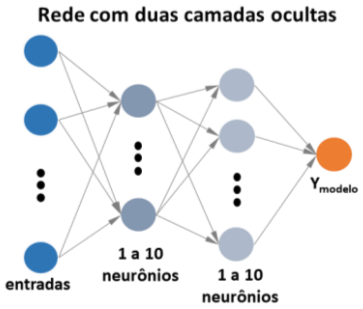


Figura 2 – Representação de redes feedforward com duas camadas ocultas.

As RNA têm uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, incluindo reconhecimento de padrões em imagens, processamento de linguagem natural, diagnósticos médicos e previsões meteorológicas (LECUYER, 2018). Um tipo comum de RNA é o Multilayer Perceptron (MLP), que consiste em múltiplas camadas de neurônios interconectados (Figura 2). A modelagem com redes MLP começa com a definição da arquitetura da rede, incluindo o número de camadas, o número de neurônios em cada camada e as funções de ativação a serem utilizadas.

Durante o treinamento, os parâmetros da rede, como pesos e vieses, são inicializados aleatoriamente. Os dados de entrada são então propagados através da rede, com cada neurônio de uma camada

conectado a todos os neurônios da próxima camada. A saída da rede é comparada com os valores alvo usando uma função de erro, como erro quadrático ou entropia cruzada. A técnica de retropropagação é então empregada para ajustar os parâmetros da rede e minimizar os erros entre os valores previstos e os valores reais. Esse processo iterativo de retroalimentação e retropropagação é repetido até que um critério de convergência seja atingido, resultando em um modelo MLP capaz de identificar concretos com agregados reciclados padrões complexos nos dados e fazer previsões com alta precisão.

2 METODOLOGIA

Visando a determinação de um modelo preditivo para a difusão de íons cloreto de concretos com agregados naturais e variados teores de substituição de agregados derivados de resíduos da construção e demolição, o presente trabalho fez uso da metodologia apresentada na Figura 3, empregada na determinação dos modelos.

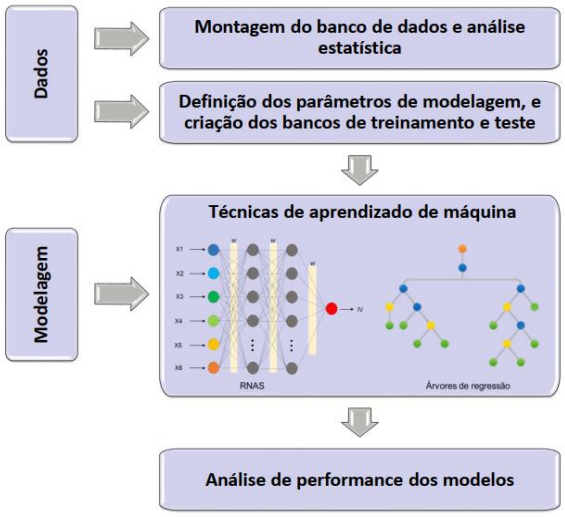


Figura 3 – Metodologia empregada na determinação dos modelos

Assim, conforme mostra a Figura 3, em um primeiro momento, foram coletados dados da literatura para a criação de um banco de dados. Em seguida, foi feita a análise e tratamento dos valores da etapa anterior, a fim de obter as correlações entre os dados. Com isso, foram desenvolvidos modelos com florestas aleatórias e redes neurais artificiais. Por fim, analisou-se as performances visando selecionar o melhor modelo gerado, determinando aquele que melhor prevê a difusão de cloretos.

2.1 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Para a criação de um modelo numérico eficiente, capaz de prever o coeficiente de difusão de cloretos em concretos com agregados reciclados, faz-se necessária a coleta de dados pertinentes da literatura, bem como tratamento das variáveis. No total, foram obtidos 188 dados, coletados de trabalhos da literatura, conforme apresentado no Quadro 1. Todos os dados fazem referência a concretos produzidos com agregados graúdos de RCD, oriúndos exclusivamente de materiais cimentícios. Ademais, alguns concretos possuem em sua composição, adições minerais: cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa.

Em relação aos estudos utilizados para a definição do banco de dados, Pedro et. al (2015) e Qin et. al (2010) destacam a existência de aumento no fator água/aglomerante em concretos com agregados reciclados, o qual se deve à alta absorção de água de agregados reciclados.

Qin et. al e Yu et. al (2020) observaram que, com o aumento da substituição de agregado natural por agregados reciclados, o coeficiente de difusão de cloretos aumenta significativamente, sendo uma possível solução a utilização de adições, já que uma substituição parcial de 25% de cimento por cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa aproxima o coeficiente de concretos com agregados reciclados ao de agregado natural. Wayne et. al (2017) apresentam a mesma solução, possibilitando, com a adição de até 50% de escória de alto forno, utilizar até 60% de agregado graúdo reciclado. Em concordância a estas, a pesquisa de Kim et. al (2013) evidencia que concretos com agregados reciclados com a presença de cinza volante apresentam resistências maiores à penetração de cloretos quando comparado a concretos com agregados naturais, fato este confirmado pelo trabalho de Amorim et. al (2012), no qual, os autores observaram que a resistência à penetração de cloretos é menor quando o concreto é submetido a ambientes de cura com baixa umidade.

Quadro 1 – Descrição do banco de dados.

N°	Referência	N° de Dados	Proporção de dados (%)
1	Amorim et al. (2012)	16	8,51
2	Kim et al. (2013)	7	3,72
3	Pedro et al. (2015)	18	9,57
4	Qin et al. (2010)	30	15,96
5	Wayne et al. (2017)	48	25,53
6	Yu et al. (2020)	3	1,6
7	Kyuhun et al. (2013)	7	3,72
8	Marks et al. (2015)	59	31,38
	TOTAL	188	100

Uma vez que, para modelar um fenômeno complexo como a difusão de cloretos, é necessária uma análise detalhada da influência de cada variável, foi feita uma análise de correlação múltipla das variáveis, a qual é apresentada na Figura 4, por meio da matriz de correlação de Pearson.

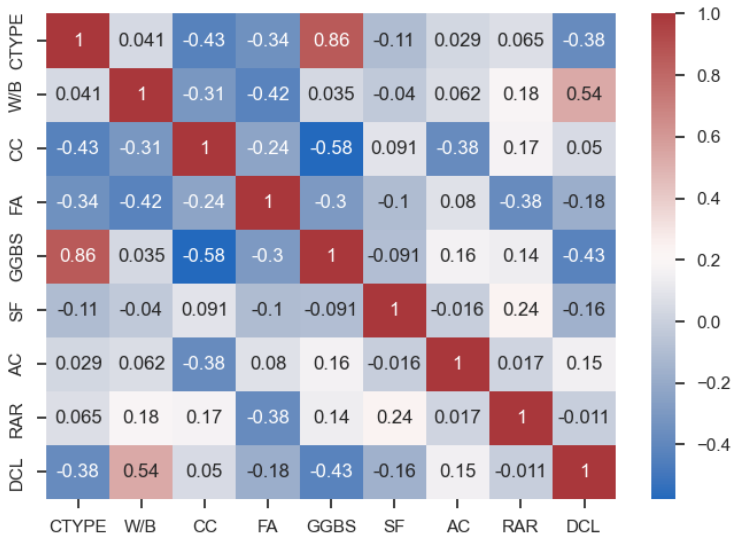


Figura 4 – Matriz de correlação de Pearson

As variáveis selecionadas para compor a análise e os parâmetros de entrada do modelo foram aquelas que mais influenciaram a difusão de cloretos (DCL), sendo elas o tipo de cimento (CTYPE), relação água e aglomerante (W/B), consumo de cimento (CC), quantidade de cinza volante (FA), de escória de alto forno (GGBS), de sílica ativa (SF), quantidade total de agregados (AC) e, por fim, teor de substituição de agregado reciclado (RAR).
Conforme demonstrado na Figura 4, a relevância do parâmetro é reduzida quando está próximo de 0 e aumenta quando próximo de 1 ou -1. O valor positivo indica uma correlação direta entre a variável de entrada e a variável alvo, e, o valor negativo, o inverso. O Quadro 2 apresenta os parâmetros estatísticos como valor máximo, mínimo, média e desvio padrão.

Quadro 2– Parâmetros estatísticos do banco de dados.

Variável/parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Tipo do cimento (CTYPE)	-	1	3	1,48	0,80
Fator água/aglomerante (W/B)	-	0,27	1,02	0,49	0,13
Consumo de cimento (CC)	Kg/m³	136,00	600,00	305,81	95,73
Adição de cinza volante (FA)	Kg/m³	0,00	275,00	42,33	73,32
Adição de escória (GGBS)	Kg/m³	0,00	254,00	41,25	81,01
Adição de sílica ativa (SF)	Kg/m³	0,00	150,00	3,65	20,53
Quantidade total de agregados (AC)	Kg/m³	1150,00	1997,00	1762,24	151,39
Teor de substituição de agregado reciclado (RAR)	-	0,00	1,00	0,40	0,45
Coeficiente de Difusão de íons cloreto (DCL)	$10^{-12}m^2/s$	1,52	37,04	12,68	8,61

2.2 MODELAGEM COM APRENDIZADO DE MÁQUINA

As redes neurais artificiais foram definidas a partir da diferenciação do número de neurônios nas duas camadas ocultas, variando de 1 a 10, gerando 100 redes (conforme Figura 2). Os dados foram divididos em 70% para treinamento, 15% para teste e 15% para validação cruzada. A validação cruzada foi utilizada paralelamente à etapa de treinamento, para que não ocorresse o super treinamento da rede. A RNA contou com um número máximo de interações de 500.000, taxa de aprendizado de 0,1 e função de ativação do tipo sigmóide. As redes foram iniciadas sempre com pesos sinápticos de 0,5, para que fosse possível inferir a arquitetura com melhor performance.

As redes neurais artificiais e as árvores de decisão foram criadas e treinadas utilizando o pacote Sciket-learn (PEDREGOSA et al., 2011), e a programação dos códigos foi feita em linguagem Python. Para a modelagem com as florestas aleatórias, foram realizados os seguintes processos:

- Divisão dos dados em conjuntos de treinamento, validação e teste;
- Escolha do algoritmo de treinamento, onde foi utilizado RandomForestRegressor. Comenta-se, que neste trabalho foram utilizadas florestas com 1-100 árvores de decisão;
- Treinamento do modelo, onde é feita a busca pela configuração da floresta. A busca foi feita considerando a minimização do erro médio quadrático (MSE) dos resíduos do modelo;
- Validação do modelo: após o treinamento, é importante avaliar o desempenho do modelo para verificar se ele está se ajustando adequadamente aos dados. Para isso foi empregado o conjunto de teste para fazer previsões e comparou-se os valores reais com os preditos;

- Para o ajuste e otimização do desempenho dos modelos, faz-se necessário ajustar os hiper parâmetros do algoritmo para melhorar o desempenho. Assim, pode-se alterar as profundidades máximas das árvores, critérios de divisão ou outras configurações para encontrar a melhor combinação. Foram avaliadas profundidades máximas de 20.

A performance dos modelos foi avaliada por meio da utilização do coeficiente de determinação (R^2) e o erro quadrático médio (RMSE), isto é, o desvio padrão dos erros de previsão. A fim de facilitar a determinação dos modelos de ANN e florestas aleatórias com as melhores performances, considerou-se uma métrica de performance combinada, apresentada na Equação 1, chamada R^2 POND, que considerou as performances obtidas nas fases de treinamento e teste, o que permitiu classificar e avaliar os cinco melhores modelos de cada técnica. A equação combina os dados das fases de treinamento (40%) e teste (60%), fazendo com que os melhores modelos apresentem as maiores capacidades de generalização.

$$R^2\ POND\ =\ 0{,}4\ R^2\ Train\ +\ 0{,}6\ R^2\ Test \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 FLORESTAS ALEATÓRIAS

Conforme mencionado previamente, as árvores foram desenvolvidas considerando profundidades máximas que variam entre 1 e 100. O Quadro 3 apresenta os parâmetros de performance, avaliados neste trabalho, para as cinco melhores florestas, determinadas em função do R^2 POND.

Quadro 3 - Florestas de decisão com as 5 melhores configurações.

N°. Árvores	R^2 POND	R^2 TRAIN	R^2 TEST	R^2 GERAL	RMSE
53	0,835	0,946	0,761	0,916	2,494
54	0,825	0,944	0,747	0,912	2,547
21	0,865	0,951	0,808	0,927	2,314
62	0,857	0,952	0,794	0,926	2,336
37	0,855	0,938	0,800	0,915	2,501

A média dos coeficientes de determinação (R^2) encontrados nas 5 melhores florestas foi de 0,848 na fase de treino, 0,904 na fase de teste e 0,919 quando da avalição em todo o banco de dados (R^2-GERAL). Estes resultados denotam uma boa precisão do modelo, mas observa-se uma menor capacidade de generalização, ao avaliar o R^2-TESTE, o que pode indicar que os modelos com florestas aleatórias geraram mapeamentos superajustados ou, que é baixa a quantidade de dados empregados no banco de dados usados no teste. Na Figura 5 são apresentados os gráficos de distribuição dos resíduos, nas análises com dados de treinamento e teste, e de dispersão entre os valores preditos e observados, para a floresta com melhor performance, composta por 21 árvores. Da Figura 5, observa-se que o modelo gerado com as florestas apresenta boa estabilidade nas predições e que, se for desconsiderado a amostra anômala, com resíduo de 14,8 x10^{-12} m²/s, o modelo apresenta um RMSE de 2,2 x10^{-12} m²/s para a predição do coeficiente de difusão de cloretos.

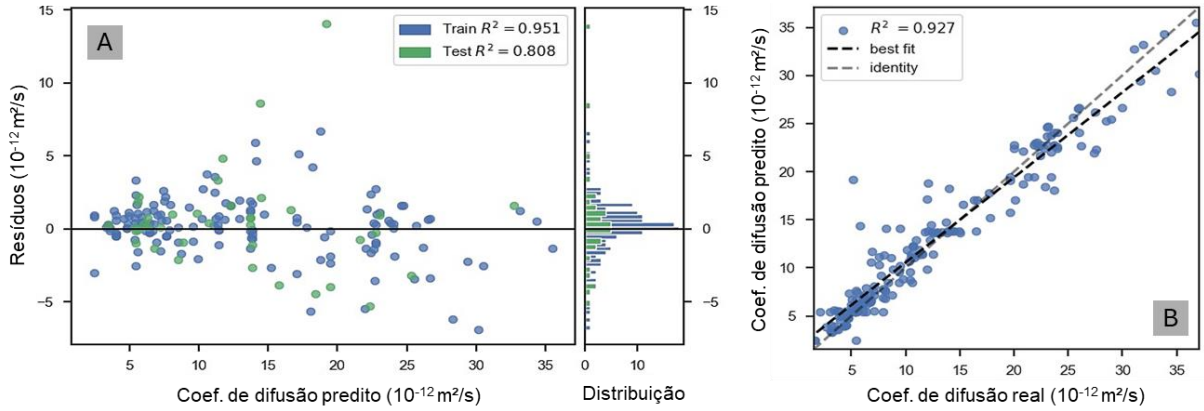


Figura 5 – Performance da floresta com 21 árvores.

3.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Após o treinamento das redes neurais artificiais (RNAs), foi realizada uma análise detalhada do desempenho de cada uma, com o objetivo de identificar a melhor topologia dentre as exploradas neste estudo. O Quadro 4 apresenta o desempenho das cinco topologias mais promissoras, utilizando o R^2 ponderado para o ranqueamento. A média dos R^2 encontrados nas 5 melhores topologias de RNA foi de 0,849 para R^2-TRAIN e 0,904 para R^2-TEST. Uma vez que o problema apresenta um grande número de variáveis e uma alta complexidade, os valores obtidos indicam um modelo eficiente de RNA.

Quadro 4 - Florestas de decisão com as 5 melhores topologias.

Topologia*	R^2 POND	R^2 TRAIN	R^2 TEST	R^2 RESIDUAL	RMSE
[8-8-10-1]	0,891	0,864	0,909	0,870	3,096
[8-9-10-1]	0,883	0,863	0,896	0,867	3,132
[8-7-3-1]	0,883	0,846	0,907	0,854	3,280
[8-7-6-1]	0,877	0,870	0,881	0,871	3,082
[8-8-5-1]	0,877	0,801	0,927	0,817	3,669

*OBS.: topologia é representada por [8-x-y-1], em que x indica a quantidade de neurônios na primeira camada oculta, e y, o número de neurônios na segunda camada.

Do Quadro 4 é posível bservar que as melhores redes aporesentaram desempenhos semelhantes nas etapas de teste e treinamento, ao contrário das florestas aleatórias, o que indica uma maior estabilidade dos modelos gerados pelas RNAs. Além disso, verifica-se que essas redes neurais apresentam uma capacidade superior de generalização, proporcionando maior confiabilidade em aplicações reais.

A Figura 6 apresenta a distribuição dos resíduos gerados com a rede de melhor performance, com topologia [8-8-10-1], com R^2 geral de 0.87 e RMSE de 3.096 x10^{-12} m²/s. Pela Figura 6.A pode observar que a distribuição dos resíduos pode ser caracterizada por uma distribuição normal com média o, indicando que o modelo possui estabilidade na capacidade de generalização.

Ao avaliar os 10 melhores modelos, considerando as performances dos Quadros 3 e 4, e o R^2 ponderado (R^2 POND), o modelo de melhor performance refere-se ao gerado com RNAs de topologia

[8-8-10-1], com R^2 ponderado de 0,89 e erro médio de 3.09 x10^{-12} m²/s. Para este modelo, fez-se uma análise de importância dos parâmetros de entrada na capacidade de predição do coeficiente de difusão de cloretos, onde os resultados são apresentados na Figura 7.

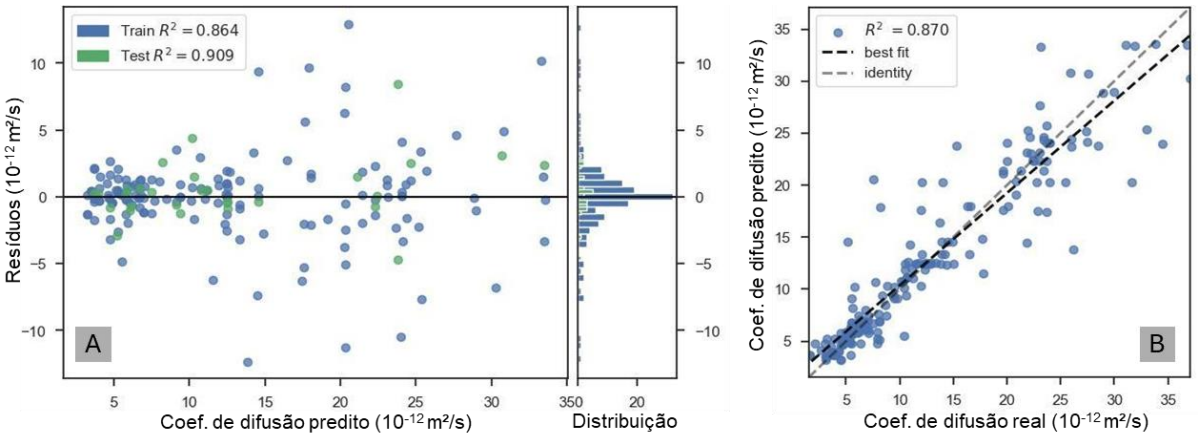


Figura 6 – Performance da rede com topologia [8-8-10-1].

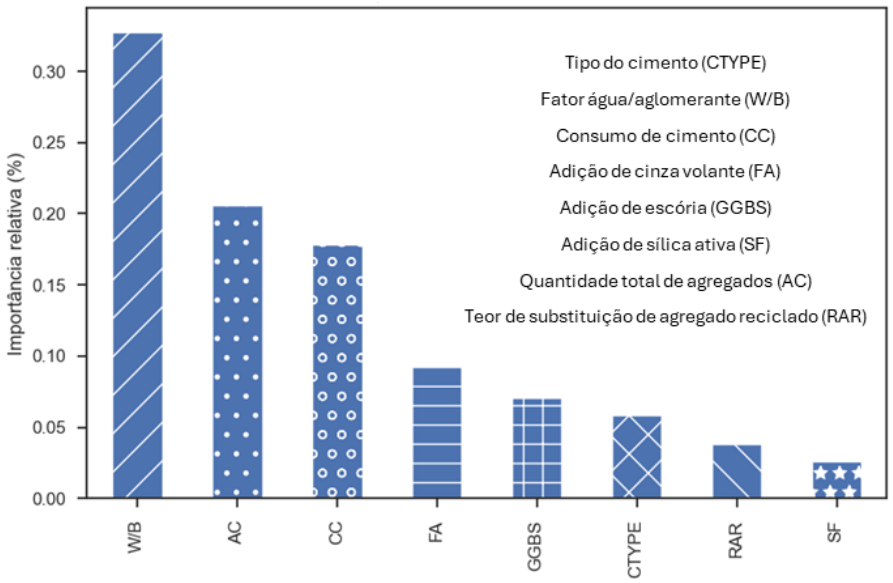


Figura 7 – Importância relativa de cada variável.

Da Figura 8, é possível observar que os três parâmetros com maior relevância na modelagem do coeficiente de difusão de cloretos no concreto é: a relação água materiais ligantes (importância de 33,27%); consumo de agregado graúdo (importância de 20,68%); e consumo de cimento (importância de 17,91%). Os demais parâmetros apresentaram importâncias abaixo dos 10%. Para o banco de dados empregado nas modelagens, foi inferido que o teor de substituição do agregado natural pelo de RCD apresentou uma importância relativa de 4,84% na capacidade de predição do modelo, indicando que este parâmetro pode não apresentar grande relevância na resistência à difusão de cloretos em concretos com RCD, o que será em seguida avaliado mediante investigação experimental.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a eficiência e a capacidade de generalização dos modelos de RNA desenvolvidos para prever o índice de difusão de cloretos em concretos com a presença de agregados reciclados derivados de resíduos de construção e demolição. Os modelos obtidos configuraram um coeficiente de determinação médio de 0,849 na fase de treinamento e 0,904 durante os testes. De forma geral, os modelos gerados neste trabalho, apresentaram boa capacidade preditiva e de generalização.

Além disso, a comparação dos valores de R^2-TRAIN e R^2-TEST evidenciou uma boa precisão do modelo, embora tenha sido observada uma ligeira diminuição na capacidade de generalização para dados não utilizados no treinamento. Esse aspecto sugere a necessidade de refinamento contínuo do modelo para melhorar sua capacidade de generalização em diferentes cenários de aplicação.

A análise da importância das variáveis de entrada revelou que a relção água-aglomerantes é o mais influente, dentre os investigados, apresentando uma importância acima de 30%, na acurácia das predições.

Por fim, os resultados da fase de teste destacaram o potencial das RNA em estimar o índice de difusão de cloretos, demonstrando sua eficiência na modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A aplicação de técnicas de aprendizado de máquina reduz a dependência de ensaios experimentais, contribuindo para uma análise mais ágil e econômica da difusão de cloretos em concretos com RCD, promovendo assim práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil, alén de subsidiar a tomada de decisões em prejetos que tenham como premissas a sustentatiblidade e a durabilidade.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão do escopo deste estudo para investigar outros parâmetros de durabilidade do concreto, bem como a avaliação do desempenho do modelo em diferentes condições ambientais e composições de materiais. Além disso, a otimização do modelo para melhorar sua capacidade de generalização e a validação experimental dos resultados preditos são aspectos importantes a serem considerados em futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

Amorim P., de Brito J. and Evangelista L. (2012). Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability. ACI Materials Journal, 109(2):195-204.

Angulo, S. C. (2005). Concretos com agregados reciclados, Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência no Comportamento Mecânico de Concretos. 167 f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo.

Behnood, A., Olek, J., Glinicki, M. A. (2015). Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M50 model tree algorithm. Construction and Building Materials. Vol. 94: 137-147.

Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., Olshen, R.A. (1984). Classification and regression trees. CRC Press.

Dierkens M., Godart B., Mai-Nhu J., Rougeau P., Linger L., et al. (2019). French national project 'PERFDUB' on performance-based approach : interest of old structures analysis for the definition of durability indicators criteria. 16th fib Symposium, Concrete Innovations in Materials, Design and Structures, CRACOVIE, Poland. 8 p.

Dilbas H., Şimsek M., Çakır Ö. (2014). An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. Construction and Building Materials, v. 61: 50-59.

Dodds, W., Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Dunne, D. (2017). Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on rapid chloride migration and accelerated corrosion, Construction and Building Materials, 155:511-521. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.073.

Falcão, I., Dos Santos, L., Félix, E. (2023). Aprendizado de Máquinas aplicado à predição do índice de vazios de concretos com agregados oriundos de RCD. Congresso Brasileiro do Concreto, 64., Florianópolis.

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. New York: Springer.

Kim K., Shin M., Cha S. (2013). Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. Construction and Building Materials, 48:499-507.

Krogh, A. (2008), What are artificial neural networks?, Nat Biotechnol, 26: 195–197. https://doi.org/10.1038/nbt1386.

Lovato, P. S. (2007). Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Para Utilização em Concreto. 182 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Marks, M., Glinicki MA., Gibas K. (2015). Prediction of the Chloride Resistance of Concrete Modified with High Calcium Fly Ash Using Machine Learning. Materials, 8(12):8714-8727. https://doi.org/10.3390/ma8125483

Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, L. (2015). Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: Influence of the crushing process. Materials and Structures, 48:3965-3978.

Qin, H. Y., Zhao, Y. L., Luo, B. G., & Chen, Y. H. (2010). Experimental Study on the Chloride Diffusivity of Recycled Aggregate Concrete. Advanced Materials Research, 168-170, 1404–1408. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.168-170.1404

Tatsuhiko, S., Kenji, S., Kenta, S. (2006). Estimation of Chloride Diffusion Coefficent of Concrete Using Mineral Admixtures, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(3): 385-394. https://doi.org/10.3151/jact.4.385

Van Quan, T. (2016). Contribution à la compréhension des mécanismes de dépassivation des armatures d'un béton exposé à l'eau de mer : théorie et modélisation thermochimique.

Wuman, Z. (2013). Chloride diffusion coefficient and service life prediction of concrete subjected to repeated loadings. Magazine of Concrete Research. 65:185-192.

Yu, Y., & Lin, L. (2020). Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 264, 120620. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.12.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTRATÉGIA INTEGRADA PARA A SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NO SETOR AECO: UMA ABORDAGEM 360°

Marco Frazão Pedroso[a]; José Dinis Silvestre[a]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal; AECycle, Lda.; marco.pedroso@tecnico.ulisboa.pt e jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise das estratégias para transformar o setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) com foco em sustentabilidade, digitalização e inovação. Utilizou-se uma revisão crítica da literatura para identificar os principais serviços e 'enablers' necessários para novos modelos de negócio, incluindo avaliação ambiental, estratégias de economia circular e desenvolvimento tecnológico.

A metodologia envolveu a análise de 21 documentos-chave para identificar práticas eficazes e desafios na implementação dessas estratégias. Os resultados indicam que uma abordagem sistémica (360°) é crucial para reduzir emissões de carbono e otimizar o uso de recursos no setor AECO. A digitalização mostrou-se vital na operacionalização de novas estratégias, facilitando a adoção de práticas sustentáveis.

Conclui-se que a implementação de uma abordagem integrada (sistémica) promove um setor AECO mais sustentável e inovador. Recomenda-se que as empresas adotem práticas que combinam sustentabilidade e tecnologias digitais para melhorar a sua eficiência operacional. Este estudo oferece um guia prático para profissionais e empresas do setor, contribuindo para um futuro mais resiliente e eficiente no setor AECO. As recomendações incluem a necessidade de superar barreiras culturais e económicas para a adoção dessas práticas inovadoras.

Palavras-chave: Abordagem 360°; Digitalização; Inovação; Modelos de negócio; Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A introdução foi dividida em dois blocos principais: um primeiro bloco onde se efetua um breve enquadramento e contextualização da realidade atual do setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) e a identificação dos objetivos deste estudo; posteriormente, uma revisão da literatura como suporte à identificação da relevância atual desta temática.

1.1 ENQUADRAMENTO E CONTEXTUALIZAÇÃO

No atual cenário global, o setor AECO enfrenta desafios sem precedentes, impulsionados pela necessidade de atingir metas ambientais (ex.: redução de emissões de carbono), sociais e económicas ligadas a crescentes necessidades de *compliance*. São disto mesmo exemplo as metas de neutralidade carbónica de 2050 (European Parliament, 2020), ou o crescente escrutínio a nível da exposição ao risco e à resiliência pelo Banco Central Europeu para os financiamentos, seguindo a Taxonomia Europeia e levando à CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) e à NFRD (*Non-Financial Reporting Directive*) (NCBI, 2017). Tal como os restantes setores, o AECO também é aqui visado e condicionado.

O setor AECO representa um campo dinâmico e em constante evolução, desempenhando um papel vital na economia e no desenvolvimento social, já que é responsável, em termos médios Europeus, por cerca de 13% do PIB nacional e por mais de cinco milhões de trabalhadores diretos e indiretos (Sáez-de-Guinoa et al., 2022). No entanto, quando se analisa o seu impacte (considerando o ciclo de vida completo, desde a extração das matérias-primas ao fim de vida), verifica-se que, a nível europeu, é responsável por: 50% do consumo energético; 30% do consumo de água potável; 40% das emissões de gases de efeito de estufa; 50% das matérias-primas extraídas; e 30% dos resíduos gerados (JRC, 2024). Adicionalmente, é um setor que tem reconhecidamente uma baixa produtividade, quando comparado com, por exemplo, o setor da indústria (manufatura) – Figura 1.

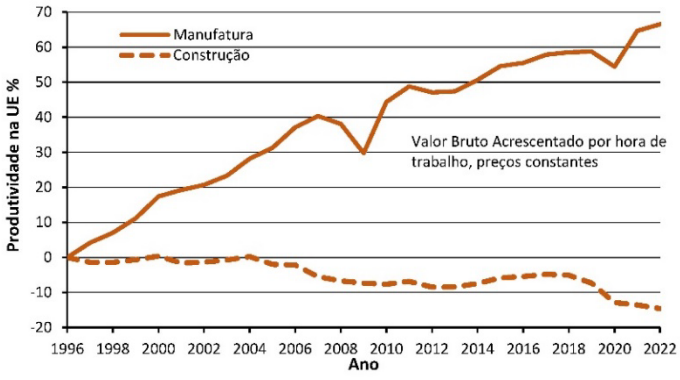


Figura 1. Produtividade média da EU27 ao longo dos anos (OECD, 2024)

Este setor enfrenta assim, atualmente, diversos desafios críticos, particularmente em relação à sustentabilidade, eficiência de utilização de recursos naturais (e implicações na biodiversidade), geração de resíduos e produtividade. Adicionalmente, o estudo conduzido pelo (European Construction Sector Observatory, 2021) identifica desafios como a escassez de mão de obra qualificada e a competitividade. Estes desafios demonstram claramente a necessidade urgente de abordagens inovadoras, eficientes, sustentáveis e circulares, que possam dar resposta aos objetivos e metas ambientais, sem esquecer os vetores social e económico.

Este *business-as-usual* tem estado diretamente ligado a uma abordagem de funcionamento de economia linear (*Take – Make – Waste*), facilmente percebido pela depleção de recursos naturais e pela geração de resíduos deste setor, alicerçado pelo pensamento maioritariamente associado ao

custo inicial (CAPEX). No entanto, se se quiserem ultrapassar os desafios identificados, o paradigma terá de mudar forçosamente. Aqui, o "Circular Economy Report" (ENCORD, 2024), aponta para a emergência da criação de um ambiente construído baseado em princípios de economia circular, com pressões políticas e legislativas que suportem a transição para uma economia verde e sustentável (Pedroso & Tavares, 2024). Esta é uma ideia também presente no estudo desenvolvido por (Papadaki et al., 2023), que identifica o setor da construção como necessitando desenvolver competências e talentos, com o suporte da inovação, tecnologia e financiamento circular.

No entanto, esta mudança de paradigma (linear para circular) é uma tarefa complexa, tanto mais num setor em que cada construção é, na sua essência, um protótipo, utilizando centenas (ou milhares) de produtos e com cadeias de valor bastante fragmentadas e dispersas. Aqui, e tal como referido no relatório "Digitalisation in the Construction Sector" (European Construction Sector Observatory, 2021), a digitalização é vista como um elemento-chave para enfrentar desafios como a escassez de mão de obra qualificada e a competitividade. Além disso, destaca a necessidade de melhorar a eficiência na utilização dos recursos e a produtividade através da adoção de tecnologias digitais, tais como sensores, IoT e digitalização 3D, embora se reconheça que o setor está ainda num baixo grau de maturidade.

Com o enquadramento e contextualização efetuados, percebe-se que a sustentabilidade no setor AECO não é um objetivo isolado, mas sim uma meta que deve ser perseguida através de uma abordagem integrada que combine inovação, digitalização e práticas sustentáveis. Conforme indicado na revisão de literatura realizada por (Rosa et al., 2019), a economia circular emerge como um conceito fundamental, oferecendo uma estratégia para transformar os desafios ambientais em oportunidades de inovação. A adoção de tais práticas não impulsiona apenas a sustentabilidade, mas abre caminho para oportunidades de negócio e crescimento económico e social.

Assim sendo, este artigo examina as estratégias necessárias para uma transformação sustentável no setor AECO, enfatizando a necessidade de uma abordagem integrada 360º que englobe sustentabilidade, digitalização e inovação. Através da informação recolhida na literatura, identifica ainda as principais oportunidades e desafios que podem impulsionar uma mudança de paradigma. Esta investigação também explora os desafios encontrados na implementação dessas estratégias, com um foco particular nas tendências futuras e na tão necessária adaptação e evolução do setor. Os resultados obtidos destacam a necessidade de adotar estratégias integradas e inovadoras no setor e a importância da digitalização como uma ferramenta facilitadora (*enabler*) para a implementação dessas novas estratégias. Com este trabalho pretende-se assim oferecer um guia para navegar num futuro sustentável e responsável neste setor, fornecendo *insights* para empreendedores e profissionais que pretendam integrar a sustentabilidade e a inovação nas suas operações.

1.2 REVISÃO DA LITERATURA

O setor AECO enfrenta desafios significativos relativos à sustentabilidade e eficiência. Como tal, a necessidade de ocorrer uma transição para práticas mais sustentáveis é imperativa (European Construction Sector Observatory, 2021), que sublinha ainda a importância da digitalização como uma força motriz para impulsionar a mudança do setor. A adoção de tecnologias digitais desempenha um papel crucial na transformação do setor, especialmente em termos de eficiência na utilização de recursos, produtividade e redução da pegada de carbono.

Quando se aborda a Economia Circular e a Sustentabilidade, a literatura destaca a crescente tendência de modelos de negócios circulares no setor AECO como uma resposta aos desafios ambientais. Documentos como o "Circular business models: A review" (Geissdoerfer et al., 2020) e "Towards Circular Business Models" (Rosa et al., 2019) exploram como a implementação de práticas

circulares podem conduzir a uma maior sustentabilidade. Esses modelos focam-se não só na redução do desperdício, mas também na criação de valor através da reutilização e reciclagem de materiais (Das et al., 2023), representando um avanço em relação às práticas tradicionais de construção (lineares).

Também aqui o papel da digitalização, como se viu, é de grande relevância. A digitalização é mesmo identificada como um elemento-chave na transição para práticas circulares sustentáveis e eficientes. Como indicado no estudo desenvolvido por (Toth-Peter et al., 2023), a integração de tecnologias da Indústria 4.0 já se encontra a promover o surgimento de modelos de negócios inovadores e sustentáveis. Metodologias como o BIM (*Building Information Modelling*) e plataformas digitais já permitem um planeamento mais preciso, uma execução eficiente de projetos e a disponibilização de informação de forma facilitada, reduzindo o desperdício e melhorando a gestão de recursos. Um dos principais documentos nesta área, o relatório "Digitalization in the construction sector" (European Construction Sector Observatory, 2021), identifica dez KET (*Key Enabling Technologies*) como essenciais para que ocorra esta mudança – ver §3.1.

A sinergia entre tecnologias digitais e sustentabilidade é acima de tudo reconhecida pelo World Economic Forum e pela Comissão Europeia (Kretz et al., 2023) como uma dupla transição, ou *twin transition*, em que a tecnologia digital potencia a sustentabilidade. De facto, só a tecnologia permite a obtenção de dados e sua transformação em informação útil, conduzindo a uma maior sustentabilidade das ações considerando uma perspetiva do ciclo de vida, o que de outra forma seria impossível.

Com esta compreensão e reconhecimento de que as tecnologias digitais são um elemento crucial na facilitação da economia circular, começaram a ser pensados novos modelos de negócios no setor AECO (Kanzari et al., 2022). Esta transição para a economia circular é reconhecida como sendo uma das tendências mais promissoras no setor AECO, oferecendo oportunidades para melhorar a sustentabilidade e eficiência. No estudo efetuado por (Fatimah et al., 2023), os autores desenvolvem um modelo de e-business circular que integra recolha, processamento e marketing dentro de uma estrutura de economia circular, sublinhando a importância da digitalização e sua interação com os modelos de negócios circulares. Além disso, no "Circular Economy Report" (ENCORD, 2024) discute-se como as mudanças no modelo de negócio e a digitalização podem impulsionar uma indústria da construção mais circular, destacando o papel das grandes empresas na criação de serviços circulares de valor acrescentado. Aqui, a inovação nos modelos de negócios circulares é essencial para promover a sustentabilidade no setor. Já o estudo efetuado por (Geissdoerfer et al., 2020), fornece um panorama sobre a história, definições e estruturas conceptuais relacionadas com modelos de negócios circulares, destacando-se a necessidade de inovação e colaboração entre *stakeholders*.

Apesar da margem de progressão destes novos modelos de negócio, existem diversos desafios e barreiras (que podem ser oportunidades). Assim, é necessário identificar e superar os desafios na adoção de modelos de negócios circulares. No estudo efetuado por (Al-Awlaqi & Aamer, 2022), os autores examinam o papel dos fatores que influenciam os empreendedores na adoção de modelos de negócios circulares pelas suas pequenas e médias empresas em economias com recursos limitados, sendo as vertentes financeira e de conhecimento / sensibilização referidas como barreiras complexas de se ultrapassar. Assim, apesar dos benefícios das práticas sustentáveis e da digitalização, existem desafios significativos na sua implementação. Os estudos efetuados por (Papadaki et al., 2023) e (Santa-Maria et al., 2022) ilustram algumas destas barreiras, incluindo a resistência à mudança, a falta de conhecimento técnico e, uma vez mais, os desafios económicos. Estes estudos reforçam a necessidade de adotar estratégias que abordem tanto os aspetos técnicos quanto os culturais para uma transição bem-sucedida no setor AECO.

Através de uma breve revisão da literatura foi possível destacar a importância de abordagens integradas que combinem sustentabilidade, inovação e digitalização no setor AECO. A transição para práticas mais sustentáveis, circulares, produtivas e eficientes é crucial não apenas para o meio ambiente, mas também para a viabilidade económica e social a longo prazo do setor. Os documentos analisados forneceram, assim, uma base para a compreensão dos atuais desafios e oportunidades.

2 METODOLOGIA

Esta investigação adotou uma abordagem metodológica de revisão de literatura, consistindo numa análise crítica dos resultados e conclusões de documentos publicados. Este processo teve como objetivo identificar lacunas no conhecimento existente sobre o setor AECO, com particular ênfase em práticas de modelos de negócio circulares, sustentáveis, digitais e inovadores. Muito embora haja diversos documentos que abordam estas temáticas de forma separada, a abordagem sistémica que aqui se pretende apresentar ainda apresenta pouca expressão.

A estratégia de investigação e de seleção de documentos adotada levou a que, numa primeira fase, fosse efetuada a recolha de dados. Esta envolveu uma pesquisa extensiva em fontes académicas e profissionais, incluindo revistas científicas, comunicações de conferências, relatórios, capítulos de livros e teses de doutoramento. Esta investigação focou-se em documentos recentes, com maior preferência pelos publicados nos últimos cinco anos, para garantir a relevância e atualidade dos dados. Para os critérios de seleção, os documentos selecionados foram escolhidos de acordo com a sua relevância para os temas centrais do artigo, como “sustentabilidade”, “digitalização no setor AECO”, “economia circular”, “modelos de negócio circulares”, “abordagem sistémica”, “abordagem 360º”, “abordagem integrada”, “dupla transição” e “inovação tecnológica”. Estas palavras-chave foram usadas em língua portuguesa e inglesa e em associação de palavras, ou separadas. Posteriormente foram utilizadas em motores de busca e bases de dados académicas para identificar publicações pertinentes, como por exemplo: *sciencedirect*, *google scholar*, *google*, ou *webofscience*.

A análise e organização dos dados foi possível usando o seguinte procedimento: cada documento selecionado foi analisado para compreender as perspetivas e contribuições relevantes sobre os temas em estudo; após essa seleção, as principais informações, como os principais contributos, os resultados da investigação, bem como eventuais recomendações relevantes, foram extraídas e organizadas sistematicamente; posteriormente foi desenvolvida uma matriz/tabela de dados, facilitando a comparação e a síntese das informações recolhidas. A matriz permitiu, assim, uma visão global dos temas, facilitando a identificação de tendências e o cruzamento das informações presentes nos estudos. Após a análise, foi possível identificar os 21 documentos considerados chave para este artigo.

Com os principais documentos identificados, procedeu-se à avaliação, síntese e interpretação. Após a compilação dos dados, realizou-se uma síntese crítica para interpretar as tendências gerais e as implicações para o setor AECO. Esta etapa envolveu a avaliação do impacte das tecnologias emergentes e das práticas inovadoras na eficiência, sustentabilidade, circularidade e desenvolvimento do setor.

No entanto, reconhecem-se algumas limitações associadas à metodologia seguida, como sejam o potencial enviesamento na seleção de estudos, em que alguns estudos podem não ter sido identificados ou a informação recolhida não ser a mais detalhada, bem como o âmbito e profundidade dos dados analisados poderem conter imprecisões. Reconhece-se, ainda, a necessidade de uma análise crítica mais profunda sobre as limitações e desafios práticos que estes modelos de negócios enfrentam, incluindo aspetos como custos de implementação, resistência à mudança organizacional e barreiras tecnológicas. Contudo, tentaram-se mitigar estas limitações considerando a informação mais recente encontrada, a classificação da publicação envolvida e o cruzamento dos diversos documentos.

A metodologia adotada permitiu um entendimento aprofundado das abordagens atuais e futuras no setor AECO, sublinhando a importância de estratégias integradas de sustentabilidade e inovação. Os resultados desta análise contribuem, assim, para um maior entendimento das necessidades e oportunidades no setor, contribuindo também para orientar futuras investigações e práticas a adotar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O setor AECO necessita urgentemente de adotar práticas sustentáveis e circulares, seja pela pressão regulatória ou pelas expectativas do mercado. A análise dos estudos (Al-Awlaqi & Aamer, 2022; Geissdoerfer et al., 2020; Salvador et al., 2021) mostrou que os principais modelos de negócio nesta área e para este setor se focam na **avaliação e certificação ambiental**, no **suporte à implementação de estratégias de economia circular**, na **capacitação *twin transition*** (digital e sustentável) e no **desenvolvimento de plataformas, tecnologias e sistemas digitais** para sustentabilidade. De seguida apresenta-se a análise efetuada para cada um desses modelos, sendo posteriormente realizada a discussão quanto ao potencial que uma abordagem integrada (360°) apresenta.

3.1 ANÁLISE DE MODELOS DE NEGÓCIOS INOVADORES

Avaliação e Certificação Ambiental

A importância da avaliação e certificação ambiental no setor AECO tem sido cada vez mais reconhecida, como evidenciado pelos estudos analisados. Modelos de negócios que se concentram nestas áreas têm mostrado um impacte significativo na redução da pegada de carbono. Projetos que obtêm certificações como LEED ou BREEAM, por exemplo, demonstram uma melhoria média de 20% na eficiência energética (Veselka et al., 2020). Esta melhoria não só representa uma contribuição para a sustentabilidade ambiental, mas também oferece benefícios económicos e de conforto (sociais). Adicionalmente, a certificação ambiental funciona como instrumento de marketing.

A adoção de sistemas de avaliação e certificação ambiental por parte das empresas do setor simboliza um compromisso crescente com a sustentabilidade. Segundo o EMI (Kretz et al., 2023), cerca de 38% das pequenas e médias empresas (PMEs) relataram investimentos significativos na transição para práticas mais verdes nos últimos cinco anos e preocupações com a execução de Declarações Ambientais dos seus Produtos (DAP). Esta tendência indica uma mudança substancial para abordagens ambientalmente mais responsáveis, ajudando as empresas a cumprir com a regulamentação.

Por outro lado, estes modelos de negócios enfrentam desafios, incluindo o alto custo e complexidade do processo de certificação, o que pode ser particularmente desafiador para empresas de menor dimensão. Adicionalmente, a falta de padronização nas avaliações ambientais pode criar inconsistências e confusão. Contudo, as oportunidades superam estas barreiras, com uma procura crescente por edifícios sustentáveis e eficientes energeticamente, que oferecem a possibilidade de melhorar a imagem de marca e a reputação corporativa. Apesar da resistência à mudança em alguns segmentos do setor, especialmente em mercados menos desenvolvidos, a avaliação e certificação ambiental estão a estabelecer-se como elementos cruciais para o futuro sustentável do setor AECO.

Suporte à Implementação de Estratégias de Economia Circular

No contexto atual do setor AECO, a adoção de estratégias de economia circular é cada vez mais importante. A análise de projetos que adotaram estas estratégias indicam resultados promissores, com uma redução média de 30% no uso de materiais não renováveis (Gerding et al., 2021). Os modelos de negócio baseados nos princípios de 'reutilização, reciclagem e remanufatura' provaram ser

particularmente eficazes, demonstrando o potencial significativo de tais abordagens para otimizar o uso de recursos e minimizar o impacte ambiental (Mendonca & Vieira, 2022).

No entanto, a transição para a economia circular não está isenta de desafios. As barreiras incluem não apenas a resistência do mercado e a falta de conhecimento técnico, mas também a necessidade de uma mudança substancial na mentalidade e nas práticas atuais da indústria (Tavares & Pedroso, 2024). Apesar desses desafios, a adoção de estratégias de economia circular oferece uma oportunidade única para a inovação em materiais, tecnologias e modelos de negócio. Essa mudança é apoiada por uma crescente pressão regulatória e social para práticas mais sustentáveis, criando um ambiente propício para a implementação dessas estratégias. Um exemplo prático de sucesso pode ser visto na promoção da circularidade em projetos de construção, com foco na reutilização e reciclagem de materiais. Essas abordagens resultaram numa redução substancial dos resíduos de construção e numa maior eficiência dos recursos (Various, 2021). Finalmente, a consultoria em economia circular desempenha um papel fundamental, auxiliando as empresas a adaptarem-se e a evoluírem.

Ainda assim, o setor enfrenta ameaças como a competição com materiais e métodos de construção tradicionais, que muitas vezes são mais baratos, e a falta de infraestrutura e tecnologia adequadas para apoiar plenamente a economia circular. Apesar destes obstáculos, a economia circular permanece como um caminho promissor e necessário para o setor AECO.

Capacitação *twin transition*

A capacitação e a formação surgem como elementos cruciais no setor de AECO, particularmente no que diz respeito à implementação de práticas sustentáveis e à utilização de tecnologias inovadoras. Aqui, programas de formação focados em sustentabilidade, economia circular e tecnologias digitais são indispensáveis para a transição para um setor mais sustentável e eficiente. A formação contínua assegura que os trabalhadores estão sempre atualizados com as últimas tendências e tecnologias, maximizando assim o impacte das estratégias de sustentabilidade adotadas (Tavares & Pedroso, 2024). Apesar dos benefícios indiscutíveis, a conjugação desses programas de capacitação com as operações diárias das empresas pode ser um desafio. Além disso, o investimento contínuo em formação é necessário para manter as competências atualizadas, o que representa um custo para as empresas (Tavares & Pedroso, 2024). No entanto, a crescente procura por profissionais qualificados em sustentabilidade e tecnologias digitais oferece a possibilidade de desenvolvimento de parcerias com instituições educacionais e entidades de formação. Estas parcerias oferecem oportunidades para as empresas melhorarem as suas capacidades e alinharem-se com as práticas mais recentes.

A resistência à mudança dentro do setor, particularmente em empresas com práticas tradicionais, e a rápida evolução tecnológica, que pode rapidamente tornar algumas competências obsoletas, são ameaças significativas à eficácia dos programas de capacitação (Ababio & Lu, 2023). Apesar desses desafios, a importância da educação e da formação para o sucesso do setor AECO não pode ser subestimada, pois é um dos principais pilares para a mudança de paradigma (Fonseca et al., 2022).

Desenvolvimento de Plataformas, Tecnologias e Sistemas Digitais

O avanço da digitalização no setor AECO, especialmente a implementação de tecnologias e metodologias como o *Building Information Modeling* (BIM) e a *Internet of Things* (IoT), estão a reformular a maneira como os projetos de construção são geridos e executados. Por exemplo, a utilização de BIM contribuiu para uma redução de 15% no tempo de projeto e 25% no desperdício de materiais (Dalla Mora et al., 2020). Estas reduções mostram o potencial da digitalização na otimização de processos, na redução de custos e impactes, e na melhoria da produtividade.

No entanto a Comissão Europeia identificou dez KET (*Key Enabling Technologies*), incluindo o BIM e a IoT, com potencial de alavancar a transição sustentável (European Construction Sector Observatory, 2021). Assim, tecnologias como a robótica, impressão 3D, sensores avançados, realidade virtual e aumentada, inteligência artificial (IA), 3D Scanning, Gémeos Digitais, e drones são fundamentais na evolução do setor. A robótica, drones e a impressão 3D inovam na execução de tarefas, melhorando a qualidade e segurança. Os sensores e a IA fornecem análises precisas para a manutenção preditiva, enquanto a realidade virtual/aumentada e os Gémeos Digitais oferecem uma visão detalhada do projeto, otimizando o projeto e a operação dos edifícios. Dada a rápida evolução das tecnologias digitais, impera explorar o impacte de tecnologias emergentes como a IA e a Realidade Aumentada no setor AECO, considerando as suas aplicações futuras e desafios inerentes. No entanto, ao integrá-las, estas amplificam a eficiência energética, a gestão de recursos e a sustentabilidade, demonstrando o potencial transformador da digitalização e da *twin transition*.

Apesar destes benefícios claros, a digitalização traz desafios próprios, incluindo o alto custo inicial de implementação e a necessidade de formação especializada para os utilizadores. Além disso, a dependência da tecnologia e a vulnerabilidade a falhas e interrupções tecnológicas são preocupações significativas. Ainda assim, o crescimento contínuo do mercado das tecnologias digitais no setor, oferece oportunidades consideráveis para a melhoria contínua e inovação, através do feedback e análise de dados. Um exemplo disto mesmo é o aumento dos investimentos em tecnologias digitais para melhorar a gestão de recursos e a eficiência operacional, relatado por 46% das empresas, sublinhando a importância da digitalização no setor (European Construction Sector Observatory, 2021). Essa tendência aponta para uma consciência crescente da necessidade de integrar práticas sustentáveis e inovações digitais para alcançar melhores resultados. Comparando projetos que adotaram uma abordagem integrada com aqueles que não o fizeram, observou-se uma redução de até 40% nas emissões de carbono nos que combinaram sustentabilidade e digitalização (Kretz et al., 2023).

Pese embora o potencial significativo da digitalização, esta transição ainda enfrenta desafios culturais e estruturais, destacando a necessidade de mais educação e consciencialização no setor. Os principais desafios identificados incluem a falta de incentivos financeiros claros, a complexidade regulatória e a falta de experiência técnica em práticas sustentáveis e digitais. Superar esses obstáculos requer esforços colaborativos entre governos, indústrias e instituições educacionais, para facilitar a transição para um setor AECO mais sustentável, eficiente e inovador (Tavares & Pedroso, 2024).

3.2 Relevância da Abordagem Sistémica (360°)

No âmbito do setor AECO, enfrenta-se um período de desafios sem precedentes, marcados pelas alterações climáticas, pela degradação ambiental e pela crescente escassez de recursos. Nestas circunstâncias, uma abordagem sistémica e holística, abrangendo 360°, transcende a mera vantagem competitiva para se tornar uma necessidade estratégica. Esta abordagem multifacetada, que incorpora aspetos como a avaliação e certificação ambiental, economia circular, capacitação e digitalização, é fundamental para a resiliência e a sustentabilidade futura do setor.

A avaliação e certificação ambiental estabelecem níveis de excelência, demonstrando um compromisso para com a sustentabilidade. Tais padrões não só asseguram o *compliance*, mas também elevam a consciencialização ambiental entre os *stakeholders*, incentivando ainda a adoção de métodos construtivos sustentáveis. Paralelamente, a economia circular representa uma inovação disruptiva nos modelos de negócios tradicionais, promovendo a minimização do uso, a reutilização e a reciclagem de materiais. Este paradigma oferece um caminho para minimizar desperdícios e maximizar a eficiência de recursos. Além disso, a capacitação surge como um pilar fundamental na preparação dos

trabalhadores para abraçar e implementar essas práticas sustentáveis e tecnologias avançadas. Os programas de formação especializados são essenciais para equipar os profissionais com as competências necessárias para efetuar a gestão e implementação de novas práticas e tecnologias. A digitalização, por sua vez, ocupa uma posição central na abordagem 360°, transformando a gestão dos projetos de construção através da utilização de metodologias e ferramentas como o BIM, IoT e AI (Inteligência Artificial) que potenciam a eficiência operacional e a sustentabilidade.

Dando continuidade à discussão sobre a relevância da abordagem sistémica no setor AECO, apresenta-se na Tabela 1 uma análise detalhada dos quatro modelos de negócio identificados. Esta Tabela destaca a contribuição individual de cada um desses modelos, bem como a forma como a sua integração potencia os resultados globais, explorando ainda os desafios e bloqueios individuais enfrentados por cada modelo. Demonstra ainda como uma abordagem sistémica, com criação de sinergias, pode não só atenuar esses desafios, mas transformá-los em oportunidades significativas.

Como tal, há um conjunto de benefícios associados a esta abordagem sistémica, pois esta surge no contexto atual como uma estratégia fundamental, capaz de ir além dos limites das abordagens tradicionais. Essa metodologia holística integra diversas estratégias para criar um ecossistema de negócios coeso e sinergístico. Desta forma, a implementação de uma abordagem sistémica no setor AECO significa considerar todos os elementos do ciclo de vida de um projeto, desde a conceção até ao fim de vida, assegurando uma utilização eficiente dos recursos, minimizando custos e impactes, mas também aumentando o valor e a durabilidade das construções. Esta abordagem promove ainda uma maior eficiência energética e uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com os crescentes padrões de sustentabilidade global.

Além disso, a resiliência e a capacidade de inovação são fundamentais num mercado em constante mudança, e uma abordagem sistémica no setor AECO promove estas qualidades, preparando as empresas a responder rapidamente a novos desafios e tendências, transformando obstáculos em oportunidades de crescimento e desenvolvimento. Ao integrar modelos de negócio sustentáveis, as empresas asseguram o *compliance*, que é cada vez mais rigoroso, e respondem às expectativas globais. Por sua vez, a adoção de uma abordagem sistémica também aumenta a atratividade para investidores e *stakeholders* - investidores conscientes do impacte ambiental e social são atraídos por empresas que demonstram resiliência, por exemplo, às alterações climáticas. Além disso, a confiança dos *stakeholders* é reforçada, incluindo clientes, colaboradores e a comunidade em geral. Esta abordagem também evidencia a importância de práticas sustentáveis não apenas por razões ambientais, mas também pelo seu potencial de economia de custos a longo prazo e de eficiência.

Outro dos benefícios desta abordagem é a gestão eficaz de riscos, abordando desafios ambientais, sociais, económicos e operacionais. Além disso, o alinhamento com os princípios de ESG (*Environmental, Social and Governance*) reforça o valor e a reputação da empresa no mercado, já que incorporar práticas sustentáveis, tecnologias digitais e capacitação promove um equilíbrio entre o sucesso ambiental, social e económico.

Assim, os resultados deste estudo sublinham a necessidade urgente de práticas sustentáveis e circulares no setor AECO. A análise dos modelos de negócio inovadores, como a avaliação e certificação ambiental, suporte à implementação de estratégias de economia circular, capacitação e desenvolvimento de plataformas tecnológicas, revela que esses elementos são cruciais para reduzir as emissões de carbono e otimizar o uso de recursos. Em particular, a digitalização mostrou ser vital na facilitação dessas estratégias. Por exemplo, a adoção de tecnologias digitais, como o BIM, tem demonstrado reduzir o tempo de projeto em 15% e o desperdício de materiais em 25%. A economia circular, através de práticas de reutilização e reciclagem, mostrou uma redução média de 30% no uso

de materiais não renováveis. A capacitação contínua dos profissionais do setor é fundamental para manter as competências necessárias para implementar essas novas tecnologias e práticas.

Em suma, a adoção de uma abordagem sistémica e integrada no setor AECO vai além de uma mera estratégia de sustentabilidade, representando uma transformação fundamental na maneira como as empresas conduzem os seus projetos, operações e interagem com o meio ambiente e a sociedade. Essencial para o sucesso sustentável e para a resiliência num ambiente de negócios dinâmico, a abordagem sistémica assegura uma gestão abrangente de todas as dimensões relevantes, maximizando eficiência e sustentabilidade e posicionando as empresas na vanguarda da inovação e da responsabilidade socioambiental.

Tabela 1. Abordagem individual *vs* abordagem sistémica dos modelos de negócio

Modelo de Negócio	**Contribuição Individual**	**Integração e Potencialização de Resultados**	**Desafios/Bloqueios Individuais**	**Benefícios da Abordagem Sistémica**
Avaliação e Certificação Ambiental	Fornece uma estrutura para medir e melhorar o desempenho ambiental dos edifícios e projetos.	Incentiva a adoção de práticas sustentáveis em toda a indústria.	- Custos elevados e complexidade do processo; - Resistência à mudança em mercados menos desenvolvidos.	- A integração com a economia circular pode reduzir custos através do uso eficiente de recursos; - A capacitação e a digitalização ajudam na compreensão e na implementação mais eficaz desses padrões.
Suporte à Implementação de Estratégias de Economia Circular	Promove a utilização eficiente de recursos e a redução de resíduos através do projeto para a reciclagem e reutilização.	Minimiza o impacte ambiental e complementa os padrões de certificação ambiental.	- Necessidade de mudança de mentalidade; - Dificuldades na implementação devido à complexidade dos processos de construção.	- A avaliação ambiental ajuda a definir padrões para reutilizar e reciclar materiais; - A digitalização permite rastrear materiais e a otimização dos processos de reciclagem.
Capacitação twin transition	Oferece a formação e conhecimento necessários para implementar e gerir práticas sustentáveis e novas tecnologias.	Garante que as equipas estejam preparadas para integrar e gerir novas práticas.	- Integração desafiadora com operações diárias; - Necessidade de atualização contínua das competências.	- A economia circular e a avaliação ambiental fornecem contextos práticos para aplicação do conhecimento; - A digitalização facilita o acesso a materiais de formação e a implementação de programas de aprendizagem online.
Desenvolvimento de Plataformas, Tecnologias e Sistemas Digitais	Fornece as ferramentas para gerir o ciclo de vida dos empreendimentos, do projeto até à manutenção, através de BIM, IoT, AI e outras tecnologias.	Potencia a análise e otimização de dados em todos os outros modelos.	- Elevado custo inicial e dependência de tecnologia; - Vulnerabilidade a falhas e interrupções tecnológicas.	- A capacitação garante que os trabalhadores estejam aptos a utilizar essas tecnologias de maneira eficaz; - A avaliação ambiental e a economia circular podem beneficiar da recolha de dados e da análise fornecidas pela digitalização.

4 CONCLUSÕES

Este estudo destaca que uma abordagem integrada (360°) é essencial para alcançar a sustentabilidade e a inovação no setor AECO. A integração de práticas sustentáveis e digitais mostrou ser eficaz na redução das emissões de carbono e na otimização do uso de recursos sendo disso mesmo exemplo o reconhecimento que a adoção de tecnologias digitais, como o BIM, tem demonstrado reduzir o tempo de projeto em 15% e o desperdício de materiais em 25%, já uma estratégia de economia circular, através de práticas de reutilização e reciclagem, mostrou uma redução média de 30% no uso de materiais não renováveis. Assim se verifica que a digitalização desempenha um papel crucial na operacionalização dessas estratégias, proporcionando uma gestão mais eficiente dos projetos e das operações. No entanto, a implementação dessas práticas enfrenta desafios culturais e económicos significativos que devem ser ultrapassados para garantir uma transição eficaz.

Recomenda-se que as empresas adotem práticas que combinem sustentabilidade e tecnologias digitais, promovendo um ecossistema colaborativo e inovador sempre sob uma abordagem sistémica. Por sua vez, as futuras investigações deverão incidir em adaptar essas estratégias a contextos locais específicos e desenvolver políticas que favoreçam práticas sustentáveis. Assim, este artigo oferece um guia prático para profissionais e empresas do setor AECO, contribuindo para um futuro mais sustentável, circular, resiliente e eficiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FCT através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Ababio, B. K., & Lu, W. (2023). Barriers and enablers of circular economy in construction: a multi-system perspective towards the development of a practical framework. *Construction Management and Economics*, *41*(1), 3–21. https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2135750

Al-Awlaqi, M. A., & Aamer, A. M. (2022). Individual entrepreneurial factors affecting adoption of circular business models: An empirical study on small businesses in a highly resource-constrained economy. *Journal of Cleaner Production*, *379*, 134736. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134736

Dalla Mora, T., Bolzonello, E., Cavalliere, C., & Peron, F. (2020). Key Parameters Featuring BIM-LCA Integration in Buildings: A Practical Review of the Current Trends. *Sustainability*, *12*(17), 7182. https://doi.org/10.3390/su12177182

Das, A., Konietzko, J., Bocken, N., & Dijk, M. (2023). The Circular Rebound Tool: A tool to move companies towards more sustainable circular business models. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, *20*, 200185. https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200185

ENCORD. (2024). *Circular Economy Report: Towards a New Thinking on Construction Project Delivery*.

European Construction Sector Observatory. (2021). *Digitalisation in the construction sector - Analytical Report*.

European Parliament. (2020). *The European Green Deal - European Parliament resolution of 15 January 2020 on the European Green Deal (2019/2956(RSP))*. European Parliament.

Fatimah, Y. A., Kannan, D., Govindan, K., & Hasibuan, Z. A. (2023). Circular economy e-business model portfolio development for e-business applications: Impacts on ESG and sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, *415*, 137528. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137528

Fonseca, P., Pedroso, M. F., Tavares, V., Aguiar Costa, A., Santos, L., & Laranjeira, L. (2022). *Portuguese Action Plan for a Circular Construction Sector*.

Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of Cleaner Production*, *277*, 123741. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741

Gerding, D. P., Wamelink, H. (J. W. F.), & Leclercq, E. M. (2021). Implementing circularity in the construction process: a case study examining the reorganization of multi-actor environment and the decision-making process. *Construction Management and Economics*, *39*(7), 617–635. https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1934885

JRC. (2024, April). *Level(s)*. Https://Environment.Ec.Europa.Eu/Topics/Circular-Economy/Levels_en.

Kanzari, A., Rasmussen, J., Nehler, H., & Ingelsson, F. (2022). How financial performance is addressed in light of the transition to circular business models - A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *376*, 134134. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134134

Kretz, D., de Velde, E., Lecluyse, L., Moreno, C., Borbon, Y., & Markianidou, P. (2023). *Monitoring the twin transition of industrial ecosystems - Construction: Analytical Report*.

Mendonca, P., & Vieira, C. (2022). Embodied carbon and economic cost analysis of a contemporary house design using local and reused materials. *Sustainable Futures*, *4*(November), 100100. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100100

NCBI. (2017). *Taxonomy browser*. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=3337

OECD. (2024, April). *OECD Productivity statistics by industry*. Https://Stats.Oecd.Org/Index.Aspx?DataSetCode=PDBI.

Papadaki, I., Moseley, P., Staelens, P., Horvath, R., Nieto Sanz, O., Lipari, M., Velayos, P., & Vaananen, H. (2023). *Transition Pathway for Construction*.

Pedroso, M. F., & Tavares, V. (2024). *Circular Economy Supporting Policies and Regulations: The Portuguese Case* (pp. 277–290). https://doi.org/10.1007/978-3-031-45980-1_23

Rosa, P., Sassanelli, C., & Terzi, S. (2019). Towards Circular Business Models: A systematic literature review on classification frameworks and archetypes. *Journal of Cleaner Production*, *236*, 117696. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117696

Sáez-de-Guinoa, A., Zambrana-Vasquez, D., Fernández, V., & Bartolomé, C. (2022). Circular Economy in the European Construction Sector: A Review of Strategies for Implementation in Building Renovation. *Energies*, *15*(13), 4747. https://doi.org/10.3390/en15134747

Salvador, R., Barros, M. V., Freire, F., Halog, A., Piekarski, C. M., & De Francisco, A. C. (2021). Circular economy strategies on business modelling: Identifying the greatest influences. *Journal of Cleaner Production*, *299*, 126918. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126918

Santa-Maria, T., Vermeulen, W. J. V., & Baumgartner, R. J. (2022). The Circular Sprint: Circular business model innovation through design thinking. *Journal of Cleaner Production*, *362*, 132323. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132323

Tavares, V., & Pedroso, M. F. (2024). *Barriers and Opportunities in the Transition to a Circular Construction Sector in Portugal* (pp. 199–210). https://doi.org/10.1007/978-3-031-45980-1_17

Toth-Peter, A., Torres de Oliveira, R., Mathews, S., Barner, L., & Figueira, S. (2023). Industry 4.0 as an enabler in transitioning to circular business models: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *393*, 136284. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136284

Various. (2021). *Circular Economy Principles for Buildings Design*.

Veselka, J., Nehasilová, M., Dvořáková, K., Ryklová, P., Volf, M., Růžička, J., & Lupíšek, A. (2020). Recommendations for Developing a BIM for the Purpose of LCA in Green Building Certifications. *Sustainability*, *12*(15), 6151. https://doi.org/10.3390/su12156151

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

NUMERICAL STUDY OF CONCRETE: A METHOD FOR SIMULATION AT MESOSCOPIC SCALE

Zulima Fernández-Muñiz[a], Francisco Montero-Chacón[b], Carlos López-Colina Pérez[c], Juan José del Coz-Diaz[c], Fernando López-Gayarre[c]

[a]Mathematics Department, University of Oviedo, Arias de Velasco s/n 33005 Oviedo, Spain; zulima@uniovi.es

[b]Engineering Department, Loyola University, Avda. de las Universidades 2, Dos Hermanas 41704 Sevilla, Spain; fpmontero@uloyola.es

[c]Construction Department, University of Oviedo, Pedro Puig Adam. Módulo 7, 33203 Gijón, Spain; gayarre@uniovi.es; juanjo@constru.uniovi.es; lopezpcarlos@uniovi.es

ABSTRACT

Concrete exhibits different behaviors depending on the scale at which it is observed. This work is dedicated to simulating the mechanical behavior of concrete and its properties at the mesoscopic level. At this scale, concrete consists of three easily distinguishable phases characterized by their mechanical properties: mortar, aggregates, and the interfacial transition zone (ITZ). Our objective is achieved through programming in MatLab of an algorithm capable of generating cubic, prismatic, and cylindrical Representative Volume Elements (RVEs) with different concentrations of aggregates of varying sizes, which will subsequently be processed by Ansys to simulate the relevant compression tests. Simulating the three phases of concrete increases the complexity of the model due to the ITZ and the size of the finite elements used in its discretization. The mesoscopic simulation of the entire concrete provides more reliable information about its failure behavior and aims to offer an alternative to laboratory tests, with the goal of reducing them, although not replacing them definitively. The combination of both computational and experimental techniques contributes to a more sustainable and environmentally friendly understanding of the behavior of this material, in line with the demands of the current times.

Keywords: Mesoscopic scale, Numerical model, Concrete behavior**.**

1 INTRODUCTION

Concrete is a material widely used in various civil engineering applications due to its mechanical properties and resistance to deterioration. Although at the macroscopic level it appears as a homogeneous material, at the mesoscopic scale ranging from a few micrometers to millimeters, its fundamental components are distinguished: mortar, coarse aggregates, and the interfacial transition zone (ITZ) found between the coarse aggregates and the mortar, as well as between the coarse aggregates themselves (A. Bentz 2008; G. Meschke 2011). It is at this scale where important effects affecting the concrete's mechanical behavior at the macroscopic level can be observed, such as the distribution and shape of the aggregates and the characteristics of the ITZ. Each of these phases, along with the presence of pores, contributes uniquely to the mechanical response of concrete (Cusatis et al. 2011; M. Krüger 2016).

The aim of this work is to develop a mesoscopic model of concrete that can be meshed using finite element techniques to study the effects of different tests, understand its properties and fracture behavior, and attempt to extrapolate this knowledge to the understanding of the material's macroscopic behavior. It is necessary to consider that concrete is valued for its essential properties such as compressive strength and behavior under bending and tension, and that it is a crucial material in structural design, where safety and durability of constructions are paramount, but these properties visible at the macroscopic level are intimately related to the configuration of concrete at other scales.

Understanding the behavior of concrete at the mesoscopic level, where the material is broken down into its main components, is fundamental for comprehending what happens at the sample level in the laboratory. This mesoscopic approach provides detailed information on crucial mechanical aspects, such as fracture toughness and load-bearing capacity of concrete, significantly contributing to advances in structural engineering and materials science (Liu et al., 2021).

A variety of mesoscopic models have been developed to explore how the composition of concrete affects its overall behavior. Aspects such as the shape, size, and distribution of aggregates have a critical impact on stress distribution and crack formation. The choice of aggregate size distribution, often represented by grading curves, influences key properties of concrete, such as workability, mechanical strength, and durability. Various methods have been used to simulate the spatial distribution of aggregates, from simple approaches to sophisticated algorithms. Meshing techniques are essential for the discretization of mesoscopic models, and specialized strategies have been developed to address the interfacial transition zone (ITZ), which plays a crucial role in microcrack initiation. Mesoscopic-level analysis offers a detailed and essential insight into concrete behavior, expanding our understanding and capacity to design safer and more sustainable structures (S.E. Latifeh and A.R. Khoei, 2012).

2 METHODOLOGY

The presence of the Interfacial Transition Zone (ITZ) between the large aggregate particles and the hydrated cement paste, although composed of the same elements as the hydrated cement paste, exhibits properties and a microstructure that differs from it, conferring it with special characteristics (P. Mehta and P. Monteiro, 2005).

Several authors have extensively researched this zone and have developed bi- and three-dimensional models considering this transition zone between the mortar and the aggregates and their mechanical properties (Wittmann et al., 1984). In Wittmann's model, each element is individually modeled, with aggregates being spheres or ellipsoids with specific size and mechanical characteristics, while the

cement paste can be modeled as a continuous matrix with elastic or viscoelastic properties. These models also allow for the application of external loads to simulate their transmission through the aggregates and mortar, thus obtaining an analysis of phenomena such as deformation, strength, fracture, and the long-term behavior of concrete (P. Wriggers and S.O. Moftah, 2006). However, any model is a simplification of reality and is governed by parameters that must be selected precisely to obtain reliable results.

In our case, a program has been developed to numerically simulate the behavior of concrete with certain characteristics. To do this, laboratory tests were conducted on cubic concrete specimens measuring 50 mm on each side, with a water/cement ratio of 0.5, CEM I 52.5 cement, and aggregate diameters of 8/10 mm, 6/8 mm, and 4/6 mm to ensure that the tests could be reproduced and that the specimens were identical to those simulated numerically.

The first phase of the model was carried out using Matlab, the result of which was obtaining the RVE of the required size and shape, inside of which the different aggregates were accommodated in the appropriate proportion. For the second part of the model, Ansys was used.

In the first stage of modeling, a code in Matlab is developed to obtain an RVE of prismatic, cubic, or cylindrical shape of the required size, and with the stipulated percentage of aggregates, which are experimented within the laboratory. The aggregates are represented by spheres with diameters of 4, 6, and 8 mm, and their respective mass percentages to the total mass are 8%, 15%, and 7%, respectively. The Matlab code requires input data such as the dimensions of the RVE, corresponding to the dimensions of the samples tested in the laboratory, the diameters of the coarse aggregate particles, represented as spheres, the mass percentage of each size of coarse aggregate particles considered in relation to the total mass, the coarse aggregate-cement ratio, the volume fractions of cement, aggregates, and water, and the density of concrete.

The program has used the take and place method to generate a random distribution of particles in the RVE so that they resemble that of real concrete statistically, arranging the spheres from largest to smallest and according to the mass percentages established in the initial data. The number of particles of each diameter is calculated using the expression:

$$n_i = \frac{V.p_i}{v_i}\left[1 - m\left(\frac{1}{\rho_c} - \frac{r_{wc}}{\rho_w}\right)\right] \quad (1)$$

where V is the volume in m³ of the RVE, p_i is the mass fraction of the coarse aggregate of diameter i with respect to the total mass, v_i is the aggregate volume in m³, m is the amount of cement per m³ of concrete, r_{wc} is the water-cement ratio, and ρ_c and ρ_w are the densities of cement (3150 kg/m³) and water, respectively.

The number obtained by the previous expression is rounded to obtain an integer number of spheres. Next, the number of spheres of each class is generated, higher than the one needed to introduce into the RVE, so that it meets the condition of the previously indicated mass percentage. Subsequently, the RVE is filled. Each sphere has assigned Cartesian coordinates that determine the position of its centre and has associated its diameter. The spheres placed inside the RVE must meet two conditions: there must be no overlaps between two spheres, or they cannot be tangent to each other, and all of them must be completely inside the RVE. Additionally, each sphere must have a minimum distance between the boundary of a particle and the faces of the defined RVE, as well as between two adjacent particles. This distance is defined by the following expression:

$$d_r = 1 - \alpha(d_c + d) \quad (2)$$

where α is an influence parameter for each sphere, d_c is the diameter of the sphere introduced, and d is the diameter of the next sphere that is intended to introduce. The filling of the RVE begins with the spheres of the largest diameter until the agreed aggregate proportion is obtained, and then the remaining spheres are placed in descending order of size. To account for the ITZ, concentric spheres are generated such that the difference in radii equals its thickness.

Numerous numerical simulations have been carried out with different sizes and shapes of the RVE and different mass percentages of aggregates. Figure 1 shows a cubic RVE with a side length of 50 mm containing 345 spheres of the three sizes. Once the RVE is filled with all the spheres, a file with the extension .inp is generated containing the coordinates of the centres and the diameters of each of the coarse aggregate particles (spheres), as well as the dimensions of the Representative Volume Element (RVE), which is saved with the extension .igs for export to Ansys.

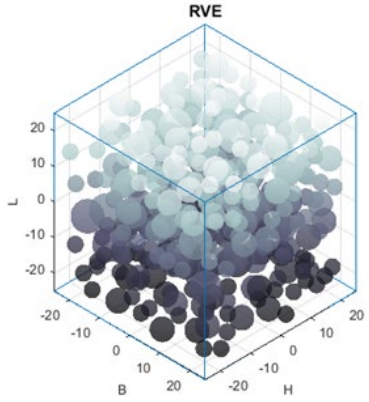


Figura 1 – Cubic Representative Volume Element (RVE) where length units are in mm.

The second phase commences with the importation of the .igs file from the Ansys-Workbench FEM software, which contains the geometry outlined in the initial phase.

Upon importing the file, the subsequent step involves generating the Interfacial Transition Zone (ITZ) phase using a boolean operation. This operation facilitates the differentiation of volumes for each pair of concentric spheres obtained in the preceding phase. During this process, the sphere with the smaller diameter is retained and assigned the properties of the aggregate material. These properties for each phase were determined experimentally.

Following this, the model is meshed independently, utilizing tetrahedral finite elements for the aggregates and hexahedral elements for the mortar and ITZ.

Incorporating the ITZ into the model adds complexity due to coupling and assembly challenges at the boundary between the hexahedral elements used in the mortar phase and the ITZ. Initially, an ITZ thickness of 100 µm was established.

During the meshing process, the number of finite elements (FE) was constrained to 1.5 million to ensure computational feasibility. To adhere to these limitations, a prismatic Representative Volume Element (RVE) was employed, representing one-fourth of a cubic specimen with a 50 mm edge tested in the laboratory. Within this volume, the integrity of all included aggregates (spheres) is ensured.

Further modifications to the model involved remeshing the coarse aggregates using tetrahedral finite elements and the remaining RVE elements using hexahedral finite elements. The properties of the

limestone aggregates were assigned to the first group of elements, while the mortar properties were assigned to the remaining elements in the model, excluding those in contact with the aggregates. Through programming in APDL, the properties of the Interfacial Transition Zone (ITZ) were allocated to these finite elements.

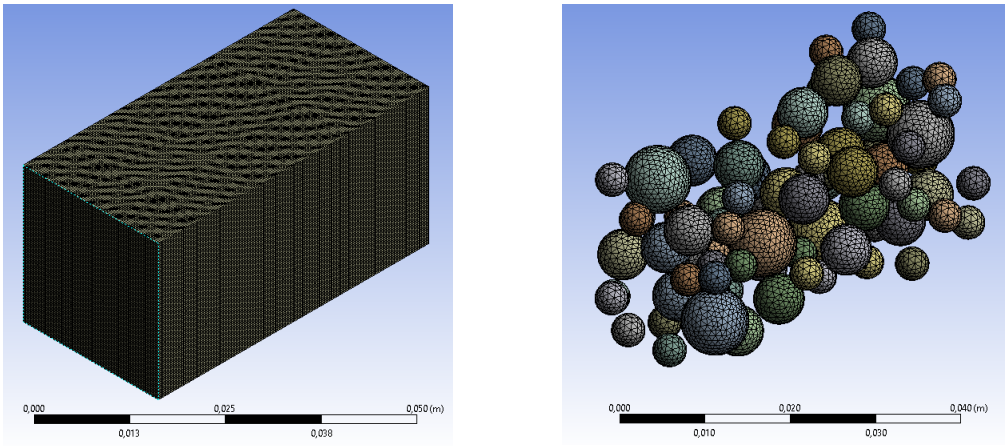


Figure 2 – a) Meshing of the Representative Volume Element (RVE) considered. b) Distribution and meshing of the aggregates in the specimen.

The equation that relates the applied force to the model and its displacement, which is solved iteratively, is governed by the stiffness matrix, and the robustness of the solution depends on the model parameters. Solving the problem entails determining stresses, deformations, as well as the propagation of cracks and fissures for which it is responsible.

A finite element mesh is used with element sizes varying between $6 \cdot 10^{-4}$ m for coarse aggregates and $3 \cdot 10^{-4}$ m for the ITZ, distinguishing between the three types of elements: mortar, ITZ, and aggregates, as mentioned earlier (E. Madenci, E. and I. Guven, 2007; S. Moaveny, 2007).

Regarding the simulation models for cracking and crushing, the following are used: i) for mortar, a nonlinear combined model based on Drucker-Prager (J.N. Reddy, 2004; O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, 2005) for compression stresses, and Willam and Warnke (J.J. Del Coz Díaz, García P.J. Nieto, F.P. Álvarez Rabanal et al., 2011) for tension stresses; ii) for coarse aggregate, a pure linear elastic model is employed; iii) for the contact between coarse aggregates and the ITZ, a pure penalty algorithm between deformable surfaces with asymmetric behavior is used.

Some properties used in the model are:

i) Mortar: concrete density, 2150 kg/m³, elasticity modulus, 42000 MPa, Poisson's ratio, 0.2, ultimate uniaxial compression strength, 42 MPa, and internal friction and dilation angles, 35°;

ii) ITZ: elasticity modulus, 25000 MPa, ultimate uniaxial compression strength, 37 MPa, and dilation angle, 19°;

iii) Aggregates: elasticity modulus, 65000 MPa, Poisson's ratio, 0.18.

Additionally, symmetry is applied to the ZX and YZ faces, and an imposed displacement of $-7 \cdot 10^{-5}$ m is applied to the XY face.

3 NUMERICAL RESULTS

In Figure 3, the two strain gauges placed on opposite faces of the specimen for the experimental test are shown, where the stress-strain curve of the material is determined.

Figura 3 – Experimental test using extensiometric gauges.

In Figure 4, the result of the third of the four conducted tests is displayed. The graph shows that initially, there is a nearly linear branch that later begins to curve as the deformations increase. In this experimental test, an ultimate tensile strength of 57.1 MPa is achieved for a strain close to 1.6 per thousand, resulting in a stress-strain curve characteristic of the material used.

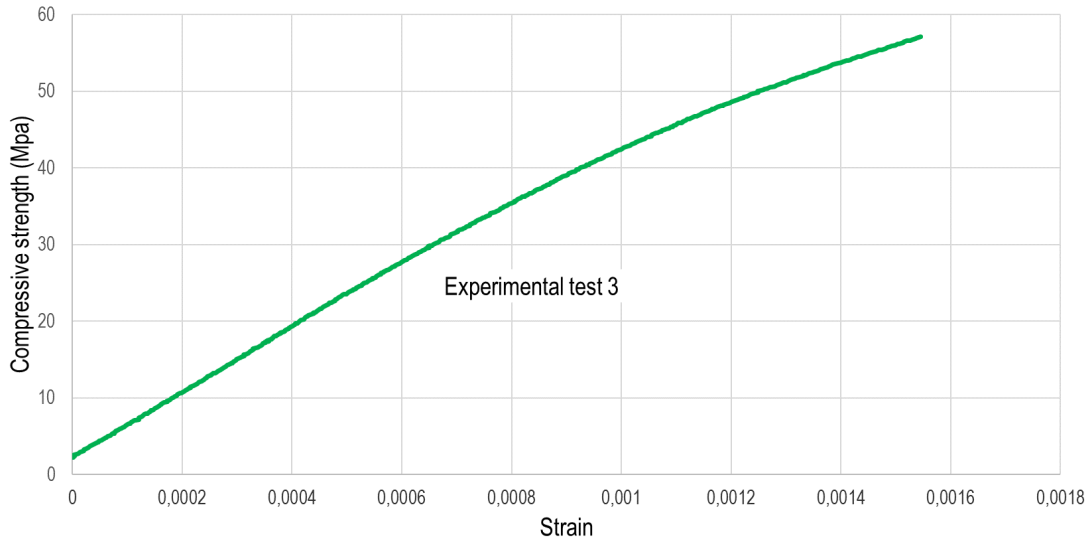


Figura 4 – Stress-strain curve from the experimental tests.

In Figure 5, the curve corresponding to the third simulation of the four conducted is shown. It can be observed that it exhibits an initial segment that is practically linear, which is nearly identical to those of the other three simulations. The curve bends at a stress level very close to 37.5 MPa with deformations close to 0.95 per thousand. The ultimate tensile strength reaches a failure value of 43 MPa with strains of 1.3 per thousand respectively. The fluctuations observed in the ultimate tensile strength and strain values in the conducted simulations are due to the diverse distributions of coarse aggregates in each of the geometric models employed to simulate the samples. As previously mentioned, these models were generated using Matlab.

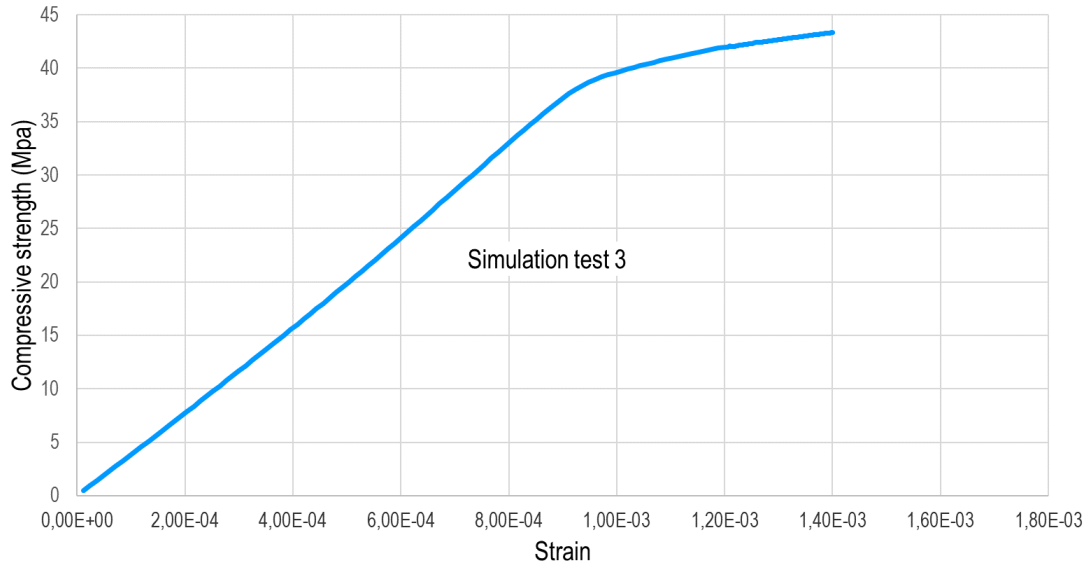


Figura 5 – Stress-strain curve from the experimental tests.

Figure 6 illustrates a strong concordance between experimental data and numerical simulations. The simulation reveals a compressive strength of 41.34 MPa with a strain of $1.04 \cdot 10^{-3}$ m. Notably, the stress-strain curve derived from laboratory tests closely mirrors the simulated data. This highlights the efficacy of an advanced numerical model that produces dependable outcomes across four diverse Finite Element Method (FEM) models. Such a model shows potential for tackling more intricate challenges in the future, although it necessitates additional experimental and computational endeavors.

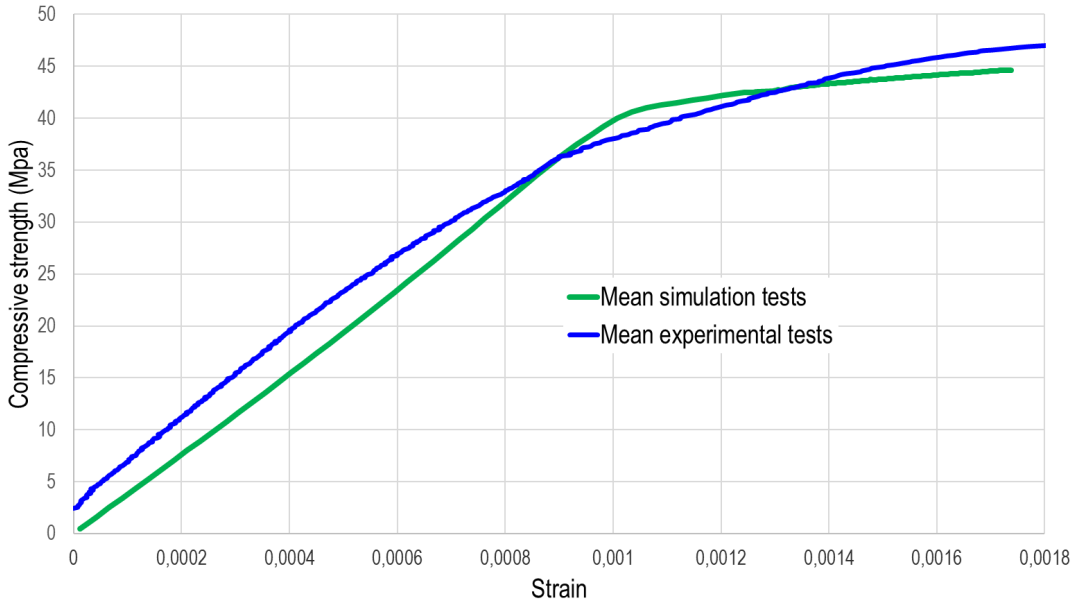


Figura 6 – Mean stress-strain curves to failure obtained in the laboratory and through numerical simulation.

4 CONCLUSIONS

Based on the comparative results between experimentation and numerical simulation, we can affirm that we have a numerical model that yields reliable results based on a limited number of experiments. Additionally, this model provides the opportunity to understand the behavior of concrete at the mesoscopic scale, helping to unravel deformation and fracture mechanisms. It constitutes a valid alternative for evaluating concrete behavior, although it cannot fully replace experimental results, as both approaches complement each other.

REFERENCES

Bentz, A. (2008). Multiscale modelling of concrete: From nano to macro. Cement and Concrete Research, 38 (2): 170-192.

Meschke, G. (2011). Multiscale modelling of concrete structures. Journal of Structural Engineering, 137 (12): 1469-1484. https://doi.org/10.1007/s11831-011-9063-8

Cusatis, P., Mola, F., Berto, F. (2011). Multiscale modelling of concrete fracture: Bridging the gap between microscopic and macroscopic scales. Cement and Concrete Research, 41 (11): 1109-1123.

Krüger, M. (2016). Multiscale modelling of concrete: Bridging the gap between micro and macroscale. Journal of Engineering Mechanics, 142 (12): 04016077

Liu, Y., Ye, F., Cheng, X., Li, X., Li, C. (2021). A multiscale simulation approach for predicting the elastic modulus of concrete. Engineering Structures, 242: 111952.

Latifeh, S.E.H., Khoei, A.R. (2012). An embedded cohesive crack model for modelling of fracture in concrete. Engineering Fracture Mechanics, 85: 68-84

Mehta, P., Monteiro, P. (2005). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials 3rd Edition McGraw-Hill Professional. ISBN-13 978-0071462891.

Wittmann, F.H., Roelfstra, P.E., Sadouki, H. (1984). Simulation and analysis of composite structures, Mater. Sci. Engng., 68 (2): 239-248.

Wriggers, P., Moftah, S.O. (2006). Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. Finite Elements in Analysis and Design, 42: 623-636.

Madenci, E., Guven I. (2007) The finite element method and applications in engineering using ANSYS. New York: Springer.

Moaveny, S. (2007) Finite element analysis: theory and applications with ANSYS. New York: Prentice Hall.

Reddy, J.N (2004). An introduction to non-linear finite element analysis. New York: Oxford University Press.

Zienkiewicz, O.C., Taylor R.L. (2005) The finite element method for solid and structural mechanics. New York: Butterworth-Heinemann.

Del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Álvarez Rabanal, F.P., Lozano Martínez-Luengas, A. (2011). Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method, Engineering Structures, 33(1): 1-9.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MODELO DE AVALIAÇÃO E INTERVENÇÃO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES VISANDO A SUSTENTABILIDADE

Ana Martha C. P. Oliveira[a d] João Carlos Gonçalves Lanzinha[a d] Ana Teresa Vaz Ferreira[b d] Andrea Parisi Kern[c d]

[a] Universidade da Beira Interior (UBI), Calçada Fonte do Lameiro, 6201-001, Covilhã, Portugal, martha.oliveira@ubi.pt, jcgl@ubi.pt

[b] Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB), Av. Pedro Álvares Cabral, nº 12, 6000-084, Castelo Branco, Portugal, vaz.ferreira@ipcb.pt

[c] Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Av. Unisinos, 950, 93.022-750, São Leopoldo/RS, Brasil, apkern@unisinos.br

[d] C-MADE | Centre of Materials and Civil Engineering for Sustainability, Universidade da Beira Interior (UBI), Calçada Fonte do Lameiro, 6201-001, Covilhã, Portugal,

RESUMO

Esta proposta de trabalho procura contribuir para a discussão a respeito da reabilitação visando a sustentabilidade dos edifícios escolares, integrando as melhores práticas de avaliação de sustentabilidade e adaptando-as às necessidades específicas das escolas. Para tal foi realizada uma revisão de literatura sistemática para conhecer propostas e metodologias de avaliação de edifícios, escolares ou não, com o objetivo de organizar o conhecimento a respeito do tema. Após a revisão de literatura é possível afirmar que não existe uma metodologia de avaliação específica para promover a reabilitação sustentável de edifícios escolares, sendo necessário desenvolver-se trabalho de pesquisa neste domínio.

Palavras-chave: Metodologia de avaliação de reabilitação, Reabilitação sustentável, Edifícios escolares

1 INTRODUÇÃO

As construções escolares foram durante muitos anos apenas prédios em que os estudantes deveriam ser contidos para receber as informações fornecidas pelos educadores. As suas instalações eram desenhadas apenas para ter salas de aulas que contivessem um número considerável de pessoas, instalações sanitárias e algum espaço para recreação (Faria Filho e Vidal, 2000). No final do século XX os conceitos a respeito passaram por uma grande transformação introduzidas pelas novas teorias pedagógicas. Maxwell (1999) aponta que o grande estoque de edificações escolares existentes na Inglaterra no final do século XX deveria, ao longo dos anos seguintes, ser submetido a algum grau de reabilitação e que as intervenções deveriam também ter como preocupação a satisfação e capacidade de aprendizado dos estudantes a utilizarem os edifícios. Clark (2002) aborda as inovações aplicadas aos edifícios escolares na questão de design e inclusão, enquanto Leiringer e Cardellino (2011) apresentam as novas conceições para as instituições de ensino do século XXI.

O perfil dos estudantes mudou, hoje eles usam celulares e computadores com posturas completamente diferentes do século passado, quando estas tecnologias estavam em seus estágios iniciais. Além dos requisitos para um novo currículo acadêmico também surge o desafio de acolher esse estudante nos aspetos arquitetónicos. A sala do professor, quando existe, é um espaço pequeno, com armários de aço, uma mesa com plástico em cima e se possível uma garrafa de café. As salas de aula, por sua vez, mantêm o desenho do século XIX, com um púlpito ou palanque para o professor e as cadeiras para os estudantes, sempre desconfortáveis, alinhadas em posição de adoração ao saber.

Segundo Hagopian (2013) esse não é um ambiente apropriado para que o professor seja capaz de preparar suas aulas e estimular os estudantes a aprenderem. A arquitetura e a engenharia não valorizam os projetos de edifícios escolares. A OCDE (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Económico) diz que a construção das escolas não faz diferença nenhuma e o que os governos devem investir na qualidade do ensino, mas um bom desenho dos espaços escolares faz diferença sim, só não existem muitos estudos a respeito para determinar qual é a relação entre o espaço e o aprendizado.

No que se refere aos edifícios de instituições de ensino superior, em especial as instituições mais tradicionais, há uma grande preocupação em atualizar os edifícios, mas mantendo a sua história. Siyu (2020) estuda a reconstrução de um antigo edifício universitário na China. País, que segundo o autor, possui muitos edifícios que estão passando pelo fenômeno do envelhecimento e que as metodologias de ensino não estão adequadas para a educação moderna. McLane e Dawkins (2014) exploram as estratégias utilizadas na reabilitação do Edifício William Johnston na Universidade Estadual da Florida, que preservou a fachada histórica ao mesmo tempo em que adaptou os interiores para novas funções como salas de aula, centros de estudo e espaços comuns com finalidades intencionalmente indefinidas.

É óbvio que o educador, o material didático e a tecnologia são muito importantes no processo educativo, mas o ambiente escolar também é importante. Hoje já existem pesquisas que mostram que as escolas de ensino superior mais bem preparadas e equipadas também são as mais bem construídas e que são responsáveis por pelo aumento da aprendizagem (Molineiro et al., 2022). A aprendizagem aumenta quando o ambiente é apropriado. As instituições educacionais desejam promover eventos que sejam interessantes para os estudantes e a comunidade e o ambiente construído possibilita o acolhimento de diferentes tipos de evento que venham a estimular as trocas de experiências entre professores e estudantes e com a comunidade.

Desta maneira percebe-se que o ambiente construído dos edifícios escolares também deve fazer parte da mudança para uma educação de qualidade e da busca de um novo tipo de ensino. O espaço escolar tradicional não é necessariamente ruim, mas necessita de ajustes (Hagopian, 2013), pois em algumas unidades escolares as salas de aula não possuem o adequado dimensionamento de janelas, não havendo condições mínimas de conforto e de qualidade do ar interior. Segundo Ashrafian e Moazzen (2019) as salas de aula devem ter boas janelas, boa iluminação e tecnologia embutida. Sam e Kouhırostamı (2020) dizem que o chão nas áreas externas das escolas deve ser mais aproveitado e que as janelas somadas a vegetação tem que participar no processo de ensino para que os estudantes percebam o mundo real.

A construção da escola tem de ser flexível por causa do futuro. Não há uma visão estruturada a respeito do futuro dos edifícios escolares, desta maneira é importante que o desenho das estruturas escolares seja flexível para possíveis modificações futuras, mas também tem de ser flexível no dia a dia (Chan, 2013). A flexibilidade é muito mais complexa do que paredes que se movem, por isso a importância do engajamento de especialistas como arquitetos e engenheiros para pensar e planejar que os ambientes escolares possuam a flexibilidade física necessária às atividades educativas.

Existem muitos novos modelos de escolas, em especial as discussões sobre se os edifícios escolares devem ser compactos ou dispersos, prédios horizontais ou verticais (Cappai e Segantini, 2020). Essa é uma das razões para que educadores, arquitetos e engenheiros conversem demoradamente a respeito das necessidades, projetos e destinos do sistema educacional como um todo e envolvendo as construções escolares. O resultado esperado depois dos processos de reabilitação dos edifícios escolares é que estas construções venham a ser espaço de excelência e eficiência na educação, simplicidade e sustentabilidade para as pessoas viverem plenamente o seu dia a dia na escola.

2 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE OS MODELOS DE AVALIAÇÃO PARA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

Para este trabalho foi realizada uma pesquisa de revisão da literatura que mostrou que existem modelos de avaliação propostos para a reabilitação de edifícios escolares. Shehab e Noureddin (2017) propõem um sistema de priorização para a reabilitação de edifícios de escolas públicas do jardim de infância até o 12º ano na Califórnia. O sistema aborda a grave deterioração dos edifícios das escolas públicas dos EUA, cuja reparação deveria exigir cerca de 300 mil milhões de dólares em investimentos. Segundo os autores, há uma falta de metodologia estruturada nas práticas de priorização, levando a conclusões potencialmente enganosas e ao uso indevido de recursos.

Também existem estudos referentes a avaliação do desempenho sísmico na reabilitação de edifícios escolares existentes (Yakut et al., 2008). O estudo desenvolvido pelos autores pretendeu avaliar e reabilitar edifícios escolares atingidos por abalos sísmicos, especialmente em Istambul, onde existe alta incidência de terremotos graves. Este estudo apresenta resultados de avaliações sísmicas para aproximadamente 50 edifícios escolares de concreto armado, detalhando sua qualidade de material, características estruturais e arquitetónicas.

Alshamrani (2012) apresenta pesquisas que destacam o impacto ambiental significativo dos gases de efeito estufa e do consumo de energia no setor de construção, particularmente no contexto da América do Norte. O texto enfatiza a necessidade urgente de construção de escolas sustentáveis para criar ambientes de aprendizagem mais saudáveis e produtivos, reduzindo ao mesmo tempo o consumo e os custos de energia. Já o artigo de Sánchez et al. (2023) apresenta uma estratégia de renovação energética adaptada a edifícios escolares na Catalunha, com foco na promoção de metas ambientais estabelecidas pelas Diretivas da UE. A metodologia prioriza a redução da demanda, a otimização

energética das instalações e a implantação de energias renováveis. Ao introduzir uma abordagem de otimização de custos, a investigação valida uma metodologia para discriminar e priorizar medidas de intervenção para reabilitação visando a eficiência energética, enquanto considera os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do edifício.

Habibi et al. (2020) propõem um modelo de renovação sustentável para edifícios educacionais, abordando graves problemas de conforto e alto consumo de energia. Apresentam Camadas de Fachadas Inteligentes como uma alternativa inovadora de reabilitação, aproveitando diversas fontes de energia. Existe a defesa de uma estratégia sistemática de gestão de ativos à medida que as infraestruturas envelhecidas se tornam cada vez mais predominantes (Kang et al., 2020). Os autores destacam a importância da análise dos custos do ciclo de vida (LCCA) neste contexto, salientando a sua aplicação comum nos sectores do tráfego e da energia, mas a sua subutilização nos edifícios escolares.

Henni-Chebra et al. (2020) investigam a vulnerabilidade das escolas argelinas do século XIX e início do século XX aos terremotos, dada a sua construção em alvenaria e a localização numa zona sismicamente ativa. O estudo visa avaliar a vulnerabilidade sísmica, identificar edifícios e selecionar amostras representativas para análise. Há um estudo que explora o aumento da resiliência sísmica de edifícios públicos sem um design antissísmico original (Terenzi et al., 2019). Neste estudo foi examinado um edifício escolar representativo da Itália da década de 1970, caracterizado por uma estrutura mista de concreto armado e aço. Foi desenvolvida uma proposta avançada de Retrofit, envolvendo suportes dissipativos com amortecedores fluido-viscosos.

A vulnerabilidade sísmica de edifícios escolares em Trecastelli, Itália é objeto de estudo em um texto publicado na Open Construction and Building Technology Journal (Gazzani et al., 2019). Os autores propõem uma intervenção de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) para reforçar as juntas das vigas e colunas da estrutura. O reforço do CFRP é capaz de melhorar a capacidade de deslocamento estrutural sem alterações significativas na rigidez, promovendo um modo de falha dúctil. Este estudo identificou os pontos fortes e fracos da modelagem, fornecendo insights para intervenções de modernização para melhorar o desempenho sísmico.

O MEXREB (Metodologia Exigencial de Apoio à Reabilitação de Edifícios de Habitação), proposto por João Lanzinha (2013) é um modelo abrangente de avaliação para a reabilitação de edifícios residenciais, realizando uma inspeção visual detalhada que aborda diversos aspetos. Isso inclui elementos verticais como a parte opaca e envidraçados, além da cobertura, onde são verificados acabamentos, revestimentos, infiltrações, entre outros. A avaliação é conduzida considerando critérios específicos para cada categoria, como a existência de fissuras, acumulação de sujidade, deformações, e manchas de humidade, permitindo classificar o estado dos elementos em bom estado, necessidade de reparação ou substituição.

O modelo de avaliação para qualidade do ar interior em escolas, proposto pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América (US, 2019), enfatiza a importância de um programa abrangente de manutenção preventiva, integrando gestão de qualidade do ar interior, eficiência energética e operações prediais suaves para garantir ambientes de aprendizagem saudáveis. O Centro Nacional de Estatísticas de Educação dos Estados Unidos (U.S. Department of Education et al., 2003) ressalva o desafio crescente de manter os edifícios escolares do país em sintonia com as demandas educacionais do século XXI, à medida que envelhecem. Por outro lado, as instalações mais recentes e tecnologicamente avançadas também demandam conhecimento e dedicação para preservar sua funcionalidade. Esses desafios afetam todos os níveis de ensino, desde pré-escolas até instituições de ensino superior, envolvendo problemas como circulação de ar inadequada e sistemas de energia

ineficientes, frequentemente decorrentes de condições ambientais adversas e falta de financiamento para manutenção, além de deficiências nos níveis de pessoal.

Uma lista de avaliação de segurança e proteção escolar representa um instrumento indispensável para garantir a integridade de alunos e funcionários em ambientes educacionais. Disponibilizado pelo Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) como parte de seu programa de verificação de segurança contra incêndios e acidentes em escolas (National Institute for Occupational Safety and Health, 2020), esse recurso pode assumir configurações abrangentes ou mais concisas, desempenhando uma função primordial na confirmação da segurança dos locais de ensino, na avaliação da preparação do corpo docente diante de situações emergenciais e na asseguração da proteção dos alunos. Tais avaliações englobam uma variedade de aspetos, desde a condição das instalações físicas, como portas e janelas, até a verificação dos protocolos de segurança e resposta a emergências. A lista de verificação não apenas serve como um roteiro para uma avaliação minuciosa das medidas de segurança, mas também auxilia os gestores escolares na pronta resolução de quaisquer problemas identificados.

A empresa Incident IQ ressalva a importância crítica da manutenção apropriada dos sistemas e ativos das instalações escolares, visando assegurar operações seguras, eficientes e ininterruptas. Seu conjunto de soluções inclui uma abrangente lista de verificação (Owensby, 2023), focada na necessidade de manutenção abrangente de instalações, abarcando áreas vitais como sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC), sistemas de segurança e alarme, sistemas de água e encanamento, sistemas elétricos, edificações internas e externas, equipamentos de cantina e eletrônicos de escritório. A Lista de Verificação e Avaliação Ambiental para Escolas Saudáveis (U.S. EPA, Region 10, Office of Ecosystems, Tribal and Public Affairs, 2012) foi desenvolvida por uma colaboração entre a Iniciativa de Saúde Ambiental de Crianças Rurais do Alasca, o Consórcio de Saúde Tribal Nativo do Alasca, o Departamento de Educação do Alasca, o Instituto de Profissionais Ambientais Tribais e o Programa de Rotas Seguras para Escolas do Departamento de Transportes do Alasca. Esta ferramenta foi concebida com o intuito de salvaguardar as crianças de exposições ambientais prejudiciais dentro do ambiente escolar. As informações coletadas podem ser compartilhadas com funcionários escolares, conselhos escolares, grupos de pais, conselhos tribais ou outras entidades, a fim de evidenciar o estado de saúde ambiental de uma escola ou solicitar assistência para abordar necessidades específicas de saúde escolar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estes estudos destacam a importância de modelos de avaliação sistemáticos e abrangentes para a reabilitação de edifícios escolares, considerando vários fatores como a atribuição de financiamento, o desempenho sísmico e a caracterização dinâmica, porém falta a todos eles o conceito de "integração". Isto é falta que exista a proposta de um modelo de avaliação integrado para edifícios escolares. A maioria dos estudos mencionados aborda aspetos específicos da reabilitação, como avaliação de desempenho sísmico, sustentabilidade, eficiência energética, entre outros. No entanto, não há menção explícita a um modelo ou abordagem que integre todos esses aspetos em um único sistema

ou metodologia abrangente de reabilitação para edifícios escolares, o que é a proposta deste plano de pesquisa.

Das metodologias de avaliação aqui apresentadas existem cinco que avaliam apenas os riscos e intervenções para reabilitar os edificados com relação a abalos sísmicos (Tabela 1).

Tabela 1 - Metodologias de Avaliação a Sismos

	Metodologia de Avaliação				
	Yakut et al / BCPI	Kang et al / SD	Henni-Chebra et al / STA	Terenzi et al / ASR	Gazzani et al / FEMA
Avaliação de Sismos	√		√	√	√
Avaliação Estrutural	√		√	√	√
Deterioração		√			
Avaliação de Ciclo de Vida		√			

As outras metodologias de avaliação são mais abrangentes e complexas e podem ser divididas em dez proponentes e dezasseis categorias avaliativas como apresentado na Tabela 2 e 3 a seguir.

Tabela 2- Referência Metodologia - Autores

Número da Metodologia	Autor(es) / Nome
1	Shehab e Noureddin / AHP
2	Alshamrani / LCC+LEED
3	Sánchez, Bardón e Viviana / ERP
4	Habibi, Pons Valladares e Peña / MIVES+IFL+AHP
5	Lanzinha / MEXREB
6	EPA / IAQTS
7	USDE / PGMSF
8	NIOSH / DHHS
9	Owensby / K-12 SBM
10	EPA – Alaska / ARSAC

Tabela 3 - Comparação entre as Metodologias

	Metodologia de Avaliação									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Priorização de Reabilitação	√	√	√			√		√		
2. Equipamentos e Mobiliário	√						√	√		
3. Envolvente	√			√	√		√	√	√	
4. Caixa Vertical e Caixa Horizontal	√			√	√		√	√		
5. Interiores	√						√	√	√	
6. Serviços	√		√			√	√	√	√	√
7. Capacidade de Resposta				√				√		
8. Sistema de Energia Renovável			√	√			√	√		
9. Sistema Tipológico IFL				√						
10. Paredes e Pisos			√				√			
11. Controlo de Pragas e Poluição						√		√		√
12. Proteção e Segurança							√	√		√
13. Manutenção e Reparos						√		√		
14. Segurança e Emergência						√		√	√	
15. Saúde e Bem-estar						√		√		√
16. Gestão Ambiental						√		√		√

4 CONCLUSÕES

Esta pesquisa bibliográfica ressalva a importância da existência de modelos de avaliação sistemáticos e abrangentes para a inspeção de edifícios e, mais especificamente, de edifícios escolares. Eles consideram uma variedade de fatores, como alocação de recursos financeiros, segurança e qualidade do ar interior. No entanto, o que falta em todos eles é a capacidade de "integração" entre esses diversos elementos. Ou seja, ainda não foi proposto um modelo de avaliação que consiga unificar todos esses aspetos de forma coesa. Embora a maioria dos trabalhos mencionados se concentre em aspetos específicos da inspeção, não há menção explícita a um modelo ou abordagem que integre as 16 categorias em um único sistema ou metodologia abrangente de inspeção, especialmente voltado para edifícios escolares. Esta lacuna indica a necessidade de construir uma metodologia de avaliação para reabilitação que venha a abarcar todas as 16 categorias listadas e que venha a fundamentar estratégias de intervenção para reabilitação de edifícios escolares objetivando a sustentabilidade.

5 AGRADECIMENTOS

fct Fundação para a Ciência e a Tecnologia Este trabalho é apoiado com fundos nacionais portugueses pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., https://sciproj.ptcris.pt/175080UID , DOI 10.54499/UIDB/04082/2020.

REFERÊNCIAS

Alshamrani, O. S. D. (2012). *Evaluation of School Buildings Using Sustainability Measures and Life-Cycle Costing Technique* [Tese de Dooutorado, Concordia University]. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106793647

Ashrafian, T., e Moazzen, N. (2019). The impact of glazing ratio and window configuration on occupants' comfort and energy demand: The case study of a school building in Eskisehir, Turkey. *Sustainable Cities and Society*, *47*, 101483. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101483

Cappai, C., e Segantini, M. A. (2020). Schools and the legacy of hybrid buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *890*(1), 012027. https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012027

Chan, E. (2013). Flexible Delivery Approach in Architecture and Construction Management Course. *European journal of educational research*, *2*, 139–149.

Clark, H. (2002). *Building Education: The Role of the Physical Environment in Enhancing Teaching and Research. Issues in Practice.* Institute of Education, 20 Bedford Way, London, WC1H 0AL, England. https://eric.ed.gov/?id=ED472377

Crespo Sánchez, E., Cornadó Bardón, C., e Paris Viviana, O. (2023). Architectural and environmental strategies towards a cost optimal deep energy retrofit for mediterranean public high schools. Em *Energy Reports* (Vol. 9, pp. 6434–6448). https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.265

Faria Filho, L. M. de, e Vidal, D. G. (2000). Os tempos e os espaços escolares no processo de institucionalização da escola primária no Brasil. *Revista Brasileira de Educação*, 19–34. https://doi.org/10.1590/S1413-24782000000200003

Gazzani, V., Poiani, M., Clementi, F., Pace, G., e Lenci, S. (2019). Influence of FE modelling approaches on vulnerabilities of RC school buildings and proposal of a CFRP retrofitting intervention. Em *Open Construction and Building Technology Journal* (Vol. 13, pp. 269–287). https://doi.org/10.2174/1874836801913010269

Habibi, S., Pons Valladares, O., e Peña, D. (2020). New sustainability assessment model for Intelligent Façade Layers when applied to refurbish school buildings skins. Em *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 42). https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100839

Hagopian, K. J. (2013). Rethinking the Structural Architecture of the College Classroom. *New Directions for Teaching and Learning*, *2013*, 7–18.

Henni-Chebra, A. S., Cheikh-Zouaoui, M., e Abdessemed-Foufa, A. (2020). Macro Modelling in the seismic vulnerability assessment of school architecture in Algeria. Em *REHABEND* (pp. 944–952). https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85100422910epartnerID=40emd5=4e25c427ca94bbdb7da782082d17d952

Kang, S., Kim, S., Kim, S., e Lee, D. (2020). System dynamics model for the improvement planning of school building conditions. Em *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Número 10). https://doi.org/10.3390/su12104235

Lanzinha, J. C. G. (2013). *Reabilitação de edifícios metodologia de diagnóstico e intervenção* (Vol. 5). Livro digital, Edições Nova Europa. http://hdl.handle.net/10400.6/8473

Leiringer, R., e Cardellino, P. (2011). Schools for the Twenty-First Century: School Design and Educational Transformation. *British Educational Research Journal*, *37*, 915–934.

Maxwell, L. E. (1999). *School Building Renovation and Student Performance: One District's Experience.*

McLane, Y., e Dawkins, J. (2014). *Building of Requirement: Liberating Academic Interior Architec,ture*.

Molineiro, A. de Q. P., Jorge, E. M. de F., Moreira, J. A., Miranda, J. G. V., Sales, K. M. B., e Cardoso, H. S. P. (2022). Architectural design of classroom to stimulate learning in Higher Education: An Approach Connected with Neuroeducation and Neuroarchitecture. *International Journal for Innovation Education and Research*, *10*(4), 87–102. https://doi.org/10.31686/ijier.vol10.iss4.3707

National Institute for Occupational Safety and Health, N. (2020). Safety Checklist Program for Schools. *DHHS (NIOSH) PUBLICATION NUMBER 2004-101 OCTOBER 2003*. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2004101

Owensby, M. (2023, março 1). *The Complete K-12 School Building Maintenance Checklist*. Incident IQ. https://www.incidentiq.com/blog/the-complete-k-12-school-building-maintenance-checklist

Sam, M., e Kouhırostamı, M. (2020). A Critical Review on the Impact of Combining Outdoor Spaces and Nature with Learning Spaces on Students' Learning Ability. *GRID - Architecture Planning and Design Journal*, *3*(2), 272–290. https://doi.org/10.37246/grid.664546

Shehab, T., e Noureddin, A. (2017). Rehabilitation model for school buildings. Em *Proceedings—2017 International Conference on Engineering and MIS, ICEMIS 2017* (Vols. 2018-January, pp. 1–6). https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8272959

Siyu, S. (2020). Reconstruction and optimization methods of old university teaching buildings. *E3S Web of Conferences*.

Terenzi, G., Bazzani, C., Costoli, I., Sorace, S., e Spinelli, P. (2019). Advanced seismic retrofit of a mixed R/C-Steel structure. *Buildings*, *9*(12). Scopus. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9120241

U.S. Department of Education, National Center for Education Statistic, e National Forum on Education Statistic. (2003). *Planning Guide for Maintaining School Facilities,* (p. 347). U.S. Department of Education.

US, E. (2019). *Indoor Air Quality Tools for Schools: Preventive Maintenance Guidance Documents | US EPA*. https://www.epa.gov/iaq-schools/indoor-air-quality-tools-schools-preventive-maintenance-guidance-documents#intro

U.S. EPA, Region 10, Office of Ecosystems, Tribal and Public Affairs. (2012). *Alaska Rapid Schools Assessment Checklist*.

Yakut, A., Tonguc, Y., e Gülkan, P. (2008). *A comparative seismic performance assessment and rehabilitation of existing school buildings*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:165159319

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INCLUSÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ANÁLISE INTEGRADA DE CONSUMO ENERGÉTICO E DESEMPENHO AMBIENTAL DE ENVOLTÓRIAS DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR

Gabriela M. Bertoli[ab], Janaine F. G. Timm[a], Maurício Torres[a], Ana Passuello[a]

[a] Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Construção e Infraestrutura (PPGCI), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Osvaldo Aranha, 99 – 7° Andar, sala 706, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil.

[b] gabi.bertoli@gmail.com

RESUMO

As mudanças climáticas estão cada vez mais evidentes, exigindo práticas sustentáveis na construção civil. A fase operacional das edificações consome muita energia, emite gases do efeito estufa e gera impactos ambientais. A envoltória da edificação influencia o desempenho térmico, enquanto composições mais eficientes podem reduzir significativamente o consumo energético, contribuindo para mitigar as mudanças climáticas. Assim, é necessário projetar e construir incluindo a sustentabilidade. O objetivo deste artigo é analisar composições de envoltória considerando cenários de mudanças climáticas para Curitiba (PR), na zona bioclimática mais fria do Brasil. O método inclui: (i) identificação do estudo de caso e das composições de envoltória; (ii) seleção de cenários climáticos do IPCC (2023); (iii) desempenho ambiental (Avaliação do Ciclo de Vida) e consumo energético (simulação termoenergética); (iv) análise dos resultados e recomendações. Estuda-se um edifício residencial unifamiliar típico de 46 m², avaliando três composições de vedação externa, cobertura e forro, num período de 50 anos. Os resultados demonstram que a fase do ciclo de vida mais impactante é a operacional e que envoltórias mais eficientes, como as composições CB (tijolo cerâmico, laje, telha termoacústica) e CC (steel frame, telha termoacústica, forro de gesso), apresentam menores variações nos impactos ambientais devido às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida dinâmica, Simulação termoenergética, Habitação de Interesse Social, Abordagem integrada do ciclo de vida, Alterações climáticas.

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas e demais impactos ambientais estão cada vez mais presentes nos dias atuais e tendem a se agravar caso não haja transformações. O setor da construção civil se destaca como um dos grandes protagonistas nessas transformações. Em 2022, o setor foi responsável por 34% do consumo de energia, referente à energia operacional das edificações e à produção dos insumos, e por emitir 37% dos gases de CO_2 (UNEP e GlobalABC, 2024). A construção, utilização e demolição de edifícios desempenham um papel fundamental no atendimento das necessidades humanas; no entanto, essas atividades exercem uma pressão insustentável sobre o meio ambiente, a economia e a sociedade (Vandervaeren et al., 2022).

A energia operacional é responsável pela maior parte do uso de energia no ciclo de vida dos edifícios (Shadram e Mukkavaara, 2018). Moraga (2017) constatou que a fase operacional das habitações unifamiliares construídas no Brasil, utilizando diferentes sistemas construtivos, é responsável por

grande parte dos impactos totais. Além disso, Morales et al. (2019) identificaram que, em edificações residenciais construídas pelo Programa Minha Casa Minha Vida, o consumo de energia somado às operações de substituição dos elementos da edificação pode representar até 70% dos impactos de depleção abiótica de origem fóssil e potencial de aquecimento global. O estudo de Triana (2016) demonstrou que a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitações de interesse social pode melhorar o desempenho termoenergético e o conforto do usuário.

Em edificações mais eficientes, os impactos incorporados tornam-se mais relevantes (Liantoy, Chafer e Cabeza, 2020). Contudo, a otimização da energia operacional é mais simples do que a da energia incorporada, devido à complexidade do cálculo para quantificar a energia incorporada (Copiello, 2016), principalmente nas etapas iniciais de projeto, em que a disponibilidade de dados dos materiais é limitada (Dixit, 2017). Novos edifícios com estratégias de eficiência energética podem alcançar economias de até 50% no consumo de energia (Cristino et al., 2021). Entretanto, o consumo de energia não é calculado nos estágios iniciais de projeto, uma vez que a modelagem para simulação demanda tempo (Granadeiro et al., 2013). A conservação de energia e o processo de projeto de edifícios energeticamente eficientes têm sido uma preocupação para muitos pesquisadores (Tian et al., 2018). O processo de projeto deve visar à sustentabilidade, buscando melhorar o desempenho e as condições de construção por meio de métricas ambientais, econômicas e sociais, que podem ser descritas como um *triple bottom line* (Elkington, 1998). Ainda assim, os edifícios são compostos por sistemas fisicamente interconectados que exibem respostas não lineares às condições internas e externas, e as decisões de projeto em uma área inevitavelmente têm consequências em vários domínios (Phillips et al., 2020). Arquitetos e engenheiros que buscam avaliar o desempenho ambiental de sistemas construtivos podem fazê-lo segundo diferentes critérios, por meio da disponibilização de informações ambientais na fase de projeto (Timm et al., 2021). Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode auxiliar nas avaliações ambientais.

Os impactos ambientais têm ocasionado mudanças climáticas no planeta e os edifícios inevitavelmente enfrentarão os desafios dessas mudanças, devido à sua longa vida útil (Ramon et al., 2023), que influenciarão seu desempenho energético. Espera-se, por um lado, uma redução na demanda de energia para aquecimento e, por outro, um aumento na demanda de energia para resfriamento (Cellura et al., 2018). Essas mudanças podem influenciar no ciclo de vida da edificação e na relação entre energia operacional e energia incorporada, assim como o desempenho térmico e o consumo energético de uma edificação também pode influenciar nas mudanças climáticas, tendo em vista que edificações ineficientes podem demandar um maior consumo de recursos para climatização (Triana e Montes, 2016). A maioria dos estudos tende a se concentrar em como o setor de energia provoca as mudanças climáticas; no entanto, as alterações no clima podem ter sérios impactos no consumo de energia (Bazazzadeh et al., 2020). Assim, o número de estudos que avaliam o impacto das mudanças climáticas no setor de energia está aumentando (Bazazzadeh et al., 2020; Mahdavinejad et al., 2016). Porém, a maioria dos estudos assume o uso estático de energia (Moraga, 2017; Caldas, Lira e Sposto, 2017), e poucos estudos se concentraram nessas mudanças durante a vida útil, mostrando a importância de uma abordagem de avaliação dinâmica (Roux et al., 2016; Roux, Schalbart e Peupotier, 2017; Triana, Lamberts e Sassi, 2021).

No contexto atual, é essencial elaborar planos e estabelecer diretrizes para minimizar o consumo de energia de edificações (Schwartz e Raslan, 2013). Diversas normas foram desenvolvidas para promover a eficiência energética nos projetos de construção. Dentre as normas e certificações de desempenho ambiental, destaca-se a fase operacional da edificação pelo potencial de mitigar impactos. Nesse sentido, os projetos devem investigar meios de priorizar o desempenho energético alinhado com o ambiental. Estudos anteriores ilustram que o projeto pode auxiliar no desenvolvimento sustentável (Antón e Díaz, 2014). Kalagos (2017) enaltece que estratégias de conservação de energia em edificações auxiliam na mitigação de impactos e na preservação de recursos.

Os sistemas de vedação vertical externa (SVVE) e cobertura que compõem a envoltória exercem uma influência significativa no desempenho térmico do edifício (Natephra, Yabuki e Fukuda, 2018; Aslani, Bakhtiar e Akbarzadeh, 2019) e nos impactos operacionais. Por isso, a seleção dos materiais empregados na envoltória deve ser criteriosa, pois estes influenciam no consumo de energia para manter uma temperatura confortável para os ocupantes (Natephra, Yabuki e Fukuda, 2018). Estima-se que a envoltória é responsável por aproximadamente 25% do consumo de energia de um edifício, pois influencia nas trocas de calor, controlando a entrada de calor, ar, umidade e outros fatores (Kubba, 2012). Dessa forma, a melhoria do desempenho térmico da envoltória pode influenciar positivamente na eficiência energética da edificação e no consumo de energia. Além disso, várias estratégias podem contribuir para uma redução significativa dos impactos na fase operacional do edifício: melhora no desempenho dos sistemas da edificação, uso de tecnologias energeticamente eficientes e de baixo carbono, produção local de eletricidade e variação dos comportamentos dos ocupantes. O comportamento térmico do edifício depende fundamentalmente das decisões tomadas no projeto, principalmente daquelas relacionadas à volumetria, orientação das fachadas, áreas, posicionamento e sombreamento das janelas, sistemas construtivos de paredes e coberturas, cores, entre outros (Lamberts; Ghisi e Ramos, 2006).

Portanto, o projeto arquitetônico desempenha um papel significativo na busca pela mitigação dos impactos ambientais, uma vez que a escolha de materiais, tipo de construção, consumo de energia, tamanho e outras características influenciam nos impactos potenciais. O tamanho de uma edificação é um fator crucial no impacto do edifício, já que edificações menores tendem a consumir menos recursos naturais e apresentam baixo impacto ambiental em todas as etapas do seu ciclo de vida (Sipahi e Kulözü-Uzunboy, 2021). Além disso, edificações residenciais unifamiliares pequenas têm ganhado popularidade em consequência da escassez de terrenos urbanos, dos preços elevados e do uso reduzido de recursos, como materiais, eletricidade, óleo para aquecimento e água (Carlin, 2014). Dessa forma, unidades habitacionais compactas representam uma oportunidade para reduzir o consumo global de energia, minimizar os impactos ambientais e as emissões de gases de efeito estufa, além de atender às demandas sociais por habitação.

No Brasil, o déficit habitacional em 2019 foi de 5,8 milhões de residências (MDR e Fundação João Pinheiro, 2022), e a falta de acesso é pior para as famílias de baixa renda. O Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), lançado pelo Ministério das Cidades com o objetivo de reduzir o déficit habitacional. Para acelerar o processo de construção e reduzir custos, o projeto de habitação social foi concebido em um modelo padronizado para todo o país, sem levar em conta especificações regionais, condições climáticas e materiais utilizados (Dalben et al., 2019). Como resultado, os edifícios têm baixa

qualidade e não atendem às necessidades dos usuários em muitos aspectos, incluindo conforto térmico e desempenho energético (Triana, 2016; Dalben et al., 2019). Nesse sentido, o objetivo do artigo é analisar três composições de envoltória considerando dois cenários de mudanças climáticas para a cidade de Curitiba (PR), situada na zona bioclimática mais fria do Brasil (ZB 1).

2 DADOS E MÉTODO DO ESTUDO DE CASO

O método do estudo é composto de 4 etapas: (i) identificação do estudo de caso e das composições de envoltória; (ii) seleção dos cenários de mudanças climáticas propostas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) (IPCC, 2023); (iii) consumo energético; (iv) desempenho ambiental; (v) análise dos resultados e recomendações. Na primeira etapa, é identificado um projeto de construção de pequeno porte representativo no Brasil, e são definidas algumas composições de envoltória de construção. Na segunda etapa, são definidos os cenários de mudanças climáticas para a simulação. Enquanto na terceira etapa, são feitas as simulações termoenergéticas e calculados os impactos ambientais. Por fim, na quarta etapa, são apresentadas recomendações e discussões.

2.1 IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO E DAS COMPOSIÇÕES DA ENVOLTÓRIA

O estudo de caso examina um pequeno edifício residencial unifamiliar no Brasil, com uma área aproximada de 46 m². A planta é composta por cozinha e sala integradas, dois quartos, banheiro e lavanderia, todos com pé direito de 2,60 m. Cada ambiente foi modelado como à uma zona térmica (ZT), conforme mostrado na Figura 1.

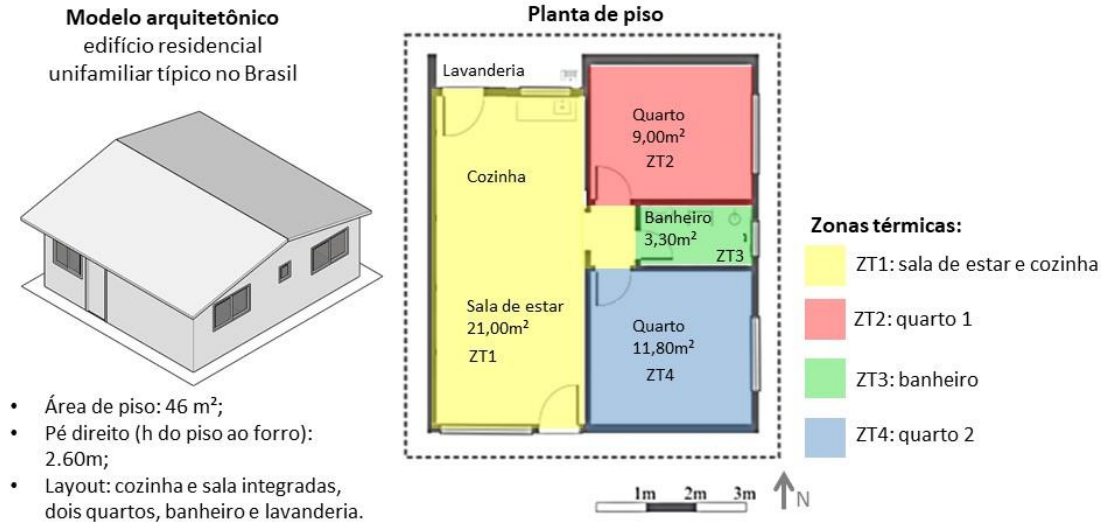


Figura 1 – Apresentação do estudo de caso e cenários da envoltória.

A ZT1 corresponde à sala de estar e cozinha, a ZT2 e a ZT4 correspondem aos quartos, e a ZT3 corresponde ao banheiro. Foram implementadas algumas alterações no projeto original: (i) orientação solar das janelas, com as janelas dos quartos voltadas para o norte e as janelas da sala voltadas para leste e oeste; (ii) integração entre cozinha e sala por meio da remoção de uma parede. Três composições distintas de sistemas construtivos (Quadro 1) foram criadas - as alterações foram feitas nos sistemas de parede, forro e telhado. A Composição A (CA) conta com tijolo cerâmico, telha cerâmica e forro de gesso. A Composição B (CB) é composta de tijolo cerâmico, laje de concreto e telha termoacústica. Por fim, a Composição C (CC) é formada por *stell frame*, telha termoacústica e forro de

gesso. Embora esquadrias, janelas e portas sejam essenciais para o desempenho térmico e consumo energético, este estudo não avaliou diferentes opções para esses elementos. Porém, futuras pesquisas podem incluir essas configurações em suas análises.

Quadro 1- Composições da envoltória e valores da Transmitância térmica (U) do sistema construtivo.

		Composições da envoltória						
		Parede		Telhado			Forro	
		Tijolo cerâmico[1]	Steel frame[2]	Telha cerâmica[3]	Laje de concreto[4]	Telha termoacústica[5]	Sem forro	Forro de gesso[6]
Convencional	Composição A (CA)	X		X				X
	Composição B (CB)	X			X	X	X	
Inovador	Composição C (CB)		X			X		X
Valor U do sistema (W/m². K)		2.9	0.6	4.5	2.9	1.1	-	14.7

Legenda: composição e espessura [1]tijolo de barro 14,0x19,0x29,0cm (19cm), argamassa de assentamento (1.5cm), argamassa de revestimento (1.5cm), pintura; [2]placa de cimento (1cm), OSB (2cm), estrutura em aço, lã de rocha (3cm), placa de gesso (1.25cm), pintura; [3]telha cerâmica (3 cm, inclinação= 35%), estrutura de madeira; [4]laje de concreto pré-moldado (12cm), concreto 3,5m³ 1:2:3 (2cm); [5]telha termoacústica (3cm, inclinação= 6%), estrutura de madeira; [6]estrutura, gesso cartonado (1.25cm), pintura.

O estudo de caso está localizado em Curitiba, representando a Zona Bioclimática 1 no Brasil, com um período de análise de 50 anos, conforme a norma nacional NBR 15575:2021 (ABNT, 2021). Os cenários de substituição foram baseados na vida útil mínima projetada para edifícios residenciais, considerando recomendações restritivas para manutenção e substituição devido à habitação social e apresentados anteriormente em Bertoli et. al (2024). Cada sistema possui uma vida útil diferente:

- Parede interna: a cada 20 anos - argamassa de revestimento, argamassa de assentamento; a cada 3 anos – pintura interna;
- Parede externa: a cada 40 anos – argamassa de revestimento; a cada 8 anos – pintura externa;
- Steel frame: a cada 20 anos - isolamento térmico, gesso cartonado, placa de cimento;
- Piso: a cada 16 anos;
- Esquadrias: a cada 20 anos – portas e janelas;
- Forro de gesso: a cada 16 anos – revestimento externo em gesso; a cada 40 anos – estrutura do teto de gesso; a cada 3 anos – pintura;
- Telha termoacústica ou telha cerâmica: a cada 16 anos;
- Estrutura de aço ou estrutura de madeira para o telhado: a cada 20 anos.

A frequência de substituição foi arredondada quando ainda havia vida útil restante. Alguns sistemas estruturais, como a estrutura de aço do sistema steel frame, a estrutura externa de tijolos, a fundação da viga, o contrapiso e a laje de concreto, não necessitam de substituição. A análise não incluiu a manutenção e substituição do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) devido à falta de variações entre os cenários.

2.2 SELEÇÃO DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Os arquivos climáticos futuros para simulação energética de edificações foram disponibilizados pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os dados, disponibilizados em formato EPW nos períodos de 2010, 2050 e 2090, são considerados para a geração dos Anos Meteorológicos Típicos (TMY) para a cidade de Curitiba e outras capitais brasileiras (Zenodo, 2024). Foi escolhido o cenário RCP 2.6 (cenário de mitigação, considera um nível mais baixo de emissões) para a simulação termoenergética com projeções climáticas futuras.

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO

A avaliação do consumo energético foi realizada através de simulação no EnergyPlus 8.9.0. A modelagem geométrica foi feita no SketchUp 2018 com o plugin Open Studio 2.5.0. As cargas térmicas consideram três residentes (ver Quadro 2). Para habitação social, sem dados oficiais sobre ocupação, considerou-se uma média de 3,3 habitantes por domicílio, ajustada para 3 moradores. Um quarto acomoda duas pessoas e o outro uma pessoa. O sistema HVAC é um ar condicionado split com ajustes de 20°C para aquecimento e 25°C para resfriamento, enquanto a taxa de infiltração é de uma troca de ar por hora. Esses parâmetros são baseados em estudos anteriores para conforto térmico conservador e pesquisas sobre ventilação natural no Sul do Brasil. O horário de ocupação é parcial: das 17h às 22h (50% nas salas) e das 22h às 6h (100% nos quartos) nos dias úteis, e horários específicos para fins de semana. As propriedades dos componentes da envoltória seguem a norma NBR 15220:2022 (ABNT, 2022) para o desempenho térmico de edifícios habitacionais de baixo custo.

Quadro 2: Zonas e cargas térmicas da edificação com dados de área, iluminação e equipamentos.

Zona térmica	Descrição	Área (m²)	Iluminação (W)	Equipamentos elétricos (W)	Descrição dos equipamentos	Número de habitantes
TZ 1	Cozinha, sala de estar e de jantar	21	110	3100	Ar condicionado, fogão, geladeira	3 habitantes
TZ 2	Dormitório 1	9	45	65	Ar condicionado	
TZ 3	Banheiro	3	150	2500	Chuveirro	
TZ 4	Dormitório 2	12	50	110	Ar condicionado	

2.4 DESEMPENHO AMBIENTAL

A análise de impacto ambiental foi realizada através da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b). Os sistemas de parede escolhidos são comuns no contexto local, apesar de variarem em espessura e desempenho. O objetivo e o escopo da ACV definem os limites do estudo. Neste estudo, a ACV é aplicada para avaliar os potenciais impactos ambientais de seis cenários com 3 composições diferentes de envoltória, e a unidade funcional é uma pequena casa com 46 m² com ocupação de 3 pessoas. A fronteira do sistema permite comparar os impactos ambientais e numa perspectiva do berço ao túmulo, incluindo as fases definidas pela EN 15978:2011 (CEN,2011).

a. Etapa do produto (A1-A3): extração de matéria prima (A1), transporte das matérias primas (A2) e manufatura (A3);
b. Construção (A4-A5): transporte até o canteiro de obras (A4) e construção (A5);
c. Uso (B1-B7): substituição (B4), uso de energia operacional (B6);

d. Fim de vida (C1-C4): desconstrução (C1), transporte (C2) e disposição final (C4).

Os cenários de substituição são descritos em Bertoli et al. (2024) e seguem a norma NBR 15575:2021 (ABNT, 2021). As quantidades (dados de inventário) de cada sistema foram baseadas em especificações técnicas e dados do SINAPI. Materiais que contribuem pouco para a massa ou energia são excluídos, exceto os metálicos devido ao seu impacto ambiental. Dados de base são do Ecoinvent v3.6, usando dados específicos do Brasil (BR), quando disponíveis, ou do Resto do Mundo (RoW), quando não disponíveis. Utilizando o IPCC 2021 GWP-100a, os impactos ambientais foram calculados no software OpenLCA v1.10. A categoria de impacto foi escolhida pela relevância das mudanças climáticas e descarbonização.

2.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

Nesta etapa, os resultados são analisados em conjunto para permitir uma avaliação integrada entre o consumo energético e o desempenho ambiental, a modelagem da ACV dinâmica e o impacto nos resultados dos diferentes cenários de mudanças climáticas.

3 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados de acordo com as etapas do método: consumo energético, desempenho ambiental, análise dos resultados e recomendações.

3.1 CONSUMO ENERGÉTICO

As mudanças climáticas afetam diretamente a fase operacional das edificações e os dois cenários avaliados para as três composições de envoltória ilustram isso através da variação do consumo de energia elétrica na Figura 2.

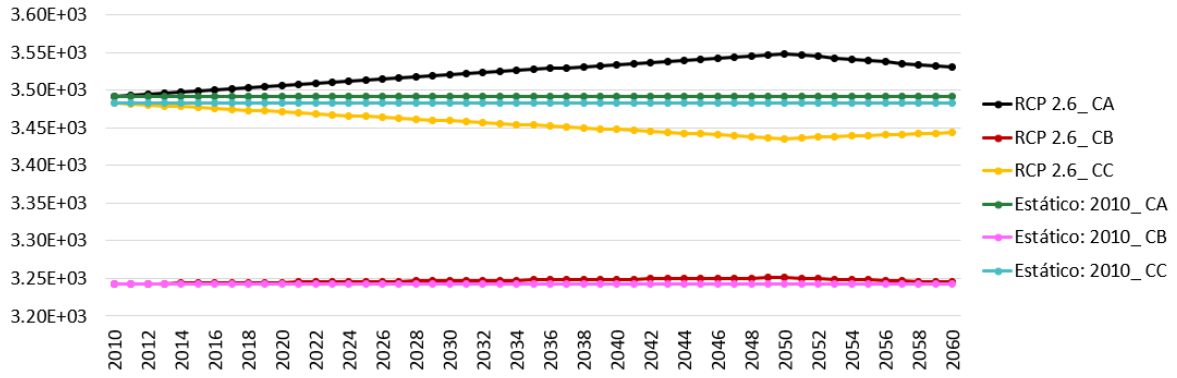


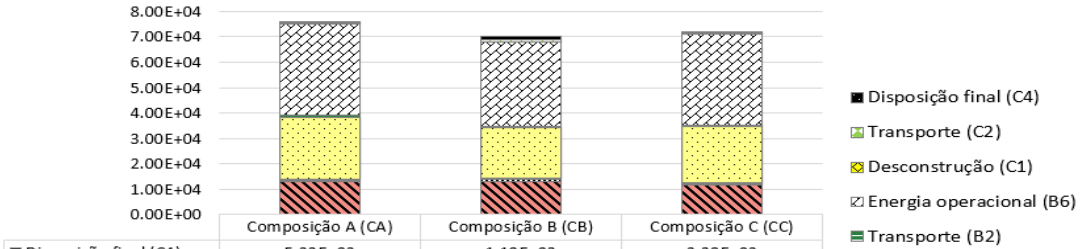
Figura 2 – Resultados por ano do consumo e energia operacional (kW/ano) de toda a edificação (46 m²) por 50 anos, considerando os cenários de mudanças climáticas (Estático:100 e RCP 2.6) e as combinações de envoltória (CA, CB e CC).

No cenário estático (Estático: 2010), sem considerar a variação no consumo energético decorrente das alterações do clima, verifica-se que o consumo de energia elétrica se mantém o mesmo ao longo de toda a vida útil da edificação e poderia ser calculado a partir de uma ACV estática. No cenário RCP 2.6 considerou-se que as mudanças climáticas vão alterar as temperaturas do planeta e isso afetará o conforto dos usuários e o uso de estratégias ativas na edificação. Para incorporar todas essas variações se faz necessário a aplicação de uma ACV dinâmica.

Os cenários RCP 2.6 CA e CB apresentaram aumento no consumo operacional anual em relação ao Estático:2010 CA e CB até o ano de 2050, dali para frente houve uma redução gradual. O RCP 2.6 CC apresentou tendência oposta, queda de consumo até o ano de 2050 e aumento daquele período em diante. Tais resultados estão relacionados a composição da envoltória e a sua capacidade de responder termicamente melhor a determinadas configurações climáticas e não a outras. Os modelos do IPCC incluem o aumento de temperaturas e eventos climáticos extremos, o que demanda que os sistemas e materiais de envoltória sejam resilientes e dinâmicos para atender diferentes demandas, que podem não ser características das atuais zonas bioclimáticas.

3.2 DESEMPENHO AMBIENTAL

Os impactos do desempenho ambiental, Figura 3, ilustram que a Composição A (CA), mais comumente empregada em casas de habitação social no Brasil, apresenta o maior impacto de GWP-100a com 7.58E+04 kg CO_2 eq. dentre os cenários analisados, seguida pela Composição C (CC) com 7.16E+04 kg CO_2 eq. (redução de 5.55% em relação ao CA) e a Composição B (CB) com 7.01E+04 kg CO_2 eq. (redução de 7.52% em relação ao CA). A fase do ciclo de vida mais impactante é a energia operacional (fase B6) representando 47%, 48% e 50% nas CA, CB e CC, respectivamente. A fase operacional foi calculada com os dados estáticos de consumo energético, sem considerar os cenários de mudanças climáticas. Considerando a relevância dessa fase, uma análise de sensibilidade com ACV dinâmica será apresentada na sequência considerando os cenários de mudanças climáticas. Há destaque também para a fase de uso - manutenção (B2) com CA=32%, CB=29%, e CC=31%, e a fase de produção (A1-A3) com CA=17%, CB=19% e CC=16%. As demais fases do ciclo de vida representam menos de 1% da composição total do impacto.



	Composição A (CA)	Composição B (CB)	Composição C (CC)
Disposição final (C4)	5.23E+02	1.19E+03	2.38E+02
Transporte (C2)	3.74E+02	9.16E+02	1.87E+02
Desconstrução (C1)	6.00E+01	6.00E+01	6.00E+01
Energia operacional (B6)	3.59E+04	3.33E+04	3.58E+04
Transporte (B2)	8.39E+02	2.20E+02	7.34E+02
Manutenção (B2)	2.40E+04	2.01E+04	2.20E+04
Construção (A5)	5.24E+02	5.24E+02	5.24E+02
Transporte (A4)	3.83E+02	5.25E+02	3.98E+02
Produto (A1- A3)	1.32E+04	1.33E+04	1.18E+04

Figura 3 – Impactos de GWP-100a (kg CO_2 eq.) de toda a edificação (46m²) para todas as fases do ciclo de vida, sem considerar os cenários de mudanças climáticas.

Na análise de sensibilidade da fase operacional verifica-se que os Cenários RCP 2.6 nas composições CA e CB resultaram em maior impacto proveniente da energia operacional quando comparado com o seu equivalente no cenário Estático:100, ilustrado na Figura 4. Por outro lado, o resultado do RCP 2.6 do CC é menor que aquele do Estático:100 CC. Apesar da variação entre os cenários da mesma composição ser reduzida, o montante total é significativo, pois esta é a fase do ciclo de vida que mais afeta os impactos de GWP-100a da edificação. Para ilustrar enfatizamos a composição CA onde o cenário Estático:2010 emitiu 3.59E+04 kg CO_2 eq. e o RCP 2.6 emitiu 3.62E+04 kg CO_2 eq.. A diferença entre eles é de somente 0.9%, mas equivale à emissão de 1 carro, com emissões de 145g/ km, rodando 250344.8 km (Volkswagen, 2024).

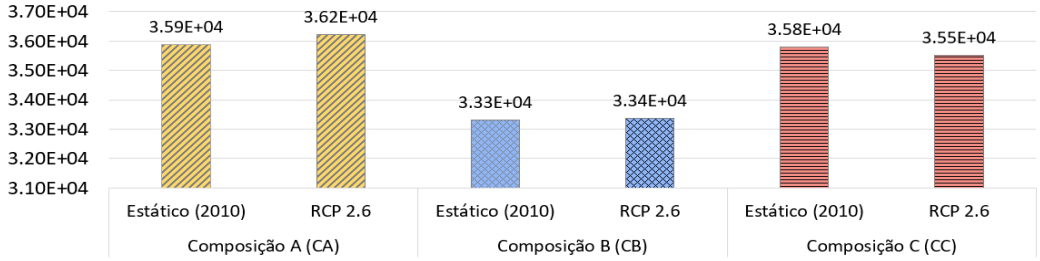


Figura 4 – Impactos de GWP-100a (kg CO_2 eq.) de toda a edificação (46m²) da fase operacional para cada composição da envoltória e considerando os dois cenários das mudanças climáticas.

Os resultados das diferentes composições da envoltória também ilustram que as mudanças nos impactos são menores nos sistemas que contam com envoltórias mais eficientes, como é o caso do CC e CB.

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

A avaliação integrada entre o consumo energético e o desempenho ambiental se mostra fundamental para equilibrar os impactos da energia operacional e incorporada. Os resultados da avaliação permitem uma especificação adequada dos sistemas que compõem a envoltória priorizando a eficiência energética, redução de impactos e conforto do usuário. Ademais, a ACV dinâmica ilustrou que é necessário ajustar a fase operacional da edificação, considerando as mudanças climáticas ao longo da extensa vida útil das edificações. Isso porque é a fase mais impactante da edificação e porque há grande potencial para mitigação das emissões causadoras das mudanças climáticas.

Para ampliar as discussões acerca dos cenários futuros, estudos posteriores também podem incluir as mudanças de composição do grid de produção da energia elétrica, verificando se os países estão investindo em fontes renováveis e se haverá redução do impacto ambiental do processo. Outra discussão se refere a eficiência dos equipamentos de HVAC, pois com a inclusão de novas tecnologias, podem contar com menores impactos incorporados e operacionais.

O estudo apresenta algumas limitações que podem ser superadas em pesquisas futuras. Investigações adicionais poderiam incluir diferentes zonas climáticas no Brasil e em outros países, comparando como os cenários propostos se comportam em locais diversos com distintas zonas climáticas e desenvolvendo diferentes arquétipos de construção e cenários para habitação social. Outra limitação é a utilização de dados regionalizados no software OpenLCA e da base de dados Ecoinvent para calcular os impactos. Em pesquisas futuras, é possível utilizar dados coletados no contexto brasileiro, conforme realizado por Morales et al. (2019).

4 CONCLUSÕES

A comparação entre os diferentes cenários indicam que edificações com envoltórias mais eficientes, como as composições CC e CB, apresentam menores variações nos impactos ambientais devido às mudanças climáticas. Os cenários RCP 2.6 mostraram que a resiliência dos sistemas e materiais da envoltória é crucial para enfrentar as condições climáticas extremas previstas pelos modelos do IPCC, visto que as condições futuras podem não corresponder às características das atuais zonas bioclimáticas. Para incorporar essas variações, é essencial a aplicação de uma ACV dinâmica, permitindo uma análise mais precisa do consumo energético e do desempenho ambiental ao longo do tempo. Trabalhos futuros poderiam explorar a adaptação de materiais e sistemas construtivos,

desenvolvendo soluções inovadoras que aumentem a resiliência das edificações e reduzam os impactos ambientais em cenários de mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil) e pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil). A participação de A.P é patrocinada pelo CNPq por meio das bolsas de pesquisa PQ 2021 [bolsa número 310208/2021-1], J. F. G. T. pela CAPES [bolsa número 88887.912604/2023-00] e CAPES PrInt EDITAL nº. 41/2017 [bolsa número 88887.721633/2022-00], G. M. B. foi apoiada pela CAPES [bolsa número 88887.659497/2021-00] e CAPES PDSE Edital n° 6/2024 [bolsa número 88881.982681/2024-01].

5 REFERÊNCIAS

Aslani, A. Bakhtiar, A.; Akbarzadeh, A. Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment. Journal of Building Engineering, v. 21, p. 55-63, 2019.

Antón, L. Á.; Díaz, J. Integration of life cycle assessment in a BIM environment. Creative Construction Conference, v. 85, p. 26–32, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. RJ, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-3 Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.. NBR ISO 14040 Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044 Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.b.

Bazazzadeh, H., et al., Promoting Sustainable Development of Cultural Assets by Improving Users' Perception through Space Configuration; Case Study: The Industrial Heritage Site. Sustain., 2020.

Bertoli, G.; Timm, J.; Ries, R.; Torres, M.; Passuello, A. Life cycle integrated analysis of thermal, environmental and cost performance of building envelope system: Small house case study considering grid mix change in Brazil. Energy and Buildings. 2024. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114096

Caldas, L. R.; Lirra, J. S. de M. M.; Sposto, R. M. Avaliação do Ciclo de Vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. Revista Latino-americana em Avaliação do Ciclo e Vida, v. 1, n. 1, p.138-167, 2017.

Carlin, T. M. Tiny homes: improving carbon footprint and the American lifestyle on a large scale, celebrating scholarship & creativity day. College of Saint Benedict and Saint John's University, Minnesota, 2014.

Cellura, M. , Guarino, F. Longo,S, Tumminia, G. Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe. Energy for Sustainable Development., 2018.

CEN - European Committee for Standardization. EN 15.978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.

Copiello, S. Economic implications of the energy issue: Evidence for a positive non-linear relation between embodied energy and construction cost. Energy and buildings, 2016.

Cristino, T. M.; Faria Neto, A.; Wurtz, F.; Delinchant, B.. Barriers to the adoption of energy-efficient technologies in the building sector: A survey of Brazil. Energy and Buildings. Energy and Buildings, 252 (2021). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111452.

Dalbem, R.; Cunha, E. G.; Vicente, A.; FIGUEIREDO, R. ; OLIVEIRA, A. C. S. B. Silva. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. Energy 167 (2019) 1278-1296. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.053

Dixit, M. K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 390–413, 2017.

Elkington, J.. Accounting for the triple bottom line. Measuring business excellence, v. 2, n. 3, p. 18-22, 1998.

GRANADEIRO, Vasco et al. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. Automation in construction, v. 32, p. 196-209, 2013.

IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6- 9789291691647.001

Kalagos, C.. Barriers and Policy Drivers to Energy Efficiency in Energy Intensive Turkish Industrial Sectors. International Journal of Energy Economics and Policy. (2017).

Kubba,S.Handbook of Green Building Design and construction: LEED, BREEAM, and Green Globes

(1st ed.), Butterworth-Heinemann, 2012.

Lamberts, R.; Ghisil, E.; Ramos, G. Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência Energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil. LABEEE, UFSC, 2006.

Lantoy, N.; Chafer, M.; Cabeza, L. F.. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. Energy and Buildings 225 (2020) https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110323

Mahdavinejad, M.; Mohammadi, S. Parametric optimization of daylight and thermal performance through louvers in hot and dry climate of Tehran. Journal of fundamental and applied sciences, v. 8, n. 3, p. 1221-1236, 2016.

Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e Fundação João Pinheiro. Déficit habitacional no Brasil 2013–2014 2018. Available in: http://novosite.fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/. Acessado em: Jan 2023.

Moraga, G. L. Avaliação do Ciclo de Vida em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS , Porto Alegre, 2017.

Morales, M. et al. Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 238, p. 117869, 2019.

Natephra, W.; Yabukil, N.; Fukuda, T.. Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. Building and Environment. 136 (2018) 128-145.https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.032

R Phillips, L Troup, D Fannon, MJ Eckelman. Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings Building and Environment, 2020 - Elsevier

Ramon, A.; Batuecas, E.; Sérgio Sanches, D. Mechanical performance after high-temperature exposure and Life Cycle Assessment (LCA) according to unit of stored energy of alternative mortars to Portland cement. Construction and Building Materials 365, 130082, 2023

Roux, C.; Schalbart, P.Assoumou, E.; Peuportier, B.. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts Applied Energy., 184 pp. 619-629,2016

Roux, C.; Schalbart, P.; Peuportier, B. Development of an electricity system model allowing dynamic and marginal approaches in LCA—tested in the French context of space heating in buildings. Life Cycle Assess., 22. 2017.

Schwartz, Y.; Raslan, R. Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. Energy Build. 2013.

Shadram, F.; Mukkavaara, J. . An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. Energy and Buildings, v. 158, p. 1189-1205, 2018.

Sinduscon (2007). Custo Unitário Básico (CUB/m²): 2007,112. Disponível em: http://www.cub.org.br/static/web/download/cartilha-principais-aspectos-cub.pdf . Acessado em: Jan. 2023.

Sipahi, S.; Kulözü-uzunbo, N. A study on reducing the carbon footprint of architectural buildings based on their materials under the guidance of eco-design strategies. Clean Technologies and Environmental Policy 23 (2021) 991–1005. https://doi.org/10.1007/s10098-020-02009-4

Tian, Z.; Zhang, X.; Jin, X.; Zhow, X.; SI, B.; SHI, X.. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. Energy and Buildings. 158 (2018) 1306-1316. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.022

Timm, J. F. G., Maciel, V. G., & Passuello, A. (2021). Green public procurement model for environmental assessment of constructive systems. International Journal of Construction Management, 23(4), 718–728. https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1920162

Triana, M. A.; Lamberts, R. Sassi, R.. Sustainable energy performance in Brazilian social housing: A proposal for a Sustainability Index in the energy life cycle considering climate change. Energy and Buildings 242 (2021). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110845

Triana, M. A.. ABORDAGEM INTEGRADA NO CICLO DE VIDA DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL CONSIDERANDO MUDANÇAS CLIMÁTICas(Doutorado em Engenharia Civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.2016.

UNEP; GlobalABC. Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond Foundations - Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector; 2024; ISBN 9789280741315.

Vandervaeren, C.; Galle, C. W.; Stephan, A.; Temmerman, N.. More than the sum of its parts: Considering interdependencies in the life cycle material flow and environmental assessment of demountable buildings. Resources, Conservation & Recycling 177 (2022). https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106001

Volkswagen, Movimento mobilidade sustentavel. Disponível em: ttps://valor.globo.com/patrocinado/movimento-mobilidade-sustentavel/mobilidade-sustentavel/noticia/2022/01/14/voce-sabe-quanto-co2-seu-carro-emite-calculadora-pode-te-ajudar.ghtml Acessado em: 20 de junho de 2024.

Zenodo. Brazil - Future weather files for building energy simulation. Disponível em: https://zenodo.org/records/10015137 . Acessado em: Maio de 2024.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE REVESTIMENTO DE FACHADA COM ARGAMASSA

Adolpho Guido de Araújo[a]; Eudes de Arimatéa Rocha [a]; Arnaldo Manoel Pereira Carneiro[b]; Rachel Perez Palha[b]

[a]Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Pernanbuco, Rua Benfica, Madelena, 50.720-001, Recife, Brasil), aguia@poli.br

[b]Universidade Federal de Pernambuco (Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Av Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife, Brasil), adolpho.guido@ufpe.br

RESUMO

A indústria da construção evoluiu no sentido do desenvolvimento econômico regional, sem abordar as questões ambientais. Este estudo teve como objetivo desenvolver uma metodologia objetiva para aplicação em emboços externos de argamassa, a fim de quantificar seis aspectos ambientais na fase de pré-construção. A metodologia consistiu em três fases: estudo preliminar, desenvolvimento do modelo e validação do método. A primeira fase investigou a sustentabilidade na indústria da construção, aspectos ambientais, métodos de avaliação ambiental e normas/regulamentos de gestão ambiental. Na segunda fase foi selecionada a atividade construtiva de emboço externo de argamassa e aspectos ambientais. Na terceira fase foram calculados os impactos ambientais. Por fim, o modelo preditivo foi aplicado ao componente do revestimento de argamassa para validação dos impactos ambientais. Os resultados demonstraram uma redução de cinco impactos ambientais no estudo de caso quando comparado ao estudo teórico, a saber: emissões de gases de efeito estufa: 5,72 kgCO_2e; poluição do solo: 3.420,00 mg; uso de recursos e matérias-primas: 1,1409E-12 impacto total; resíduos de construção e demolição: 0,68 kg e uso de energia: 76,00 Mj. Nesta pesquisa inovadora, foram investigados os aspectos ambientais do emboço externo da argamassa, utilizando indicadores aplicáveis a cada aspecto, eliminando assim a subjetividade das avaliações anteriores. O componente do revestimento em argamassa denominado emboço foi avaliado de forma objetiva com base em uma metodologia de quantificação dos aspectos ambientais na fase de pré-construção.

Palavras-chave: Argamassas, Desempenho, Indicadores, Meio Ambiente, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A dificuldade de conciliar a necessidade de crescimento económico acelerado com a sustentabilidade é um dilema significativo nos países em desenvolvimento (Hosseini *et al.* 2017). Os projetos de construção nestes países têm impactos profundos na sustentabilidade (Banihashemi *et al.* 2017). Como tal, é importante minimizar o consumo de materiais e energia, reutilizar e reciclar materiais e satisfazer as necessidades humanas (Sinha *et al.* 2013). A ISO 15392 (2008) demonstra que a indústria da construção tem excelentes oportunidades para melhorar os seus impactos económicos, ambientais e sociais. Nesse aspecto, projetos sustentáveis podem ser uma alternativa na mitigação de impactos ambientais (Hernández-Moreno & Hoyos-Martínez 2010). EMAS (2009) define aspectos ambientais como um elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente. Apesar da necessidade das organizações identificarem esses aspectos, independentemente da adoção de um sistema formal de gestão ambiental (Johnston *et al.* 2000), eles têm sido frequentemente confundidos, dificultando sua correta identificação (Zobel e Burman 2004). A não identificação rigorosa desses aspectos provoca mudanças não mapeadas no ambiente e promove impactos negativos que afetam a imagem das organizações (Murphy e Nahod 2017). A ISO 14004 (2005) enfatiza que não existe uma abordagem única para identificar aspectos ambientais, mas podem ser considerados: emissões atmosféricas; descarte de água ou terra; utilização de matérias-primas e recursos naturais; questões ambientais locais/comunitárias; uso de energia; energia emitida (vibração); resíduos e subprodutos; e atributos físicos. A ausência de dados e a falta de informações transparentes são desafios na identificação de indicadores de sustentabilidade (Banihashemi *et al.* 2017).

Não há consenso na literatura no que diz respeito a identificação de aspectos ambientais relacionados às atividades de construção, variando em termos de produtos, processos construtivos, documentação e experiência do pesquisador. Os autores utilizaram diferentes técnicas e identificaram diversos aspectos ambientais. Por exemplo, Gangolells *et al.* (2009) citaram emissões de gases de efeito estufa, compostos orgânicos voláteis e emissões de clorofluorocarbonetos, além dos efeitos sobre a biodiversidade; Chen *et al.* (2000, 2004) desconsideraram lançamentos em corpos hídricos em suas pesquisas; e Tam *et al.* (2004) consideraram as alterações do solo e os efeitos dos impactos ecológicos na vegetação. O único consenso na literatura foi o impacto ambiental promovido pela indústria da construção (Yu *et al.* 2018). De acordo com Teh *et al.* (2018), as alternativas e práticas devem ser exploradas para reduzir esses impactos. Os aspectos ambientais sugeridos pela ISO 14004 (2005) foram adotados no presente estudo. Este artigo teve como objetivo desenvolver uma metodologia quantitativa para avaliar aspectos ambientais na fase de pré-construção de revestimentos de argamassa utilizando a equação para quantificar seis aspectos ambientais. O artigo foi dividido em cinco seções. A seção 2 apresentou uma descrição detalhada dados e métodos; a seção 3 mostrou os resultados e discussão; e a seção 4 relatou as conclusões, respectivamente.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

O referencial metodológico consistiu em quatro fases: análise prévia, identificação dos aspectos ambientais, avaliação dos aspectos ambientais e análise comparativa. A composição de custo do serviço de revestimento e os aspectos ambientais foram previamente estabelecidos. Um estudo dos aspectos ambientais consistiu em analisar a fonte geradora (construção) quanto ao seu impacto. Com vista ao desenvolvimento, os modelos de quantificações dos aspectos ambientais foram recrutados nas publicações internacionais para calcular os seis aspectos ambientais relacionados com a construção, a saber: 1 Emissões de gases com efeito de estufa (GEE), 2-Poluição do solo (PSOLO), 3

Uso de recursos e matérias-primas (URMP), 4-Resíduos de construção e demolição (RCD), 5-Utilização de água (UA) e 6-Uso de energia (UE). As avaliações quantitativas dos aspectos ambientais foram analisadas e comparadas entre um estudo de caso e um estudo teórico (Figura *1*).

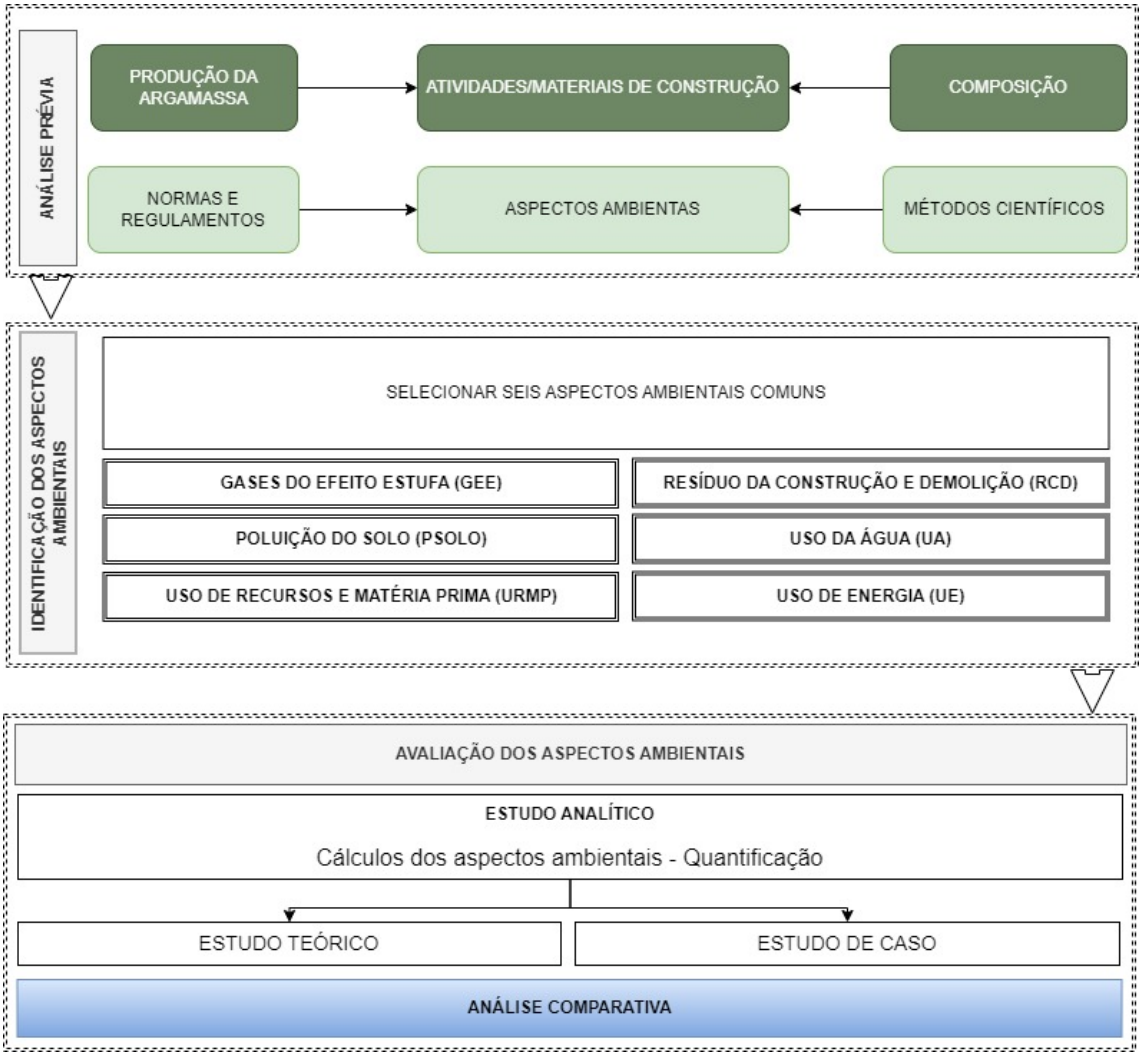


Figura 1 - Fluxograma da Metodologia

2.1 CÁLCULO DOS ASPECTOS AMBIENTAIS

Primeiro, as quantidades de GEE foram medidas utilizando a metodologia sugerida por Yim *et al.* (2018), com base nas equações EPA (2016). As emissões associadas aos materiais de construção foram calculadas, conforme equação (1):

$$GEE_{(material)} = \sum Qtd_{material} \; x \; FE_{gee\ mat} \qquad (1)$$

Onde:

GEE (material): total de GEE provenientes de materiais (cimento e areia) em $kgCO_2e$;

$Qtd_{material}$: quantidade de material de construção (em kg);

$FE_{gee\ mat}$: fator de emissão de GEE para material de construção (em $kgCO_2e/kg$).

A poluição do solo (PSOLO) foi determinada conforme proposto por Eikelboom *et al.* (2001) e Araújo *et al.* (2020), a poluição máxima do solo foi estabelecida em 0,01%, conforme descrito na equação (2):

$$PSOLO_{\square} = 0{,}01\% \sum Qtd_{material}\ x\ VT \quad (2)$$

Onde:

PSOLO: poluição do solo em mg/m³;

$Qtd_{material}$: quantidade de material utilizado em mg;

Volume total (VT): volume total de material em m³.

O URMP foi calculado com base em Ng *et al.* (2017), onde o coeficiente de impacto ponderado do material de construção foi multiplicado pela quantidade de material, resultando no impacto total da atividade. Foi excluída a quantidade de resíduo produzido durante o processo construtivo, conforme descrito na equação (3):

$$URMP = Qtd_{material} * Coef.Impacto \quad (3)$$

Onde:

URMP: utilização de recursos e matérias-primas em impacto total;

$Qtd_{material}$: quantidade de material utilizado em m³ ou kg;

Coef. Impacto: Coeficiente de Impacto em impacto ponderado por m³ ou Quilograma.

O RCD foi calculado com base em Li *et al.* (2016), que identificaram a quantidade de material em m² e utilizaram o percentual de desperdício para prever a quantidade de resíduos gerados pela atividade, conforme Equação (4):

$$RCD = Qtd_{material}\ * IP\ (\%) \quad (4)$$

Onde:

RCD: resíduos de construção e demolição em kg;

$Qtd_{material}$: quantidade de material utilizado em m²; considerar 2 cm de espessura do revestimento.

IP: índice de perda em kg por m².

O uso de água (UA) restringiu-se aquela consumida na produção de materiais e processos construtivos. De acordo com a Equação (5), foram obtidos o uso de água e o fator cimento e a equação adaptada de Treloar (1997) e Araújo *et al.* (2020).

$$UA = \sum I_n\ \ x\ Qtd_{material\ ou\ serviço} \quad (5)$$

Onde:

UA: consumo ou uso de água em litros;

I_n:Intensidade de água em litros por kg; considerar o Fator água/cimento de 0,5;

$Qtd_{material}$: Quantidade total de material utilizado em kg.

Por fim, foi calculado o uso de energia (UE). A energia incorporada da atividade foi aquela necessária para produzir o material no processo de construção. Com base em Paulsen e Sposto (2013) e nas informações de energia incorporada fornecidas por Teodoro (2017), os autores calcularam a energia incorporada da atividade, conforme representado pelas Equações (6):

$$UE_{material} = \sum FEE_i \ x \ Qtd_{material} \quad (6)$$

Onde:

$UE_{material}$: energia embutida do material em Mj;

FEE_i: fator de energia embutido do material em Mj/kg;

$Qtd_{material}$: quantidade de material consumido em kg; considerar a densidade da argamassa de 2.100kg/m³.

O Quadro *1* foi construído para facilitar o cálculo das equações dos aspectos ambientais, composta pelos fatores de impacto ambiental, suas unidades de medida relacionadas aos seus respectivos aspectos ambientais e suas fontes de referência.

Quadro 1- Fatores de impacto ambiental

ASPECTOS AMBIENTAIS	**GEE**	**PSOLO**	**URMP**	**RCD**	**UA**	**UE**	**FONTE**
	$kgCO_2e$ /kg	%	Coeficiente de Impacto por Kg	kg/m²	adimensional	Mj/kg	
Fator de Emissão (cimento)	1,165						(Akan et al., 2017)
Fator de Emissão (areia)	0,005						(Akan et al., 2017)
Fator de Emissão (cal)	0,5						(Akan et al., 2017)
Índice de Poluição (argamassa)		0,01					(Araújo et al., 2020; Eikelboom et al., 2001)
Coeficiente de Impacto (cimento)			7,76129E-14				(Ng et al., 2017)
Coeficiente de Impacto (areia)			2,68542E-14				(Ng et al., 2017)
Coeficiente de Impacto (cal)			5,07587E-14				(Ng et al., 2017)
Índice de Perda (argamassa)				0,88			(Gusmão, 2008)
Fa/c: Fator água e cimento					0,5		(TCPO, 2010)
Fator de Energia Embutida (argamassa)						2,0	(Paulsen & Sposto, 2013)

2.2 TERMOS DO SERVIÇO

Foram selecionados os componentes de revestimento em argamassa especificados na tabela de composição de preços para orçamentos. A argamassa avaliada foi uma mistura de areia, cimento e água, semelhante ao concreto sem agregado graúdo. Essa argamassa foi uma mistura de material cimentício e agregado, geralmente agregado fino, à qual foi adicionada água suficiente para produzir uma consistência de vazamento sem segregar os constituintes (Mehta e Monteiro 2006). Os componentes dos serviços foram utilizados para identificar e descrever a quantidade de insumos (materiais, mão de obra e equipamentos) necessários para o revestimento, apresentados como unidade de serviço na TCPO (2010). O Quadro 2 apresenta os componentes da argamassa de revestimento.

Quadro 2- Composição de Preços para Revestimentos de Argamassa

09705.8.2.21 EMBOÇO para parede externa com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:6, e=20mm - unidade: m²

CÓDIGO	COMPONENTES	UNID.	CONSUMO
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,82
01270.0.45.1	Servente	h	0,41
*04060.8.1.83	Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:6	m³	0,025
COMPOSIÇÃO DETALHADA INCUINDO A PRODUÇÃO DE INSUMOS			
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,82
01270.0.45.1	Servente	h	0,66
02060.3.2.2	Areia lavada tipo média	m³	0,0305
02065.3.2.1	Cal hidratada CH III	kg	6,075
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32,00 MPa)	kg	6,075

Fonte: TCPO (2010)

Nota: Foram consideradas as densidades da argamassa, do cimento, cal e da areia de 1.900,00 kg/m³, 1.800,00 kg/m³; 1.800,00 Kg/m³ e 1.360,00 kg/m³, respectivamente. Informações extraídas do relatório de dosagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentaram a caracterização do estudo de caso, a quantificação do estudo teórico, a quantificação do estudo de caso e uma análise comparativa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Um estudo de caso foi utilizado para comparar os resultados da quantificação dos aspectos ambientais de uma composição do serviço de emboço oriunda do TCPO versus uma composição do serviço de

emboço utilizada na prática em uma obra na cidade do Recife. O Quadro 3 descreveu as informações da caracterização do estudo de caso.

Quadro 3 – Caracterização do estudo de caso

CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	
Itens	**Decrição**
Obra	Edf. DEBRET
Local	Recife/PE
Empresa	Pequno Porte
Serviço	Emboço Externo
Tipo	Obra de Revestimento
Posição	Fachada Externa Lateral Esquerda

A empresa que executou o serviço realizou uma consultoria técnica para dosagem com os seguintes ensaios: ensaio de dosagem experimental, ensaio de resistência superficial e ensaio de aderência (Placas ao Emboço). O acompanhamento do serviço em questão foi realizado na fachada externa da lateral esquerda do edifício Debret localizado na avenida boa viagem na cidade do Recife (Figura 2).

Figura 2 - Serviço de emboço do Edf. Debret

Foi elaborada uma composição do serviço de embolço de argamassa para parede externa com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:0,4:5,57, e=20mm - unidade: m², conforme descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Composição de serviço do estudo de caso

00000.0.0.00 EMBOÇO para parede externa com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:0,4:5,57, e=20mm - unidade: m²

CÓDIGO	COMPONENTES	UNID.	CONSUMO
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,82
01270.0.45.1	Servente	h	0,41
*04060.8.1.83	Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:0,4:5,57	m³	0,2436
COMPOSIÇÃO DETALHADA INCUINDO A PRODUÇÃO DE INSUMOS			
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,82
01270.0.45.1	Servente	h	0,66
02060.3.2.2	Areia lavada tipo média	m³	0,0168
02065.3.2.1	Cal hidratada CH - I	kg	1,641
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-Z-32	kg	4,108

Nota: Foram consideradas as densidades da argamassa, do cimento, cal e da areia de 1.900,00 kg/m³, 1.800,00 kg/m³; 1.800,00 Kg/m³ e 1.360,00 kg/m³, respectivamente. Informações extraídas do relatório de dosagem.

3.2 ESTUDO TEÓRICO

O Quadro *5* apresenta os resultados da quantificação dos aspectos ambientais por metro cúbico de argamassa. Assim, os gerentes de projetos podem obter informações preditivas sobre aspectos ambientais durante a fase de planejamento. Esses resultados demonstram os impactos das atividades de construção e fornecem informações importantes para eliminar, mitigar ou aceitar os aspectos ambientais.

Quadro 5 - Resultados da Quantificação dos Aspectos Ambientais

Aspectos Ambientais	Abreviação	Valor	Unidade
Gases do Efeito Estufa	GEE	10,32	$kgCO_2e$
Poluição do Solo	PSOLO	3.800,00	mg
Uso de Recurso e Matéria Prima	URMP	1,89377E-12	Impacto total
Resíduo da Construção e Demolição	RCD	0,88	kg
Uso de Água	UA	3,04	Litros
Uso de Energia	UE	76,00	Mj

Os possíveis efeitos negativos foram demonstrados pelos resultados de GEE, que indicaram emissão significativa na fabricação de materiais de construção (cimento, cal e areia), com 10,32 $kgCO_2e$, totalmente explicada pela tipificação da atividade. Os resultados do PSOLO destacaram duas atividades (produção e aplicação de argamassa) com 3.800,00 mg, devido ao tipo de atividade e poder contaminante da argamassa. O resultado do aspecto ambiental da URMP foi 1.89377E-12 impacto total. Os valores obtidos para RCD foram significativos, totalizando 0,88 kg. Com relação à UA, o total consumido no estudo teórico foi de 3,04 litros, concentrado em processos de fabricação (argamassa) que utilizaram um fator água e cimento de 0,5. O UE apresentou consumo total de energia de 72,00 Mj, sendo a energia utilizada na fabricação do material de 2,0 Mj/kg.

3.3 ESTUDO DE CASO

O Quadro *6* apresenta os resultados da quantificação dos aspectos ambientais do estudo de caso por metro cúbico de argamassa. Esses resultados demonstraram os impactos das atividades de construção e forneceram informações importantes para eliminar, mitigar ou aceitar os aspectos ambientais.

Quadro 6 - Resultados da Quantificação dos Aspectos Ambientais

Aspectos Ambientais	Abreviação	Valor	Unidade
Gases do Efeito Estufa	GEE	5,72	$kgCO_2e$
Poluição do Solo	PSOLO	3.420,00	mg
Uso de Recurso e Matéria Prima	URMP	1,14092E-12	Impacto total
Resíduo da Construção e Demolição	RCD	0,68	kg
Uso de Água	UA	4,18	Litros
Uso de Energia	UE	76,00	Mj

3.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Resultados da avaliação quantitativa ambiental do estudo teórico versus estudo de caso (Quadro *7*).

Quadro 7 – Comparação do estudo teórico versus estudo de caso

ASPECTOS AMBIENTAIS	ESTUDO TEORICO	ESTUDO DE CASO	UNIDADE
GEE	**10,32**	**5,72**	**$kgCO_2e$**
PSOLO	**3.800,00**	**3.420,00**	**mg**
URMP	**1,89377E-12**	**1,14092E-12**	**Impacto Total**
RCD	**0,88**	**0,68**	**kg**
UA	**3,04**	**4,18**	**litros**
UE	**76,00**	**76,00**	**Mj**

A comparação dos estudo ambientais foram necessárias para ajudar nas medidas de controle e redução dos impactos ambientais. Anteriormente, os especialistas avaliavam o critério de gravidade aplicando intervalos (Borja *et al.* 2018; Chen *et al.* 2000; Gangolells *et al.* 2009). Estudos anteriores utilizaram apenas um aspecto ambiental – total de partículas suspensas, poluição por metais pesados ou qualidade do ar – para calcular o critério de gravidade (Fu e Zhang 2020). Contudo, o presente estudo calculou o critério de severidade para seis aspectos ambientais e comparou uma composição de serviço teórica com uma composição de serviço utilizada no estudo de caso, eliminando assim o elemento de subjetividade (Figura 3).

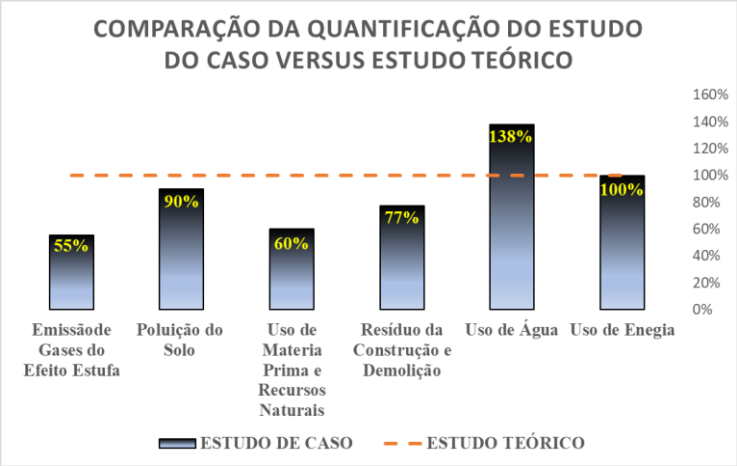


Figura 3 - Comparação da avaliação do estudo de caso com os valores de referências do estudo teórico

Os GEE foram poluidores, devido às emissões causadas pela produção do cimento utilizado na construção. Giesekam *et al.* (2014); Hall (2010); Mcpherson e Candidate (2009) reconheceram que as emissões de materiais de construção foram fontes significativas de GEE. Este aspecto ambiental impulsionou o desenvolvimento de materiais sustentáveis para a indústria da construção, a fim de reduzir as emissões, conforme relatado por Akan *et al.* (2017). A fase de projeto proporcionou uma oportunidade para os construtores usarem materiais de construção com emissões mais baixas (Sandanayake *et al.* 2019). O PSOLO demonstrou que a fabricação no local aumentou a probabilidade de infiltração de substâncias químicas no solo. Isto corrobora com Bossink e Brouwers (1996), que relataram que os elementos de concreto moldado no local eram responsáveis pela liberação de substâncias químicas no solo.

A URMP foi calculada utilizando as metodologias descritas na ISO 14040 (2001), denominada avaliação do ciclo de vida (Ng *et al.* 2017), apresentou um impacto ambiental referente a utilização de materia-prima. Este achado está de acordo com Giama e Papadopoulos (2015) e Hoxha *et al.* (2017), que observaram a relação entre o impacto ambiental do material de construção e o uso de recursos. A indústria da construção deverá optar pela racionalização, durabilidade e escolha de materiais com menores coeficientes de impacto ambiental. Para tal, a escolha dos materiais na fase de pré-construção, utilizando critérios de prevenção da poluição, redução de resíduos e energia incorporada, foram essenciais para a sustentabilidade (Hoxha *et al.* 2017). Os RCD geraram um volume em quilogramas de resíduos (solo). Gangolells *et al.* (2014) relataram que as práticas de gestão ajudam a minimizar a geração de resíduos e Li *et al.* (2016) concluíram que a quantidade substancial de resíduos produzidos compromete o desenvolvimento sustentável das cidades.

Em relação ao UA, os resultados do consumo de água previsto demonstraram a necessidade de novos processos de fabricação de materiais como alternativas sustentáveis, a fim de diminuir o consumo de água. Bardhan (2011) indicou os materiais de construção como importantes consumidores de água. De acordo com Hoeskstra *et al.* (2011), o consumo de água apresentou indicadores importantes para medir a sustentabilidade das atividades de construção. No entanto, McCormack *et al.* (2007); Waidyasekara *et al.* (2016, 2017); Waylen (2011) encontraram uma grande variação no volume utilizado em canteiros de obras, produzindo assim informações não confiáveis sobre quantidades por unidade de material. Finalmente, a UE incorporada nos materiais foi maior quando comparada com a sua congénere relacionada com os transportes, corroborando outros estudos de Paulsen e Sposto (2013); Teodoro (2017); Treloar (1997), que associaram a fabricação de materiais de construção ao aumento do consumo de energia. Por esta razão, Citherlet e Defaux (2007) sugeriram o uso de energia renovável para minimizar o consumo atual da indústria da construção.

4 CONCLUSÕES

A indústria da construção necessita melhorar o seu desempenho ambiental para produzir projetos de construção mais sustentáveis. Este artigo ilustra alguns aspectos ambientais gerados pelos materiais e pelos processos construtivos. Além disso, o diagnóstico de possíveis efeitos ambientais antes da fase de construção permite uma tomada de decisão precoce. A aplicação desta metodologia em projetos semelhantes permitirá a comparação entre o desempenho do canteiro de obras e o estabelecimento de *benchmarks* para projetos semelhantes.

Esta metodologia também pode ser implementada no futuro através do desenvolvimento de um *software* que facilite e automatize a utilização por pesquisadores e usuários que atuam na indústria da construção. Este processo poderá ampliar a utilização desta proposta com redução de tempo, complexidade e custos de análise de critérios na fase de pré-construção, além de possibilitar a criação de um benchmark capaz de classificar o desempenho ambiental dos projetos.

REFERÊNCIAS

Akan, A. M. Ö., Dhavale, D. G., & Sarkis, J. (2017). Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 1195–1207. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.225

Araújo, A. G. de, Carneiro, A. M. P., & Palha, R. P. (2020). Predictive methodology for the quantification of environmental aspects in urban infrastructures. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(18). https://doi.org/10.3390/su12187636

Banihashemi, S., Hosseini, M. R., Golizadeh, H., & Sankaran, S. (2017). Critical success factors (CSFs) for integration of sustainability into construction project management practices in developing countries. *International Journal of Project Management*, *35*(6), 1103–1119. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.01.014

Bardhan, S. (2011). Assessment of water resource consumption in building construction in India. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *144*, 93–101. https://doi.org/10.2495/ECO110081

Borja, L. C. A., César, S. F., Cunha, R. D. A., & Kiperstok, A. (2018). A quantitative method for prediction of environmental aspects in construction sites of residential buildings. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/su10061870

Bossink, B. A. G., & Brouwers, H. J. H. (1996). CONSTRUCTION WASTE: QUANTIFICATION AND SOURCE EVALUATION. *Journal of Construction Engineering and Management*, *55*, 1–6.

Chen, Z., Li, H., & Hong, J. (2004). An integrative methodology for environmental management in construction. *Automation in Construction*, *13*(5 SPEC. ISS.), 621–628. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.04.006

Chen, Z., Li, H., & Wong, C. T. C. (2000). ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF URBAN CONSTRUCTION PROJECTS IN CHINA. *Journal of Construction Engineering and Management*, *126*, 1–5.

Citherlet, S., & Defaux, T. (2007). Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. *Building and Environment*, *42*(2), 591–598. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.025

Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM), Pub. L. No. Version 14, U.S Environmantal Protection Agency 1 (2016).

Eikelboom, R. T., Ruwiel, E., & Goumans, J. J. J. M. (2001). The building materials decree: an example of a Dutch regulation based on the potential impact of materials on the environment. *Waste Management*, *21*, 295–302. www.elsevier.nl/locate/wasman

EMAS - Eco-Management and Audit Scheme, Pub. L. No. nº 1221/2009, European Parliament 1 (2009).

Fu, Y., & Zhang, X. (2020). Mega urban agglomeration in the transformation era: Evolving theories, research typologies and governance. *Cities*, *105*. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102813

Gangolells, M., Casals, M., Forcada, N., & Macarulla, M. (2014). Analysis of the implementation of effective waste management practices in construction projects and sites. *Resources, Conservation and Recycling*, *93*, 99–111. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.006

Gangolells, M., Casals, M., Gassó, S., Forcada, N., Roca, X., & Fuertes, A. (2009). A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment*, *44*(3), 558–571. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.001

Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2015). Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. *Journal of Cleaner Production*, *99*, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.006

Giesekam, J., Barrett, J., Taylor, P., & Owen, A. (2014). The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. *Energy and Buildings*, *78*, 202–214. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.035

Gusmão, A. D. (2008). *Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil* (A. D. Gusmão, Ed.; CCS Gráfica Editora, Vol. 1). CCS Editora.

Hall, J. N. (2010). Briefing: A practical initiative for the construction industry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, *163*(4), 181–183. https://doi.org/10.1680/ensu.2010.163.4.181

Hernández-Moreno, S., & Hoyos-Martínez, J. de. (2010). INDICATORS OF URBAN SUSTAINABILITY IN MEXICO. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, *7*, 1–15.

Hoeskstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual* (A. Y. Hoekstra, A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, & M. M. Mekonnen, Eds.; First). Earthscan. www.earthscan.co.uk

Hosseini, M. R., Banihashemi, S., Rameezdeen, R., Golizadeh, H., Arashpour, M., & Ma, L. (2017). Sustainability by Information and Communication Technology: A paradigm shift for construction projects in Iran. *Journal of Cleaner Production*, *168*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.200

Hoxha, V., Haugen, T., & Bjorberg, S. (2017). Measuring perception about sustainability of building materials in Kosovo. *Facilities*, *35*(7–8), 436–461. https://doi.org/10.1108/F-04-2016-0040

ISO 14004 SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL DIRETRIZES, Associação Brasileira de Normas Técnicas 1 (2005).

ISO 14040 GESTÃO AMBIENTAL - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - PRINCIPIOS E ESTRUTURA, Associação Brasileira de Normas Técnicas 1 (2001).

ISO 15392. (2008). *Sustainability in building construction-General principles Développement durable dans la construction-Principes généraux COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT*.

Johnston, A., Hutchison, J., & Smith, A. (2000). *SIGNIFICANT ENVIRONMENTAL IMPACT EVALUATION: A PROPOSED METHODOLOGY* (Vol. 7).

Li, Y., Zhang, X., Ding, G., & Feng, Z. (2016). Developing a quantitative construction waste estimation model for building construction projects. *Resources, Conservation and Recycling*, *106*, 9–20. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.001

McCormack, M., Treloar, G. J., Palmowski, L., & Crawford, R. (2007). Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research and Information*, *35*(2), 156–162. https://doi.org/10.1080/09613210601125383

Mcpherson, D. L., & Candidate, P. E. (2009). *Choice of Pipeline Material: PVC or DI Using a Life Cycle Cost Analysis*.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials* (P. K. Mehta & P. J. M. Monteiro, Eds.; Third Edition). McGraw-Hill. https://doi.org/10.1036/0071462899

Murphy, M. E., & Nahod, M. M. (2017). Stakeholder competency in evaluating the environmental impacts of infrastructure projects using BIM. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *24*(5), 718–735. https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2015-0106

Ng, T. S. T., Chan, J. H. L., Chan, G. K. C., & Zou, J. W. W. (2017). Environmental impacts of construction material production. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, *170*(3), 169–184. https://doi.org/10.1680/jensu.15.00009

Paulsen, J. S., & Sposto, R. M. (2013). A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program "MY HOUSE MY LIFE." *Energy and Buildings*, *57*, 95–102. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.014

Sandanayake, M., Zhang, G., & Setunge, S. (2019). Estimation of environmental emissions and impacts of building construction – A decision making tool for contractors. *Journal of Building Engineering*, *21*, 173–185. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.023

Sinha, A., Gupta, R., & Kutnar, A. (2013). Održivi razvoj i zelena gradnja. In *Drvna Industrija* (Vol. 64, Issue 1, pp. 45–53). https://doi.org/10.5552/drind.2013.1205

Tam, C. M., Tam, V. W. Y., & Tsui, W. S. (2004). Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong. *International Journal of Project Management*, *22*(7), 563–571. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.03.001

TCPO. (2010). *Tabelas de Composições de Preço para Orçamentos - Engenharia Civil, Construção e Arquitetura*.

Teh, S. H., Wiedmann, T., & Moore, S. (2018). Mixed-unit hybrid life cycle assessment applied to the recycling of construction materials. *Journal of Economic Structures*, *7*(1). https://doi.org/10.1186/s40008-018-0112-4

Teodoro, M. I. T. de M. (2017). *ENERGIA EMBUTIDA NA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL: CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS A PARTIR DE UM ESTUDO DE CASO EM MATO GROSSO DO SUL* [Tese]. Universidade de São Paulo.

Treloar, G. J. (1997). Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method. *Economic Systems Research*, *9*(4), 375–391. https://doi.org/10.1080/09535319700000032

Waidyasekara, K. G. A. S., De Silva, L., & Rameezdeen, R. (2016). Water use efficiency and conservation during construction: drivers, barriers and practices. *Built Environment Project and Asset Management*, *6*(5), 553–566. https://doi.org/10.1108/BEPAM-09-2015-0052

Waidyasekara, K. G. A. S., De Silva, L., & Rameezdeen, R. (2017). Application of “R” principles to enhance the efficiency of water usage in construction sites. *Built Environment Project and Asset Management*, *7*(4), 400–412. https://doi.org/10.1108/BEPAM-01-2017-0006

Waylen, C. (2011). *WATER: A progress report on reducing water use on construction sites*. http://www.bis.gov.uk/policies/business-sectors/construction/sustainable-construction

Yim, S. Y. C., Ng, S. T., Hossain, M. U., & Wong, J. M. W. (2018). Comprehensive evaluation of carbon emissions for the development of high-rise residential building. *Buildings*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/buildings8110147

Yu, W. Der, Cheng, S. T., Ho, W. C., & Chang, Y. H. (2018). Measuring the sustainability of construction projects throughout their lifecycle: A Taiwan Lesson. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/su10051523

Zhang, X., Wu, Y., Shen, L., & Skitmore, M. (2014). A prototype system dynamic model for assessing the sustainability of construction projects. *International Journal of Project Management*, *32*(1), 66–76. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.01.009

Zobel, T., & Burman, J. O. (2004). Factors of importance in identification and assessment of environmental aspects in an EMS context: Experiences in Swedish organizations. *Journal of Cleaner Production*, *12*(1), 13–27. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00167-1

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A BASALT FIBRE AND PARTIALLY BIO-BASED UNSATURATED POLYESTER RESIN COMPOSITE

Abu Toyob Shahid [a]; José Dinis Silvestre [b]; Mário Garrido [c]; João Ramôa Correia [d]

[a] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, toyobshahid@tecnico.ulisboa.pt

[b] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

[c] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt

[d] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal, joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

The increasing adoption of fibre-polymer composites across various applications, coupled with the urgency of promoting more sustainable societies and economies, has led to the development of composite materials with increasing content based on renewable feedstock in order to lower environmental impacts. However, composite materials derived from bio-based sources do not necessarily guarantee “eco friendliness”; in fact, this feature needs to be rigorously assessed through standardized tools, such as life cycle assessment (LCA). In this paper, the LCA of a fibre polymer composite developed with a partially bio-based unsaturated polyester resin (UPR) reinforced with basalt fibres has been carried out. This type of reinforcement is considered to be less harmful to the environment compared to more conventional glass fibres. The bio-based UPR has been synthesized incorporating renewably sourced chemical building blocks, namely fumaric acid as unsaturated dicarboxylic acid, and 1,3-propanediol and isosorbide as bio-based diols to completely replace oil-based counterparts in the prepolymer structure. Moreover, styrene, which is commonly used as a reactive diluent (40-50 wt.% of the resin) in conventional oil-based UPR, has been reduced (30 wt.% of the bio-based UPR) and replaced with 2-hydroxyethyl methacrylate (20 wt.% of the bio-based UPR). This composite has been manufactured using the vacuum infusion method. A cradle-to-gate system boundary has been considered in the LCA. As a benchmark, a similar study has also been conducted on a typical oil-based UPR formulation and the corresponding basalt fibre reinforced composite. This LCA has been developed following the *EN 15804:2012+A2:2019* and *Cumulative Energy Demand* methods, considering nine impact categories to obtain a holistic spectrum regarding the environmental performance of the basalt fibre-reinforced bio-composite, namely when compared with the conventional counterpart. The environmental assessment of the bio-based composite has revealed that the incorporation of renewably sourced chemical compounds led to reductions of environmental impacts compared to the conventional composite in climate change (total), ozone depletion, photochemical ozone formation, and resource use (fossils) categories, ranging from 5% to 47%. On the other hand, an inferior performance of the bio-composite has been identified in relevant impact categories, such as acidification, eutrophication, and renewable primary energy. Overall, the outcomes of this study provide valuable data towards the environmental optimization of more sustainable composite materials.

Palavras-chave: Basalt fibres; Bio-based resin; Unsaturated polyester; Fibre-polymer composites; Life cycle assessment

1 INTRODUCTION

Fibre reinforced polymer (FRP) composites are being increasingly used in diverse industries (Liu *et al.*, 2022). Currently, cost-effective FRPs are widely produced from oil-based polymer matrices, such as vinyl ester resin, unsaturated polyester resin (UPR), and synthetic glass fibres as reinforcement. The growing concern regarding global warming and climate change has led to the adoption of sustainable approaches for FRP production. In this context, currently available alternatives for oil-based matrices include polymers derived from bio-based resources. Moreover, basalt fibres are considered to be a more sustainable synthetic fibre reinforcement with respect to the conventional glass fibres. Therefore, eco-friendlier FRPs can be produced from bio-based polymer reinforcing basalt fibres.

Several studies have been conducted to develop bio-based polymers (e.g., González *et al.*, 2018; Suriano *et al.*, 2021; Hofmann *et al.*, 2022a,b). In addition, the potential of using basalt fibres in FRPs has also been largely demonstrated (e.g., Dhand *et al.*, 2015; Lebedev *et al.*, 2020; *Liu et al.*, 2022). In our previous study (Hofmann *et al.*, 2022a), partially bio-based UPRs have been synthesized and FRP composites have been successfully developed with reinforcing glass (Hofmann *et al.*, 2022c), basalt (Shahid *et al.*, 2023), and carbon fibres (Hofmann *et al.*, 2023).

Developing materials from renewable sources does not necessarily assure their sustainability; this needs to be assessed rigorously through life cycle assessment (LCA) method. It is worth mentioning that, although LCA is a data-intensive tool, the LCA data regarding bio-based polymers and basalt fibres is very scarce. The few studies available regarding the LCA of bio-based polymers (González *et al.*, 2018; Suriano *et al.*, 2021; Shahid *et al.*, 2024) showed environmental advantages of renewably sourced polymers in different impact categories compared to oil-based counterparts, such as in climate change and non-renewable primary energy. Regarding the LCA of basalt fibres, only a handful of studies have assessed their environmental impacts; these studies dealt only with the generic input to the production process such as raw materials and energy, excluding the emissions to air, water, and soil (Inman *et al.*, 2017; Fořt *et al.*, 2021). Moreover, the Ecoinvent (2021) database only includes a process pertaining to quarry mining of basalt rock. Therefore, a complete environmental assessment of basalt fibre production process is lacking in the literature and databases. Furthermore, according to the authors' best knowledge, no LCA study has been published to date regarding bio-resin based FRP composites reinforced with basalt fibres.

Based on the research gaps found in the brief literature review presented above, the objective of this work is to assess the environmental profile of a basalt fibre reinforced polymer (BFRP) composite manufactured through the vacuum infusion process with partially bio-based UPR (synthesized in-house). Additionally, impact assessment methods, namely *EN 15804:2012 + A2:2019* (CEN/TC, 2019) and *Cumulative Energy Demand (CED)* (Frischknecht *et al.*, 2015) have been implemented within a cradle-to-gate system boundary and a comprehensive number of impact categories were considered in order to obtain a holistic environmental assessment of the bio-based BFRP composite material. The results are compared with those of a reference BFRP developed with an oil-based UPR.

2 MATERIAL

As mentioned, a partially bio-based UPR has been developed in which the polymer chain has been synthesized incorporating renewably sourced unsaturated fumaric diacid, 1,3-propanediol, and isosorbide to replace partially (diacid) and completely (diols) oil-based counterparts. Additionally, carcinogenic styrene, which is commonly used (approximately 40-50% of resin weight) in UPRs as reactive diluent, has been reduced (30 wt. % of resin) and replaced with 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) (20 wt. % of resin). The details of the resin polymer chain are provided in Hoffman *et al.*

(2022a). As a benchmark for comparison, an orthophthalic oil-based typical UPR composition has been obtained from Jones (2017).

Both the bio- and oil-based BFRP have been developed keeping a similar sequence of basalt fibre mats. A combination of seven basalt fibre mats has been used, including five layers of unidirectional (0°) (U) mats (stitched) and two layers of bi-directional (0°/90°) (B) mats, with the following sequence: [U/U/B/U/B/U/U]. The areal weights were 550 g/m^2 (0°: 500 g/m^2 – 90°: 50 g/m^2) and 940 g/m^2 (50% in weft and 50% in warp directions) respectively for the unidirectional and bi-directional fibre mats. The fibres were sized with silane (0.4-0.6%). The density of the filament without sizing is 2.67 kg/m^3. To manufacture the BFRP composites, a vacuum infusion process has been used in which the pressure in the vacuum pump was maintained at around 0.9 bar at room temperature. In each batch, a 1 m^2 BFRP plate has been produced with a thickness of around 4 mm. After curing the BFRP plate at room temperature for 48 hours, it was post-cured at 100°C for 4 hours in a thermal chamber.

The initial short-term performance of the bio-BFRP was found to be comparable to that of the reference oil-based counterpart (Shahid *et al.*, 2024), and research related to their durability assessment in various environments (hygrothermal, natural outdoor weathering, freeze-thaw and thermal cycles) is underway. This LCA study considers the bio- and oil-based composites as being functionally equivalent owing to their initial comparable performance; durability and lifetime related aspects are not yet considered here.

3 LCA OF BFRP COMPOSITE

3.1 OVERVIEW OF LCA

As mentioned, the goal of the LCA study was to assess the environmental impacts of the BFRP composite developed with a partially bio-based UPR and compare them with that of a conventional BFRP incorporating oil-based UPR, following *ISO 14040: 2006* (ISO, 2006a) and *ISO 14040: 2006* (ISO, 2006b). These impacts have been assessed in a cradle-to-gate system boundary, which encompasses the extraction and processing of raw materials, processing of secondary input of material (e.g. recycling), transport to manufacturer, and manufacturing as part of the product stage. The subsequent stages of the life cycle of the BFRP were not included in this study as it is an intermediate product that can be used in a wide range of applications. Hence, instead of a traditional functional unit, a declared unit of 1 m^2 of BFRP plate has been used in this study. The inventory of the material input to the BFRP manufacturing process has been developed based on the declared unit. Specialized LCA software, *SimaPro* (PRe', 2023), has been used to simulate this process.

3.2 SYSTEM BOUNDARY

Figure 1 entails the system boundaries of: (a) bio-based UPR, and (b) oil-based UPR, where raw material extraction, and processing of chemical compounds, followed by transportation to the UPR synthesis plant have been considered. In the case of bio-UPR, agricultural activity associated to the bio-based building blocks has been included in the system boundary. Additionally, the system boundary of continuous basalt fibre production is depicted in Figure 2, which considers basalt rock mining operation, transportation to basalt fibre's production facility, as well as all the processes involved in producing continuous basalt fibres, followed by transportation to the BFRP production site. Finally, Figure 3 displays the BFRP manufacturing process using the vacuum infusion technique, encompassing the production and transportation of the UPRs and the basalt fibres, energy consumption,

consumables used in the vacuum infusion process, and process wastes generated during the BFRP production.

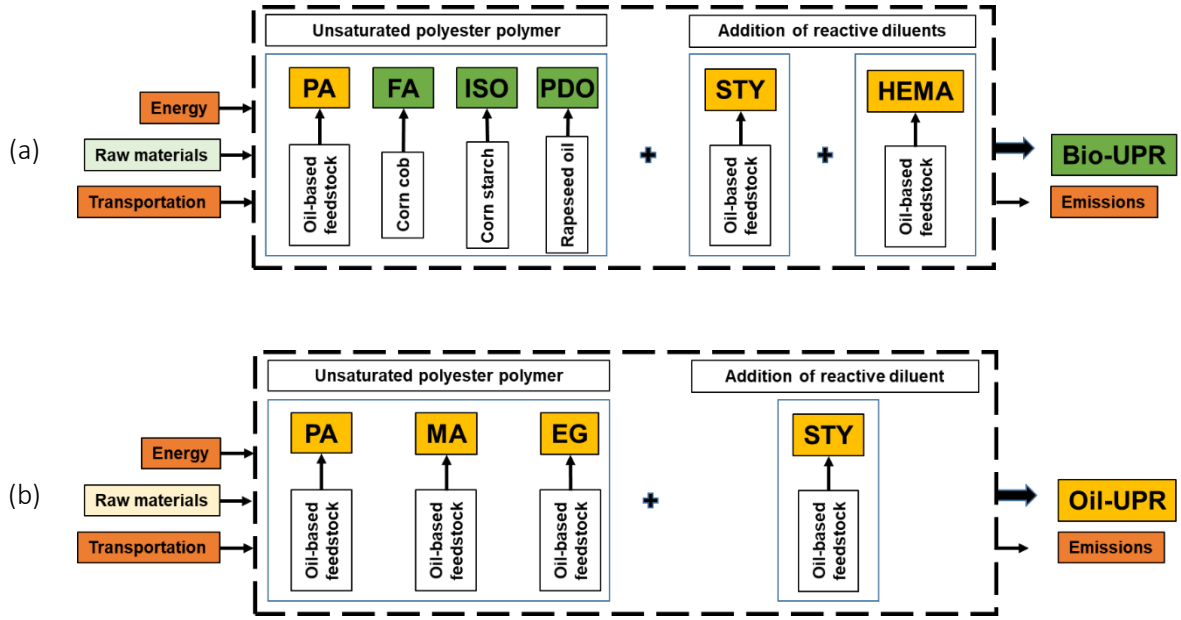


Figure 1: Flow chart for the synthesis of (a) bio-based, and (b) oil-based UPRs (PA: phthalic anhydride; FA: fumaric acid; ISO: isosorbide; PDO: 1,3-propanediol; STY: styrene; HEMA: 2-hydroxyethyl methacrylate; MA: maleic anhydride; EG: ethylene glycol).

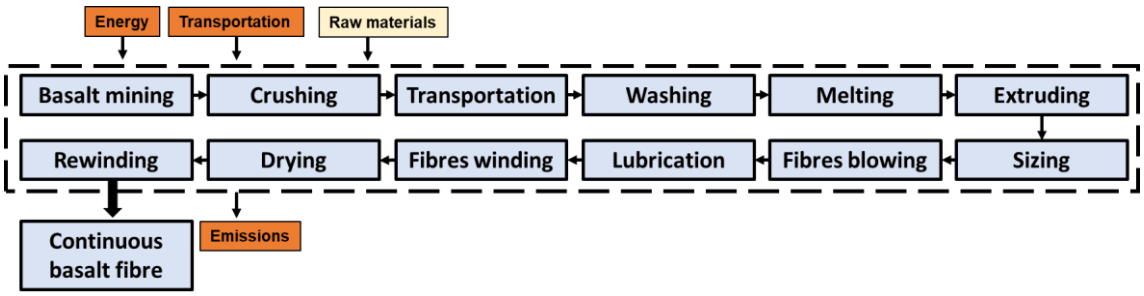


Figure 2: Flow chart for the synthesis of (a) bio-based, and (b) oil-based UPRs.

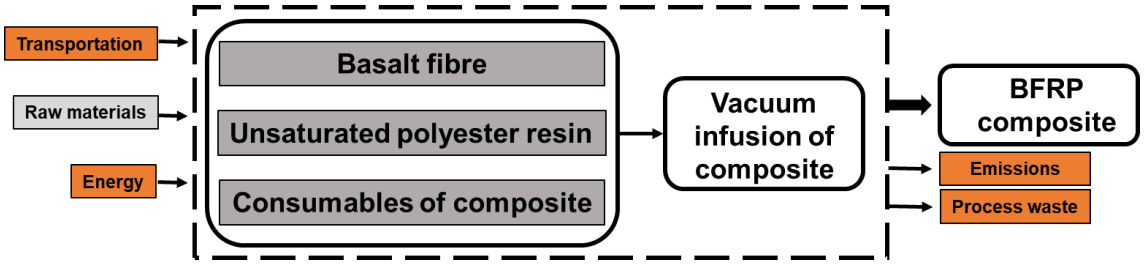


Figure 3: System boundary of BFRP composite production.

3.3 INVENTORY OF DATA

The inventory of the bio-based UPR synthesis process is provided in Table 1, and that of conventional UPR is provided in Table 2; both have been developed for 1 kg of resin synthesis. In Table 3, an inventory of continuous basalt fibre production (1 kg) process is given. Moreover, the inventory of bio- and oil-based BFRP is provided respectively in Table 4 and Table 5 for the production of 1 m^2 of composite laminate. Consumables and waste of vacuum infusion process together with their

treatment strategy are mentioned in Table 6. The data corresponding to the required chemicals and processes have been obtained from different databases, such as Ecoinvnet (2021), European Life Cycle Database (ELCD, 2018), and U. S. Life Cycle Inventory Database (USLCI, 2015), as well as related technical literature. However, while selecting the processes, Ecoinvent (2021) was preferred, and other databases and technical literature were used only when the required data were not available there. Moreover, data pertaining to the European region (RER) has always been considered whenever found available. In case of unavailability, global average (GLO) data has been selected. Similarly, average transportation distance has also been considered for chemical products and fibres representative of the European region. Both the bio- and oil-based BFRP composites required identical amounts of electric energy (0.65 kWh) to run the vacuum pump, which was selected from the average of medium voltage electricity production in the European region. Furthermore, the consumables and waste produced during the BFRP production (Table 6) were included in the vacuum infusion process while modelling it in *SimaPro* (PRe', 2023), and the landfilling process was adopted as the waste treatment strategy. It is also worth noting that some of the required processes were not found in the databases. Therefore, assumptions have been made based on the technical literature and the corresponding processes have been modelled in *SimaPro* (PRe', 2023). A brief description of these assumptions is provided in the following section.

3.4 ASSUMPTIONS

The life cycle inventory (LCI) of bio-based fumaric acid production has been assumed from maleic anhydride synthesis, which is processed from renewably sourced furfural (Blanco *et al.* 2022; Schoppe *et al.* 2020). This assumption is justified as fumaric and maleic acids are isomers of butanedioic acid and have a similar molecular weight (Suarez-Luque *et al.,* 2003), and the LCI information regarding the bio-based fumaric acid was not available in the LCA databases. Furthermore, cornstove was used as a raw material for furfural production with an economic allocation of 28.8% based on the literature (Win, 2005) and market price (December, 2022) of the by-products.

The inventory of 1,3-propanediol has been obtained from (Stegmann, 2014), where rapeseed oil-based glycerine was used as feedstock.

In the case of isosorbide, an inventory of sorbitol (precursor of isosorbide) (Akmalina, 2019) has been assumed, which is produced from lignocellulosic biomass (Brandi *et al.*, 2020). Additionally, the inventory has been adapted for 1.67 kg of sorbitol production, as this amount is needed to produce 1 kg of isosorbide (Casoni *et al.*, 2020).

According to Curtis (2019), HEMA is synthesized from methacrylic acid (MA) and ethylene oxide (EO). Therefore, the LCI of the HEMA production process has been obtained from the inventory of MA and EO with their respective ratio of 1 to 1.1. Moreover, selectivity of HEMA production and purity were also considered, which are respectively 91.8 wt. % and 99.9 wt. % (Curtis 2019). Regarding the HEMA production process, no components other than MA and EO were considered due to the lack of corresponding data.

The energy consumption and emission for the UPR synthesis process (for both bio- and oil-based) have been obtained from an industrial UPR synthesis process (Ecoinvent, 2021) for 1 kg of resin production. As the synthesis process of bio-based UPR is similar to that of oil-based UPR, it is reasonable to assume a similar process for both.

The process related to basalt fibre production process has been developed from (Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021). The basalt rock mining process was obtained from Ecoinvent (2021), while other

process inputs have been developed based on Fořt *et al.* (2021). However, emissions from the basalt fibre production process were not considered in the assessment, as this information was not available in the databases nor in literature.

Table 1. Inventory of the synthesis process for 1 kg of bio-based UPR production.

Input	Source	Quantity (g/kg resin)	References
Phthalic anhydride (saturated diacid)	Oil-based	90.2	(Ecoinvent, 2021)
Fumaric acid (unsaturated diacid)[a]	Corn cob	213.4	(Win, 2005; USLCI, 2015; Schöppe *et al.*, 2020; Ecoinvent, 2021; Blanco *et al.*, 2022)
1,3-propanediol (aliphatic glycol)	Rapeseed oil	137.3	(Stegmann, 2014; ELCD, 2018; Ecoinvent, 2021)
Isosorbide (aromatic glycol)[b]	Maize	131.8	(USLCI, 2015; Akmalina, 2019; Brandi *et al.*, 2020; Casoni *et al.*, 2020; Ecoinvent, 2021)
Hydroquinone (inhibitor)	Oil-based	0.12	(Ecoinvent, 2021)
Toluene hydroquinone (inhibitor)	Oil-based	0.12	(Ecoinvent, 2021)
Imidazole (catalyst)	Oil-based	1.18	(Ecoinvent, 2021)
Styrene (reactive diluent)	Oil-based	300.0	(Ecoinvent, 2021)
HEMA (reactive diluent)[c]	Oil-based	200.0	(Curtis, 2009; Ecoinvent, 2021)
UPR synthesis process	-		(Ecoinvent, 2021)
A/G[d]	48:52		

a: considering data from bio-based maleic anhydride; b: considering data from bio-based sorbitol; c: considering data from ethylene oxide and methacrylic acid; d: A/G represents the molar ratio of diacids and glycols.

Table 2: Inventory of the synthesis process for 1 kg of oil-based UPR production.

Input	Source	Quantity (g/kg resin)	References
Phthalic anhydride (saturated diacid)	Oil-based	201.6	(Ecoinvent, 2021)
Maleic anhydride (unsaturated diacid)	Oil-based	268.5	(Ecoinvent, 2021)
1,2-propanediol (aliphatic glycol)	Oil-based	341.6	(Ecoinvent, 2021)
Hydroquinone (inhibitor)	Oil-based	0.28	(Ecoinvent, 2021)
Imidazole (catalyst)	Oil-based	1.42	(Ecoinvent, 2021)
Styrene (reactive diluent)	Oil-based	388.0	(Ecoinvent, 2021)
UPR synthesis process	-		(Ecoinvent, 2021)
A/G	48:52		

Table 3: Inventory of continuous basalt fibre production (1 kg).

Input	Quantity	References
Basalt rock mining	1.4 kg	(Ecoinvent, 2021)
Silicone (sizing)	0.004 kg	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Water	0.75 kg	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Lubricating oil	0.0021 kg	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Electricity	0.0012 MWh	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Natural gas	0.0125 GJ	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Diesel	0.0124 L	(Fořt *et al.*, 2021; Ecoinvent, 2021)
Factory	4,0E-10 p	(Ecoinvent, 2021)

Table 4: Inventory of bio-based BFRP (1 m^2 of composite laminate).

Input	Quantity (g/m^2)	References
Basalt fibre	4630	Table 3
Bio-based UPR	2044	Table 1
Methyl ethyl ketone peroxide (curing initiator)	40	Not considered
Cobalt octoate (curing promoter)	20	Not considered

Table 5: Inventory of oil-based BFRP (1 m^2 of composite laminate).

Input	Quantity (g/m^2)	References
Basalt fibre	4630	Table 3
Oil-based UPR	2044	Table 2
Methyl ethyl ketone peroxide (curing initiator)	40	Not considered
Cobalt octoate (curing promoter)	20	Not considered

Table 6: Inventory of consumables and waste produced in the vacuum infusion process (1 m^2 composite laminate).

Consumables or waste materials	Quantity (g/m^2)	Databases	Waste treatment
Basalt fibre	231.5	Table 3	Landfill
Bio-based or Oil-based UPR	102.2	Table 1	Landfill
T-junction (low-density polyethylene)	5.2	Ecoinvent, 2021	Landfill
Inlet (high-density polyethylene)	51.4	Ecoinvent, 2021	Landfill
Outlet (high-density polyethylene)	43.0	Ecoinvent, 2021	Landfill
Sealant (seal, natural rubber)	250.0	Ecoinvent, 2021	Landfill
Releasing wax (naphtha)	130.0	Ecoinvent, 2021	Landfill
Peel ply (polyamide)	193.6	Ecoinvent, 2021	Landfill
Vacuum plastic (polypropylene)	125.0	Ecoinvent, 2021	Landfill
Pipe (low-density polyethylene)	83.3	Ecoinvent, 2021	Landfill
Spiral pipe (low-density polyethylene)	33.6	Ecoinvent, 2021	Landfill
Valve (low-density polyethylene)	9.8	Ecoinvent, 2021	Landfill

3.5 IMPACT ASSESSMENT METHODS AND CATEGORIES

As mentioned, the environmental impact derived from the BFRP production process has been assessed using the *EN 15804:2012 + A2:2019* (CEN/TC, 2019) method through the selection of the following impact categories: climate change, total (CCT); ozone depletion (OD); photochemical ozone formation (PCOF); acidification (AC); eutrophication, freshwater (EFW); eutrophication, terrestrial (ET); resource use, fossil (RUF); and resource use, minerals and metals (RUMM). Additionally, renewable primary energy (RPE) consumption related to extraction and manufacturing of raw materials has been estimated through the *Cumulative Energy Demand (CED)* (Frischknecht *et al.*, 2015) method.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 ENVIRONMENTAL IMPACT OF BIO-BASED BFRP

Figure 4 depicts the environmental profile of the bio-based BFRP through the selected impact categories. It can be noticed that the partially bio-based UPR is dominating in six out of nine impact categories, namely in AC, EFW, ET, RUF, RUMM, and RPE, with respectively 66%, 53%, 73%, 40%, 57%, and 81%. In other impact categories it also has significant impact, ranging between 20% to 30%. Being

derived from renewably sourced chemical compounds, as shown in Table 1, explains the highest impact of bio-UPR on AC, EFW, ET, and RUMM impact categories, which is related to the fertilizers and chemicals used during biomass cultivation. Additionally, being synthesized from bio-based components results in having relevant impact in RPE category. The partially bio-based UPR also contains oil-based chemical compounds, such as styrene and HEMA in its composition; the impact on RUF is mainly derived from the use of these oil-derived chemicals.

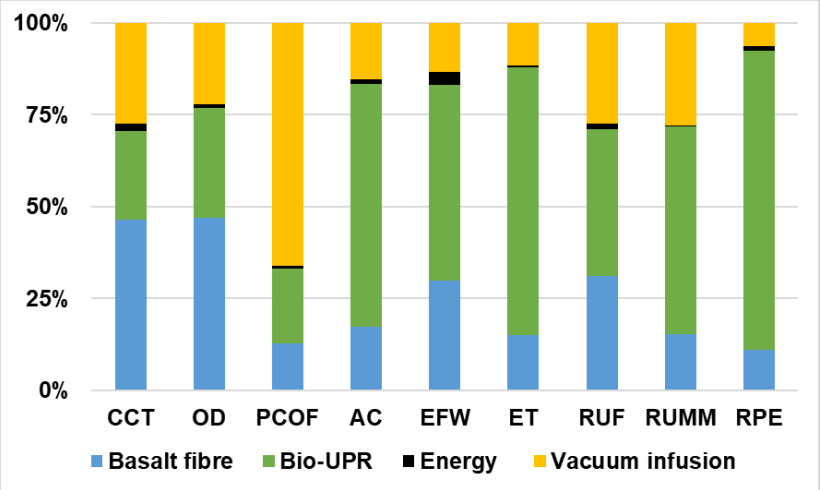


Figure 4: Environmental profile of bio-based BFRP.

Apart from the bio-UPR, basalt fibres have the maximum contribution in CCT and OD, with 47% impact in each category. Additionally, they also have a noticeable impact on EFW and RUF, with around 30%. As depicted in Table 3, the processing of basalt fibres requires fossil fuels to meet energy demand, as well as other chemical derivatives, such as lubricants, resulting in relevant impact on CCT, OD, EFW, and RUF.

The vacuum infusion process has the highest impact on PCOF (66%), with a substantial footprint in CCT, OD, RUF, and RUMM, varying between 20% to 30%. The inclusion of the consumables and waste in the vacuum infusion process resulted in the highest impact in PCOF and a relatively significant impact in the other mentioned impact categories.

4.2 ENVIRONMENTAL IMPACT OF OIL-BASED BFRP

The environmental profile of the conventional BFRP is represented in Figure 5, which depicts a different spectrum compared to that of the bio-BFRP shown in Figure 4. It can be noticed that in the conventional BFRP, oil-UPR is found to be dominating in five categories out of nine: CCT (48%), OD (60%), AC (49%), ET (43%), and RUF (48%), while having a significant impact in EFW (35%), RPE (33%), and PCOF (24%) impact categories. The impact of oil-based UPR in these categories are mainly associated with the petrochemical processes, since this resin is synthesised from fossil fuel-derived chemical compounds (Table 2).

In the oil-based BFRP, basalt fibres have the maximum impact in EFW (43%) and RPE (50%), together with a notable footprint in CCT (33%), OD (25%), AC (27%), ET (35%), RUF (27%), and RUMM (24%). The discussion in the previous section regarding the impact of basalt fibres in EFW, CCT, OD, and RUF categories also holds here. Additionally, the impact in AC and ET categories is mainly derived from the heat and energy consumption by the basalt fibres processing, which also consumes a significant amount of renewably sourced energy resulting in the highest impact in the RPE category. Furthermore,

silicone, which is used as a sizing material of basalt fibres, causes the related impact in the RUMM category.

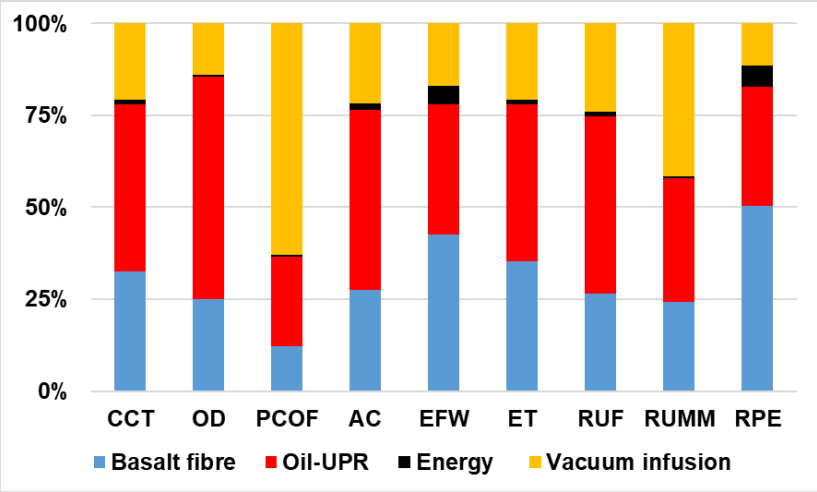


Figure 5: Environmental profile of conventional BFRP.

The vacuum infusion process has the highest impact on PCOF and RUMM with contributions of respectively 63% and 42%. It also has a substantial effect on CCT (21%), AC (22%), ET (21%), and RUF (24%). As mentioned, considering wastes and consumables from the BFRP production within the vacuum infusion process has resulted in impacts in the above-mentioned categories.

4.3 COMPARISON OF CONVENTIONAL AND BIO-BASED BFRP

Figure 6 compares the environmental profiles of the bio- and oil-based BFRP. It is evident that the bio-

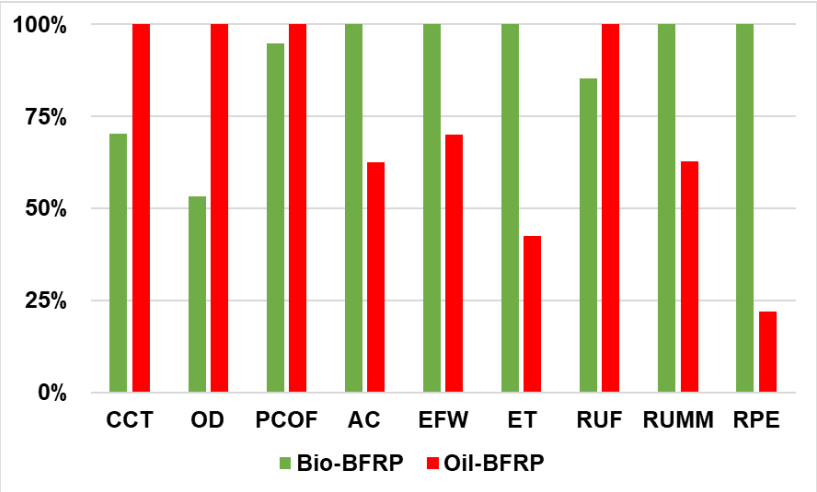


Figure 6: Comparison of the environmental profiles of conventional and bio-based BFRP composites.

BFRP has better environmental performance over the conventional BFRP in categories CCT, OD, PCOF, and RUF, causing a respective reduction of 30%, 47%, 5%, and 15% compared to the oil-based BFRP. This reduction in environmental impact is mainly derived from the adoption of bio-based UPR, as the fibre architecture is similar in both composites. On the other hand, the BFRP composite developed from bio-based UPR has an inferior environmental performance over the oil-based counterpart in impact categories AC (+37%), EFW (+30%), ET (+68%), RUMM (+37%), and RPE (+88%). This inferior

performance of the bio-BFRP is found in the impact categories which are related to the use and consumption of renewably sourced chemical compounds.

5 CONCLUSION

In this study, a cradle-to-gate life cycle assessment (LCA) has been conducted on a basalt fibre reinforced polymer (BFRP) composite developed with a partially bio-based unsaturated polyester resin (UPR) produced by vacuum infusion.

The results obtained show that the bio-BFRP has an environmental advantage over the oil-based BFRP in climate change, total (CCT); ozone depletion (OD); photochemical ozone formation (PCOF); and resource use, fossil (RUF) impact categories, having a reduction from 5% to 47% in environmental impact. The use of bio-based UPR has resulted in such improved environmental performance of the bio-BFRP, as both BFRP composites have identical fibre architecture. On the contrary, the bio-BFRP exhibited inferior performance in acidification; eutrophication, freshwater (EFW); eutrophication, terrestrial (ET); resource use, minerals and metals (RUMM); and renewable primary energy (RPE) categories, which is related to the use and consumption of renewably sourced chemical compounds.

In both composites, basalt fibres are found to have significant impact in several categories, such as CCT, OD, EFW, and RPE, ranging between 25% and 50%, which is mainly derived from the energy consumption during basalt fibre production. Additionally, the vacuum infusion process has a maximum impact in PCOF and this is due to the attribution of waste produced during manufacturing of BFRP to this process.

Overall, the results reported in this study can be used to develop more sustainable FRP composite materials.

ACKNOWLEDGEMENT

The first author gratefully acknowledges the financial support from Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), through PhD scholarship 2022.14149.BD. Additionally, the financial support from FCT through research project PTDC/ECI-EGC/29597/2017 (EcoComposite) is also gratefully acknowledged. Moreover, the authors are also grateful for FCT's funding through the research unit CERIS (project UIDB/04625/2020, doi.org/10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERENCES

Akmalina, R. (2019). Environmental impacts evaluation of sorbitol production from glucose. *Eksergi*, 16(1), 7-12.

Blanco, J., Linares, M., López Granados, M., Agirre, I., Gandarias, I., Arias, P.L., Iglesias, J., Moreno, J. and García, A. (2022). Integrated Environmental and Exergoeconomic Analysis of Biomass-Derived Maleic Anhydride. *Advanced Sustainable Systems*, 6(9), p.2200121.

Brandi, F., Khalil, I., Antonietti, M., Al-Naji, M. (2020). Continuous-Flow Production of Isosorbide from Aqueous-Cellulosic Derivable Feed over Sustainable Heterogeneous Catalysts. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(2), 927-935.

Casoni, A. I., Ramos, F. D., Estrada, V., & Diaz, M. S. (2020). Sustainable and Economic Analysis of Marine Macroalgae Based Chemicals Production - Process Design and Optimization. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122792.

CEN/TC 350 (2019). Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Product. EN 15804:2012+A2:2019. *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.*

Curtis, M. A. (2009). *U.S. Patent Application* No. 12/070,507.

Ecoinvent (2021). *Swiss Centre for Life Cycle Inventories* [database], Version 3.8.

ELCD (2018). *European Life Cycle Database* [database], Version 3.2.

Fořt, J., Kočí, J., Černý, R. (2021). Environmental efficiency aspects of basalt fibers reinforcement in concrete mixtures. *Energies*, 14(22), p.7736.

Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knopfel, S., Lützkendorf, T., Balouktsi, M. (2015). Cumulative Energy Demand in LCA: The Energy Harvested Approach. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 957–969.

González, M.N.G., Börjesson, P., Levi, M., Turri, S. (2018). Development and Life Cycle Assessment of Polyester Binders Containing 2,5-Furandicarboxylic Acid and Their Polyurethane Coatings. *J. Polym. Environ*, 26, 3626–3637.

Hofmann, M.A., Shahid, A.T., Garrido, M., Ferreira, M.J., Correia, J.R., Bordado, J.C. (2022a). Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 10, 3442–3454.

Hofmann, M., Garrido, M., Machado, M., Correia, J.R., Bordado, J.C. (2022b). Development of High-Performance Partially Biobased Thermoset Polyester Using Renewable Building Blocks from Isosorbide, 1,3-Propanediol, and Fumaric Acid. *J. Appl. Polym. Sci.*, 139, e53029.

Hofmann, M., Shahid, A.T., Machado, M., Garrido, M., Bordado, J.C., Correia, J.R. (2022c). GFRP Biocomposites Produced with a Novel High-Performance Bio-Based Unsaturated Polyester Resin. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 161, 107098.

Hofmann, M., Machado, M., Shahid, A., Dourado, F., Garrido, M., Bordado, J.C., Correia, J.R. (2023). Pultruded Carbon Fibre Reinforced Polymer Strips Produced with a Novel Bio-Based Thermoset Polyester for Structural Strengthening. *Compos. Sci. Technol.*, 234, 109936.

Inman, M., Thorhallsson, E.R., Azrague, K. (2017). A Mechanical and Environmental Assessment and Comparison of Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) Rebar and Steel Rebar in Concrete Beams. *Energy Procedia*, 111, pp.31-40.

ISO (2006a). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. ISO 14040: 2006. *International Standard Organisation (ISO)*.

ISO (2006b). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. ISO 14044: 2006. *International Standard Organisation (ISO)*.

Jones, F.R. (2017). Unsaturated polyester resins. Brydson's Plastics Materials. *Elsevier*, pp. 743–772.

Liu, H., Yu, Y., Liu, Y., Zhang, M., Li, L., Ma, L., Sun, Y., Wang, W. (2022). A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids. *Polymers*, 14, 2376.

PRe´ Sustainability B.V. (2023). SimaPro| LCA Software for Informed-Change Makers.

Schöppe, H., Kleine-Möllhoff, P., Epple, R. (2020). Energy and Material Flows and Carbon Footprint Assessment Concerning the Production of HMF and Furfural from a Cellulosic Biomass. *Processes*, 8(1), 119.

Shahid, A.T., Hofmann, M., Garrido, M., Correia, J.R., Rosa, I.C. (2023). Freeze-Thaw Durability of Basalt Fibre Reinforced Bio-Based Unsaturated Polyester Composite. *Materials*, 16(15), p.5411.

Shahid, A. T., Silvestre, J. D., Hofmann, M., Garrido, M., Correia, J. R. (2024). Life Cycle Assessment of an Innovative Bio-Based Unsaturated Polyester Resin and Its Use in Glass Fibre Reinforced Bio-Composites Produced by Vacuum Infusion. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140906.

Stegmann, P. H. (2014). The Environmental Performance of Biobased 1,3-Propanediol Production from Glycerol Compared to Conventional Production Pathways - A Life Cycle Assessment. Master's thesis, *Universiteit Utrecht*, Netherland.

Suárez-Luque, S., Mato, I., Huidobro, J. F., Simal-Lozano, J., García-Monteagudo, J. C. (2003). Different Forms of Maleic and Fumaric Acids (Cis and Trans of 2-Butenedioic Acid) In Honey. *Food chemistry*, 80(2), 215-219.

Suriano, R., Gonzalez, M.N.G., Turri, S. (2021). Environmental Profile and Technological Validation of New High-Tg Unsaturated Polyesters from Fully Bio-Based Monomers and Reactive Diluents. *J. Polym. Environ*, 29, 1122–1133.

USLCI (2015). U.S. Life Cycle Inventory Database. *National Renewable Energy Laboratory* [database].

Win, D. T. (2005). Furfural-gold from garbage. *Au J. Technol*, 8(4), 185-190.

Tema 5. Física das construções e edifícios saudáveis

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INVESTIGAÇÃO DAS TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DA DEGRADAÇÃO EM FACHADAS DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Ana Luiza Rocha de Souza [a]; Maykon Vieira Silva [b]; Matheus da Silva Souza [c]; Thália R. de Lima Meneses Romeiro[d]; Elton Bauer [e]

[a] Pós-graduanda, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: luiza31souza@gmail.com

[b] Pós-graduando, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: eng.maykonsilva@gmail.com

[c] Pós-graduando, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: matheus.engcv@outlook.com

[d] Pós-graduanda, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: thaliajan@hotmail.com

[e] Docente, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: elbauerlem@gmail.com

RESUMO

As fachadas são responsáveis por desempenhar importantes funções relacionadas ao desempenho e durabilidade das edificações. A degradação das fachadas é influenciada diretamente pela ação dos agentes e mecanismos que provocam alterações nas características químicas e físicas dos materiais. O processo de degradação acontece de forma diferenciada e específica, não se manifestando de forma homogênea nas fachadas. A degradação depende de fatores como grau de exposição aos agentes, qualidade de materiais e processos construtivos. Avalia-se a possibilidade de identificar as tendências de comportamento de degradação de fachadas em revestimento cerâmico em função dos andares das edificações. Propõe-se investigar a degradação de fachadas em 6 edifícios de diferentes idades localizados na cidade de Brasília - Brasil, baseando-se em indicadores de degradação. Observa-se que a ocorrência da degradação tende a não homogeneidade, onde há diferença da degradação entre os pavimentos da edificação, principalmente em relação a sua idade. Diante da complexidade do processo de degradação que acomete fachadas é necessário promover a resolução dos problemas decorrentes da degradação por meio de medidas corretivas. Só é possível arbitrar sobre as melhores medidas e métodos de reparo quando se tem um conhecimento aprofundado dos fenômenos e variáveis envolvidos no processo de degradação.

Palavras-chave: degradação; fachadas; revestimento cerâmico; comportamento; andares.

1 INTRODUÇÃO

As fachadas fazem parte do envelope da edificação, estando posicionadas na superfície externa, desempenhando a função de proteger o ambiente interno da ação do intemperismo e dos agentes climáticos (Souza, 2019; Morgado *et al*., 2021). Além da função de proteção do edifício contra as intempéries, as fachadas precisam ser sistemas edificados duráveis, como uma exigência necessária na construção de edifícios, visando garantir segurança, conforto dos seus usuários e estética (Oliveira, 2009; Amorim *et al*., 2014; Biseniece *et al.,* 2018; Souza, 2019).

Por sua elevada exposição, existem diversos agentes de degradação atuantes, principalmente de origem climática, que podem culminar no surgimento e desenvolvimento de anomalias (Souza, *et al.,* 2024). Os agentes de degradação alteram de diversas formas e intensidades as propriedades dos materiais e dos elementos. A radiação solar, a temperatura, a chuva dirigida e o vento podem ser considerados como os principais agentes responsáveis pela degradação (Jernberg *et al*., 2004; Cavalagli *et al*., 2019; Duarte, 2020; Galvão 2020). Os agentes possibilitam a ocorrência de mecanismos específicos que incrementam o processo de degradação. Os mecanismos de degradação podem agir isolados ou de forma sinérgica, atuando de diferentes modos, simultâneas ou sequenciais. A ação sinérgica dos mecanismos é exemplificada pelos efeitos dos ciclos de molhagem e secagem atuando sobre o desenvolvimento de cristalização de sais e descolamento de revestimentos (Bauer, Souza, Mota, 2021).

As particularidades construtivas e as condições de exposição da envoltória do edifício fazem parte de um conjunto de fatores que podem contribuir para a redução do desempenho, afetando a degradação e a vida útil do elemento ou sistema (Freitas *et al.,* 2013; Kazmierczak *et al.,* 2016; Souza *et al.,* 2022). Os elementos construtivos passam por um processo de degradação, no decorrer do tempo, relacionada principalmente com as condições de exposição ao ambiente e aos agentes e mecanismos de degradação (ISO 15686-10; CIB 295, 2004; Dias *et al*., 2014). Um mecanismo pode envolver mais de uma ação de degradação, ou mesmo, mais de um agente de degradação. As ações e os agentes em muitos casos aumentam a sua complexidade e tornam sua identificação difícil (Cóias, 2007; Flores-Colen, 2009; Santos, 2018).

Investigações voltadas à degradação em fachadas são essenciais para maior vida útil e devem ser periódicas e constantemente atualizadas, uma vez que surgem novas abordagens, novas necessidades e novos desafios em relação aos mecanismos de degradação (Bauer *et al*., 2020). Mensurar a degradação possibilita várias aplicações práticas na construção civil. Pode ser usada para aferir condições de vida útil, quantificar danos, observar gravidade, e definir operações de manutenção preditiva ou corretiva de acordo com a necessidade de cada edificação (Bauer e Souza, 2022). Existem vários métodos que quantificam a degradação da fachada com o uso de metodologias que utilizam indicadores geralmente associados a levantamentos de áreas degradadas por diferentes anomalias (Galbusera *et al.*, 2014; Magos *et al.* 2016; Prieto *et al*. 2018; Souza, *et al*,. 2019).

O Método de Mensuração da Degradação (MMD) é uma metodologia que permite quantificar a degradação existente em indicadores de degradação quantitativos, desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília e faz parte do $DMM_{PROJECT}$ (Antunes, 2010; Silva, 2014; Souza, 2016; Pinheiro, 2016; Piazzarollo, 2019; Souza, 2019; Mota 2021; Andrade, 2022; Silva 2023). A avaliação da degradação em fachadas de edifícios é facilitada devido ao processo organizado, lógico e sistemático. O MMD é composto por procedimentos que envolvem inspeção de fachada, mapeamento e quantificação de danos e anomalias (Souza, 2016; Silva, 2014).

A aplicação do MMD com o intuito de investigar uma base de dados de um conjunto de edifícios resulta em indicadores de degradação que permitem diversas formas de análises do comportamento da degradação, desde as mais específicas as mais gerais. Além disso, desde que a base de dados seja adequada e delimitada com coerência, viabilizam obter modelos matemáticos de degradação, os quais permitem realizar a estimativa de vida útil das fachadas (Souza, 2019). O principal indicador de degradação é o Fator Geral de Degradação (FGD) que é calculado a partir das áreas degradadas por diferentes anomalias, ponderada por fatores específicos de gravidade e relevância. Existem outros indicadores que contribuem para o entendimento da degradação ao longo do tempo, como ela se manifesta e evolui, como por exemplo o Fdanom e a velocidade de degradação (V_D).

Por meio de indicadores de utilização é possível a realização de aplicações e estudos sobre a vida útil. A vida útil é considerada um critério de durabilidade, podendo ser definida como o período em que o edifício e suas partes atendem os requisitos mínimos de desempenho, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no manual de uso, operação e manutenção nos intervalos de tempo indicados e necessários para determinado sistema (ISO 15686-1, 2011; ABNT NBR 15575-1, 2021). Vários autores discutem a evolução da degradação em modelos de vida útil, sendo para o caso da base de dados utilizada, definido o valor de FGD de 0,05 como limite de vida útil (Bauer *et al.,* 2018; Souza e Bauer, 2020; Souza, 2019; Souza *et al.,* 2019).

Diante de uma manifestação não homogênea, existe diferença da degradação entre os pavimentos da edificação, principalmente em relação a idade. Devido a sua gravidade e complexidade, conhecer minuciosamente o que ocorre na degradação, pode ser ferramenta valiosa para atuar prevendo anomalias e até mesmo trabalhar de forma mais assertiva na correção de problemas recorrentes em revestimentos de fachadas. Evitar a degradação precoce e promover a resolução dos problemas por meio de medidas corretivas só é possível quando se tem um conhecimento aprofundado dos fenômenos e variáveis envolvidos no processo de degradação.

2 METODOLOGIA

A base de dados empregada neste estudo é um conjunto de edifícios da base de dados global desenvolvida no âmbito do $DMM_{PROJECT}$ (Degradation: measurement and modelling). Todos os edifícios monitorados no $DMM_{PROJECT}$ situam-se na cidade de Brasília, que é classificada como zona bioclimática 4 (NBR 15220-3, 2005). Brasília é uma cidade com um período seco (abril a setembro) e um período chuvoso (outubro a março) bastante característicos. No período seco os índices de chuva dirigida são muito baixos (Zanoni, 2015).

Os edifícios que compõem a base de dados possuem padronização construtiva. O seu sistema estrutural é em concreto armado e o fechamento vertical emprega para vedação, alvenaria em blocos cerâmicos e de concreto com revestimento em placas cerâmicas ou argamassa e pintura (Amorim e Flores, 2005; Souza *et al*., 2018). Seguem um padrão arquitetônico com tendência horizontal e possuem 6 andares mais pilotis com finalidade de uso residencial. São alongados e implantados isoladamente uns dos outros.

Através do MMD a quantificação é realizada considerando a área degradada da amostra, por meio de sobreposição de uma malha 0,50 m x 0,50 m no mapeamento, considerando área mínima de 50 m² e área máxima de 300 m². Há necessidade que seja em um mesmo plano pois quando acontecem mudanças de plano ou até mesmo de orientação, já constituem uma outra amostra. Após o processo de sobreposição da malha, são definidos os andares e as zonas constituintes da fachada e são quantificados os detalhamentos para cada amostra. Em seguida é feita a quantificação das áreas degradadas. Cada amostra é investigada de forma individualizada.

Para a presente investigação são definidas 64 amostras, pertencentes a 6 edifícios que fazem parte da base de dados. Inicialmente definiu-se como critério de seleção que os edifícios devem possuir 6 andares para padronização. O critério de agrupamento foi a idade e são considerados 3 grupos com intervalos de idade distintos, com dois edifícios em cada grupo, cujo detalhamento e nomenclatura podem ser observados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo de informações das edificações analisadas

Grupo	Intervalo de Idade	Edifício	Nº de amostras
1	10 a 20 anos	1A	13
		1B	6
2	20 a 30 anos	2C	9
		2D	4
3	30 a 40 anos	3E	26
		3F	6

Diante do critério estabelecido e dos dados selecionados, a metodologia proposta para atingir os objetivos do estudo, consite em quantificar a degradação por meio de indicadores de degradação e as análises dos dados obtidos se baseiam em ferramentas estatísticas. As etapas detalhadas podem ser observadas nos itens seguintes.

2.1 INDICADORES DE DEGRADAÇÃO

As informações fornecidas pelo MMD permitem avaliar a distribuição da degradação nas diferentes posições da fachada. Além da divisão das fachadas em amostras, utilizada para a quantificação do FGD, é realizada uma subdivisão da amostra em andares, como exemplificado na Figura 1. Nesta etapa, além do FGD da amostra, a degradação da fachada é analisada nas diferentes alturas, de modo que a altura é subdividida por andar, sendo 6 andares e mais o topo, e a avaliação é realizada por meio do indicador Fator Geral de Degradação do Andar (FGDa).

Figura 1 – Subdivisão da fachada em amostras e andares

O FGD é determinado de acordo com a equação (1) e é calculado para cada amostra de fachada em qual sua área é mapeada em relação às anomalias observadas. O mapeamento quantifica a extensão degradada para cada grupo de anomalias, e esta informação também é registrada com as zonas em que ocorrem. O cálculo do FGD considera o fator de gravidade (G) e a importância relativa da anomalia

(RI). O significado do indicador FGD é avaliar a gravidade da degradação de uma amostra em relação à condição mais crítica possível. Diversas amostras são investigadas para cada fachada, o que torna possível observar a diferenciação da degradação nas diferentes regiões e zonas.

$$FGD = \frac{\sum_1^n (A_{a(n)} \times Gn \times RI_{(n)})}{A_{a(t)} \times \sum G_{max}} \quad (1)$$

Onde,

FGD: Fator Geral de Degradação;
n: Grupo de anomalia (n = 1 Descolamento, n = 2 Fissuras, n = 3 Juntas, n = 4 Manchas);
Aan(n): Área danificada por uma anomalia do grupo n (m²);
Gn: Fator de gravidade da anomalia;
RI: Fator de ponderação da importância relativa de cada anomalia;
A: Área total da amostra da fachada (m²);
Gmax: Soma dos fatores de severidade máxima alcançados pelas anomalias equivalente ao valor de 14.

O FGDa (Fator Geral de Degradação do Andar) é uma aplicação de quantificação do FGD, só que com a particularidade de ser restrita a cada andar da amostra. Este indicador quantifica a degradação por andar, levando em consideração a influência e a importância de cada tipo de anomalia presente no fenômeno de degradação.

A degradação se altera em função da orientação cardeal e em função da idade do edifício. Diante de tal diferenciação, como forma de permitir avaliações e comparações de situações e amostras de diferentes níveis de degradação, é necessária uma normalização. Dessa forma, utiliza-se o indicador Índice de Degradação do Andar (IDa) obtido através da Equação 2, possibilitando padronizar os resultados e a comparação de todos os dados. Por meio do IDa é possível calcular qual a proporção que cada andar é responsável pela deterioração da amostra, ou seja, permite quantificar a contribuição relativa de cada andar para a degradação total, pressupondo que os fatores influenciadores já mencionados são suprimidos.

$$IDa = \frac{FGD_a}{FGD} \quad (2)$$

Onde,
IDa: Índice de degradação do andar;
FGDa: Fator Geral de Degradação do andar;
FGD: Fator Geral de Degradação da amostra.

2.2 ANÁLISE DOS DADOS

Para análise da variabilidade, utiliza-se de ferramentas estatísticas e medidas de dispersão para as amostras selecionadas. A Análise de Variância (ANOVA) é usada para avaliar se existe uma diferença significativa entre as médias da degradação para cada grupo de variáveis comparadas. A ANOVA segue o modelo geral da Equação 5:

$$Yij = \mu + \alpha i + \varepsilon ij \quad (5)$$

Onde,

Yij: valor da variável resposta na j-ésima observação do i-ésimo tratamento;
μ: média geral de todos os tratamentos;
αi: efeito do i-ésimo tratamento;
εij: erro aleatório (residual).

A Análise de Variância é realizada por meio da tabela ANOVA padrão, conforme modelo ilustrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Tabela padrão ANOVA

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Teste F
Entre tratamentos	K-1	Qe	$Se^2 = Qe/K-1$	$Fcalc = Se^2/Sr^2$
Dentro das Amostras (Residual)	N-k	Qr = Qt-Qe	$Sr^2 = Qr/N-k$	
Total	N-1	Qt		

Se o valor de Fcalculado pelo Teste F for maior que o Fcrítico, ou se P-valor for menor que 0.05, pelo teste de hipóteses, tem-se que a hipótese nula de igualdade entre as médias (H0) é rejeitada e há variabilidade entre os fatores analisados, conforme explicado no Quadro 3. Nos casos em que se identifica variabilidade, são realizados Testes T-*Student* para verificar quais os grupos que divergem significativamente entre si por meio da comparação entre as médias (Snedecor; Cochran, 1989; Montgomery; Runger, 2018).

Quadro 3 - Teste de hipóteses

Hipótese		Médias das amostras	Decisão	Variabilidade
H0	Hipótese nula	Iguais	Aceita H0	Não há variabilidade
H1	Hipótese alternativa	Diferentes	Rejeita H0	Há variabilidade

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do indicador de degradação FGD é possível observar que as amostras pertencentes aos grupos de idade 1 (10 a 20 anos) e 2 (20 a 30 anos), se enquadram em um intervalo de FGD abaixo do limite de vida útil considerado de 0,05 (Souza, 2019). Já os resultados do grupo 3, superam o limite de vida útil (FGD > 0,05). É possível identificar em qual idade a amostra ultrapassa o limite (FGD de 0,05), como acontece no grupo 3 em que se observa que o limite é atingido após os 30 anos. Assim, é possível associar os comportamentos ao grau de exposição das amostras. Quando a amostra em estudo apresenta FGD < 0,05 a Vida Útil Estimada (VUE) identifica o momento em que essa fachada possivelmente alcançará esse limite. Caso a fachada apresente FGD ≥ 0,05, a VUE identifica o momento em que essa amostra ultrapassou o limite de degradação aceitável.

Com base na curva apresentada (Figura 2), nota-se que a degradação tem uma natureza progressiva, e o FGD aumenta com o incremento da idade da edificação. A curva apresenta uma inclinação mais baixa para os dados de FGD menores, e a inclinação vai aumentando conforme aumenta o valor de FGD. Isso indica que a velocidade de degradação aumenta com a idade, ou seja, o processo se inicia lento e é mais intenso nas idades mais avançadas. Observa-se que o FGD das amostras varia entre valores próximos a 0,001 até o valor máximo de quase 0,250. Com isso, infere-se a grande dispersão

dos resultados existente, constatando que a degradação nas fachadas é um processo com alta variabilidade e complexidade.

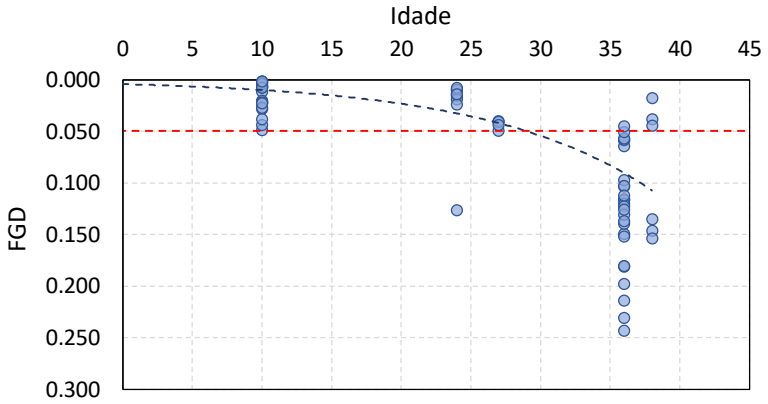


Figura 2 – Comportamento das amostras

Observa-se que a idade é uma das principais variáveis envolvidas no processo de degradação. Consequentemente, é importante realizar investigações referentes a influência do envelhecimento nos processos de degradação e quais variáveis são relevantes. A seguir, na Figura 3, são apresentados os resultados obtidos de FGD para a degradação em três diferentes grupos de idade, em ordem cronológica crescente. Além dos grupos de idade, as amostras estão diferenciadas em função da sua orientação cardeal. Considerando o comportamento das amostras por orientação, é possível ponderar que nos grupos 1 (10 a 20 anos) e 2 (20 a 30 anos) existem amostras distribuídas entre as quatro orientações, sem predominâncias definidas. Para o grupo 3 (30 a 40 anos), observa-se que a maioria das amostras são de orientação Norte, além de serem também as amostras que atingem maior valor de FGD. A orientação exerce um papel crucial na variabilidade da degradação de fachadas, pois possuem relação direta com o grau de exposição aos agentes de origem climática (Bauer e Souza, 2022; Souza, *et al.*, 2024). Observa-se variabilidade dos níveis de degradação entre todos os grupos de idades e dentro do mesmo grupo de idade. Isso mostra que a diferenciação entre a degradação das amostras não ocorre somente pela idade e há outros fatores determinantes para isso (Silva, 2023). Edifícios mais novos, de até 20 anos, nenhuma amostra ultrapassa o valor de 0,05.

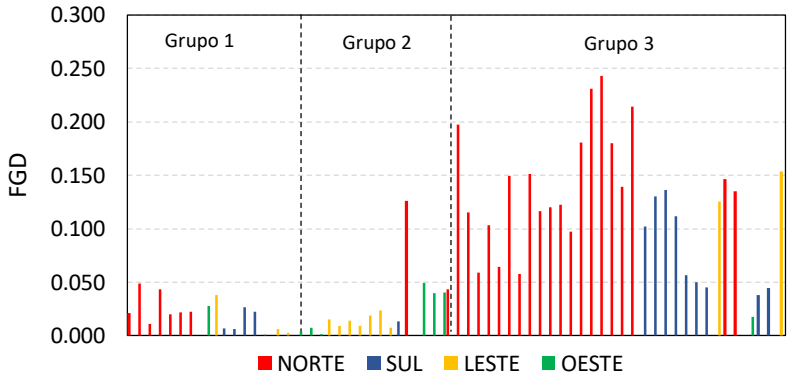


Figura 3 – Separação das amostras em função da orientação

Para os 3 grupos de idade analisando o FGD por andar da edificação (FGDa) é possível observar comportamentos distintos, representados na Figura 4. No primeiro grupo o maior valor de FGDa é encontrado para o terceiro andar e os demais, apresentam valores semelhantes. Até 20 anos pode ser

que a degradação ainda esteja em fase de iniciação sem um comportamento definido, sendo influenciada pelas condições de uso e manutenção. Para o grupo 2, observa-se que os últimos andares (5º e 6º) e o topo possuem os maiores valores, o que pode ser explicado pelo fato de estarem mais expostos aos agentes climáticos de degradação, como por exemplo, chuva dirigida. Para o grupo de idade avançada (grupo 3), entre 30 e 40 anos, observa-se elevados valores de FGDa para todos os andares e que seus valores são semelhantes. Tal observação permite pontuar que a degradação já é avançada e distribui por todos os andares. Além disso, os valores de FGDa para o terceiro grupo são maiores que os dois grupos de idade inferior para todos os andares.

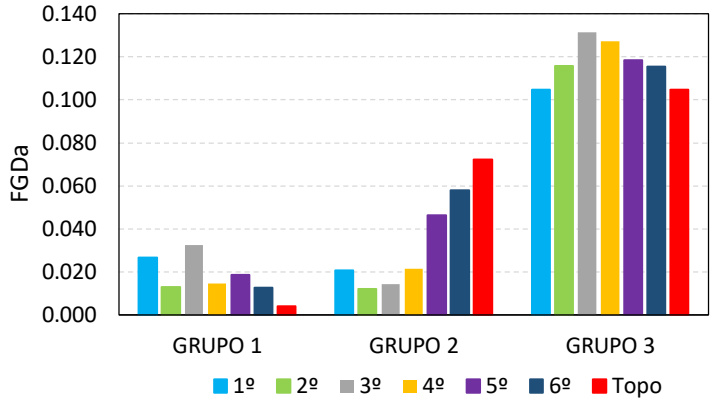


Figura 4 – Resultados médios de FGDa por grupo de idade

A degradação é variável principalmente em função da idade. Dessa forma, o índice IDa (Equação 2) possibilita a comparação de todos os valores em uma mesma faixa de variação. Ou seja, busca-se uma padronização de todos os valores de FGDa dos andares, sejam eles de edifícios mais ou menos degradados, captando nessa análise a variabilidade que se tem entre os andares, desconsiderando o nível de degradação da amostra. Por meio do IDa é possível avaliar o nível de degradação do andar em relação a degradação da amostra. Dessa forma, o índice indica a representatividade de cada andar em relação ao da amostra. Na Figura 5 estão apresentados os resultados do IDa para todas as amostras em estudo. Observa-se a dispersão dos dados e como ocorre a importância do andar em relação a amostra na qual ele está contido. Em edifícios mais novos pertencentes ao grupo 1, a maior representatividade é encontrada para o 3º andar, seguido do 1º. Para os edifícios do segundo grupo, os picos observados são para os últimos andares, em especial o 6º e o topo. Para os edifícios acima de 30 anos, nota-se que não há destaque para um único andar, e sim, que para todos eles existem representatividade semelhante. Fato que pode ser atribuído ao incremento da idade que faz com que a degradação tende a ser generalizada, onde todos os andares são semelhantemente degradados.

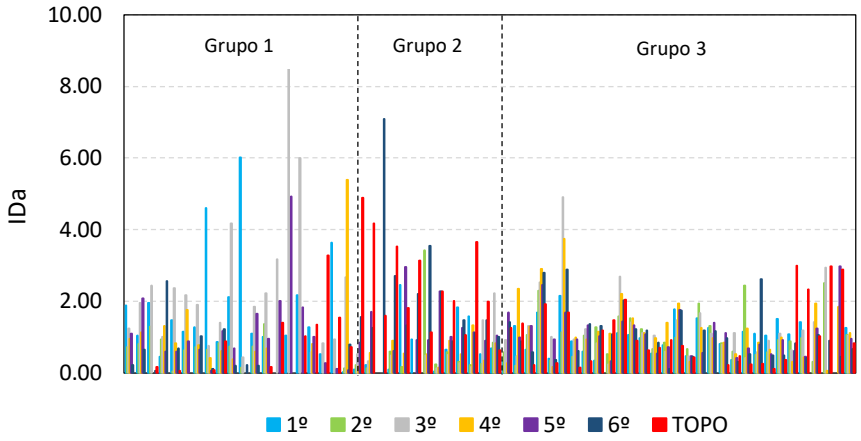


Figura 5 – Resultados de IDa por amostra

Após a normalização de valores para a degradação, são obtidos também os valores médios por andares, como pode ser observado na Figura 6. O terceiro andar apresentou o maior valor para o índice, contrariando a hipótese de que a degradação é maior nos últimos andares e topo (Silva, 2023). Esse comportamento de maior degradação do topo e andares mais elevados está diretamente ligada à idade. Tal fato pode ser atribuído por algum elemento que protege os andares mais altos da atuação de agentes climático, como por exemplo sombra causada por um outro edifício na proximidade ou mesmo vegetação, ocorrências observadas com frequência em Brasília, em razão da distribuição dos edifícios e características da concepção da cidade. Além do mais, há hipóteses de que o terceiro andar pode ser mais acometido pela degradação por alguma particularidade construtiva ou mesmo falha ou ausência relacionadas a operações de manutenção. As medidas de dispersão de IDa para todos os andares estão apresentadas no Quadro 4.

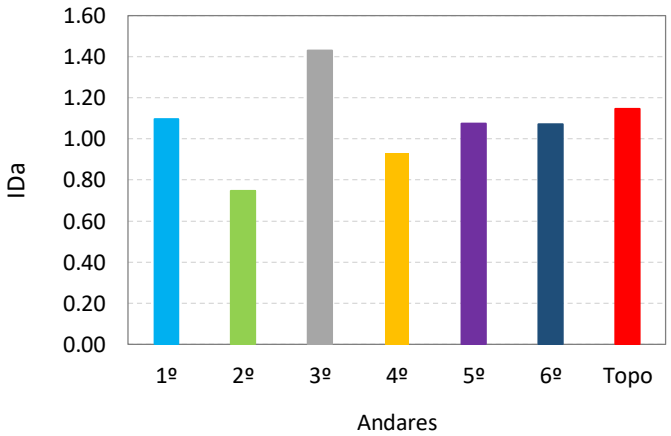


Figura 6 – Resultados médios IDa por andares

Quadro 4 – Medidas de dispersão do IDa para os andares

Medida de Dispersão	1º	2º	3º	4º	5º	6º	Topo
Média	1,096	0,748	1,429	0,931	1,074	1,072	1,146
Desvio Padrão	1,0576	0,6859	1,4988	0,9264	0,8254	1,1308	1,1872
Coef. de Variação (%)	96,54	91,71	104,85	99,45	76,86	105,50	103,59

A realização da (ANOVA) com os valores de IDa para avaliar a existência ou não de diferença significativa entre a degradação entre os andares. Para estudo da variabilidade do IDa, a Análise da Variância é utilizada para os valores de IDa para todos os andares (7 grupos) e todas as 64 amostras utilizadas na pesquisa. Os resultados obtidos na análise estatística podem ser obervados no Quadro 5. Para valores de p-valor inferiores a 0,05, é possível afirmar que a média entre aqueles grupos não são iguais, ou seja, há a variabilidade.

Quadro 5 – ANOVA para todos os andares

Fonte da Variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*P - valor*	*F crítico*
Entre Grupos	16,5492	6	2,7582	2,394589	0,027456	2,119134
Dentro dos Grupos	507,9645	441	1,151847			
Total	524,5137	447				

Por meio da Análise da Variância, verifica-se que há variabilidade da degradação entre os andares, confirmando o que foi observado no gráfico de médias. São realizadas análises por grupos de andares dois a dois com o teste T-*Student* para analisar quais andares diferem entre si. A identificação entre quais andares há variação ou não da degradação são apresentados no Quadro 6. Na representação da existência ou não de variação ***x*** representa que há variação e ***o*** indica que não há variação entre os andares.

Quadro 6 – Resultados do teste T-*Student* indicando variação

Andares	Variação
1 e 2	x
1 e 3	o
1 e 4	o
1 e 5	o
1 e 6	o
1 e Topo	o
2 e 3	x
2 e 4	o
2 e 5	x
2 e 6	x
2 e Topo	x
3 e 4	x
3 e 5	x
3 e 6	o
3 e Topo	o
4 e 5	o
4 e 6	o
4 e Topo	o
5 e 6	o
5 e Topo	o
6 e Topo	o

Os andares cujos p-valor são menores que 0,05 são aqueles em que existe uma diferença estatística (x) relevante acerca do índice IDa. Os dois andares, com maior diferenciação entre eles, são o segundo andar e o terceiro. A tabela indica que o comportamento da degradação no terceiro andar é diferente

de todos os outros 6 andares. Em contrapartida, as tabelas cujo p-valor são maiores do que 0,05 indica que, para os andares em análise, não há uma diferença estatística (o) relevante acerca do índice IDa.

4 CONCLUSÕES

O limite de vida útil das amostras estudadas é atingido e ultrapassado em idades mais avançadas, acima de 30 anos. Tal observação permite afirmar que edificações com idades inferiores ainda atendem satisfatoriamente as funções para as quais foram projetadas e construídas. A análise de vida útil permite correlações com a durabilidade do elemento ou sistema.

O estudo e as análises realizadas permitem concluir que o processo de degradação não segue um padrão ou perfil homogêneo de comportamento ao longo do tempo. Em cada faixa ou grupo de idade há características específicas que os diferem. Outra diferenciação interessante a ser pontuada é que a a degradação se difere ainda entre andares de uma mesma edificação, conforme comprovado pelos valores de IDa, mas pode ser estatisticamente agrupada em intervalos de FGD, onde com o incremento da idade, a degradação passa de um comportamento pontual para generalizado. Tal diferenciação pode ser atribuída por algum elemento que protege os andares mais altos da atuação de agentes climático, como por exemplo sombra causada por um outro edifício na proximidade ou mesmo vegetação, o que é observado com frequência em Brasília, em razão da distribuição dos edifícios e características da concepção da cidade.

Apesar do estudo englobar uma amostra pequena e o comportamento observado não ser conclusivo, ele ilustrar pormenores e particularidades da degradação de elementos e sistemas. É possível afirmar que conhecer os pormenores do processo de degradação permite operações de manutenção e atividades de reparo específicas e mais assertivas para cada situação e/ou problema. Quanto maior a idade, a tendência é que a degradação, já generalizada neste estágio, seja de difícil correção e reparo, com necessidade de interferências maiores e muitas vezes combinadas. A identificação precoce de anomalias e problemas em idades menores é fundamental para permitir medidas e reparos de menor complexidade e menor custo, garantindo assim funcionalidade e atendimento aos usuários.

REFERÊNCIAS

Amorim, C. N. D.; Braga, D. K.; Christakou, E. D.; Grillo, J. C. S.; Lima, T. B. S.; Baldoíno, V. Reabilitação ambiental e uso da luz natural na arquitetura moderna: Brasília Palace Hotel e Palácio do Itamaraty. Paranoá. v. 3, 2014. 115-128 pp.

Antunes, G. R. (2010) Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília: sistematização da incidência de casos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

Bauer, E.; Souza, A.L.R. Failure patterns associated with facade zones and anomalies in the initiation and propagation of degradation. J Construction and Building Material, v. 347. 2022.

Bauer, E.; Souza, J. S.; Mota, L. M. G. Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.21, n.4, p.23-43, 2021.

Bauer, E.; Souza, J. S.; Piazzarollo, C. B. Application of the Degradation Measurement Method in the Study of Facade Service Life. In book: Building Pathology, Durability and Service Life, 2020.

Biseniece, E.; Freimanis, R.; Purvins, R.; Gravelsins, A.; Pumpurs, A.; Blumberga, A. Study of hygrothermal processes in external walls with internal insulation. Environmental and Climate Technologies, v. 22, pp.22-41, 2018.

Cavalagli, N.; Kita, A.; Castaldo, V. L.; Pisello, A. L.; Ubertini, F. Hierarchical environmental risk mapping of material degradation in historic masonry buildings: An integrated approach considering climate change and structural damage. Construction and Building Materials, 215, pp.998-1014, 2019.

CIB. Defects in Masonry Walls Guidance on Cracking: Identification, Prevention and Repair. International Council for Research Innovation in Building and Construction, 2014.

Cóias, V. Inspeções e ensaios na reabilitação de edifícios. 2 ed. IST Press: Lisboa. 2009.

Dias, J. L.; Silva, A.; Chai, C.; Gaspar, P. L.; De Brito, J. Neural networks applied to service life prediction of exterior painted surfaces. Build. Res. Inf., v. 42, n. 3, pp. 371–380, 2014.

Duarte, R.; Flores-Colen, I.; De Brito, J.; Hawreen, A. Variability of in-situ testing in wall coating systems - Karsten tube and moisture meter techniques. Journal of Building Engineering, v. 27, 2020.

Flores-Colen, I.; De Brito, J.; Freitas, V. P. Methodology for in-service performance assessment of rendering facades for predictive maintenance. TG75, W014, W080, W083 and W086, pp. 388, 2009.

Freitas, V. P.; Vieira, M.; Guimarães, A. S. (2013) The French, Norwegian and Danish experience. A State-of-the-Art Report on Building Pathology. CIB Publication 393. pp. 30-35.

Galbusera, M. M.; De Brito, J.; Silva, A. (2014) The importance of the quality of sampling in service life prediction. Construction and Building Materials. v. 66. pp. 19-29.

Galvão, J.; Duarte, R.; Flores-Colen, I.; De Brito, J.; Hawreen, A. Non destructive mechanical and physical in-situ testing of rendered walls under natural exposure. Construction and Building Materials, v. 230, 2020.

International Organization for Standardization. ISO 15686-10 (2010): Buildings and constructed assets -Service life planning - Part 10: When to assess functional performance. International Organization for Standardization.

Jernberg, P.; Lacasse, M. A.; Haagenrud, S.E.; Sjöström, C. Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components. Joint CIB W80 / RILEM TC 140 – TSL Committee on Service Life of Building Materials and Components, CIB Report, Publication 295, 2004.

Kazmierczak, C. S.; Kulakowski, M. P.; Brehm, F. A.; Sentena, J. A. A.; Marquetto, L. (2016) Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaios Acelerados com Ciclos Térmicos. Ed. Scienza. Porto Alegre. Cap. 6. pp. 147 - 175.

Magos, M.; De Brito, J.; Gaspar, P. L.; Silva, A. Application of the factor method to the prediction of the service life of external paint finishes on facades, Materials and Structures, v. 49 (12), pp. 5209–5225, 2016.

Montgomery, D. C.; Runger, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 6a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

Morgado, A. et al. Durability of thermal renders with lightweight and thermal insulating aggregates: Regranulated expanded cork, silica aerogel and expanded polystyrene. Gels, v. 7, n. 2, 2021.

Mota, L. M. Estudo da iniciação e da propagação da degradação de fachadas com revestimento em argamassa. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2021.

Oliveira, L. A. Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009., (n.d.).

Piazzarollo, C. B. Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada. Dissertação (Mestrado) - Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 2019.

Pinheiro, P. I. S. Aplicação do Método de Mensuração da Degradação (MMD) ao Estudo das Fachadas de Edifícios em Brasília. Projeto Final. Universidade de Brasília, 2016.

Prieto, A. J. Silva, A. Service life prediction and environmental exposure conditions of timber claddings in South Chile, Building Research and Information. 48 - 191–206, 2020.

Santos, D. G. Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

Silva, M. N. B. Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 2014.

Silva, M. V. Estudo da variabilidade da degradação de fachadas com revestimento cerâmico aderido – aplicação aos edifícios de Brasília. Publicação E.DM – xxx/xx, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p, 2023.

Snedecor, G. W.; Cochran, W. Statistical Methods. [s.l.] Iowa State University Press, 1989.

Souza, A. L. R.; Andrade, D. T.; Bauer, E; Souza, J. S.. Classificação de fachadas de edifícios por meio do critério do grau de proteção, In: REHABEND - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, Granada, 2022.

Souza, A. L. R.; Romeiro, T. R. D. L. M.; Bauer, E. Influence of the Exposure Degree on the Degradation of Facades of Buildings in Brasília - Brazil. Buildings, v. 14, n. 1, 2024.

Souza, J. S. Evolução da degradação de fachadas - efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2016.

Souza, J. S. Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 2019.

Souza, J.; Piazzarollo, C. B.; Bauer, E. Aplicação do Método de Mensuração de Degradação em revestimentos de fachadas. TECSIC- 2o Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos, ago. 2019.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONCRETO E ILHA DE CALOR, QUAL A RELAÇÃO? ESTUDO DO CASO DO NOVO ANHANGABAÚ

Elton Belarmino de Sousa[a]

[a] Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 876 - Butantã, 05508-080, São Paulo, Brasil, eltonbelsousa@usp.br

RESUMO

A globalização mudou massivamente o consumo e a compreensão do espaço, com a arquitetura desempenhando um papel fundamental nessa transformação. O Vale do Anhangabaú em São Paulo exemplifica essa mudança. Este estudo analisou as mudanças de temperatura de superfície no Vale do Anhangabaú, utilizando imagens termais dos satélites Landsat 5 e 8. A análise incluiu dados de 1985, 2005, 2015, 2021 e dos meses de março e maio de 2022, processados no software QGIS™. O estudo investigou o concreto, Ilhas de Calor e a trajetória histórica do Vale. A área de estudo, com cerca de 50 mil m², mostrou comportamento térmico diferenciado, com temperaturas elevadas. Fatores como a redução de áreas permeáveis e a ausência de árvores contribuíram para esse aumento de temperatura. A análise concluiu que o projeto atual do vale não seguiu as melhores diretrizes para atingir seus objetivos, potencialmente contribuindo para a formação de uma Ilha de Calor. Além disso, o material aplicado necessitará de manutenção devido à exposição solar, para garantir sua durabilidade. A proposta revelou-se inadequada em termos de mitigação do calor, ressaltando a importância de considerar o impacto climático em projetos urbanos.

Palavras-chave: Temperatura, Concreto, Ilha de Calor, Novo Anhangabaú.

1 INTRODUÇÃO

A globalização não só conectou ideias e diminuiu fronteiras, mas também mudou o consumo, a produção industrial e o uso do espaço territorial. Grandes metrópoles, como São Paulo, enfrentam constantes transformações para se manterem atualizadas no mundo globalizado. Segundo Sousa (2018), a cidade, como organismo complexo, precisa de uma análise que entenda suas estruturas físicas, sociais, econômicas e culturais. A arquitetura é fundamental na transformação do espaço, requerendo novos conhecimentos e visões alinhadas com as estruturas físicas, sociais, econômicas e ambientais. Sousa (2018) destaca que a morfologia urbana é crucial na análise interdisciplinar do espaço urbano.

O Vale do Anhangabaú, em São Paulo, é um exemplo dessa transformação. Recentemente, passou por uma grande intervenção com a implantação de uma nova proposta pela Gehl Architects, visando integrar a região central e melhorar a vida da população. Apesar da promessa de 170 novas árvores, a diminuição das áreas permeáveis e o aumento da superfície concretada levantam preocupações sobre os impactos, como a formação de ilhas de calor.

O objetivo deste trabalho é analisar as mudanças de temperatura de superfície no Vale do Anhangabaú usando dados dos satélites Landsat 5 e 8, correlacionando os resultados com as transformações do vale, especialmente a reforma de 2020. A análise busca verificar se o novo projeto contribui para a alteração do microclima local e a formação de ilhas de calor em São Paulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O CONCRETO NA ARQUITETURA

De acordo com Pedroso (2009), o concreto é uma pedra artificial que, inicialmente, se molda à inventividade humana e, após endurecer, apresenta resistência similar a rochas naturais. Quando fresco, é um material plástico, permitindo modelagem em formas diversas. Couto et al. (2013) descrevem o concreto como uma mistura de cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e ar, podendo conter adições como cinza volante e sílica ativa, além de aditivos químicos que melhoram suas propriedades físicas.

Conforme a World Business Council For Sustainable Development (WBCSD, 2007), a produção mundial do cimento atingiu, em 2005, mais de $2{,}3 \times 10^9$ toneladas anuais, resultando em quase 2×10^9 toneladas de CO_2 lançados na atmosfera. Para Damineli, et al. (2012) existe um grande e complicado paradoxo, uma vez que, há o concreto como agente protagonista, um dos materiais mais consumidos no mundo, contudo, por haver na sua composição, o cimento que, apesar de estar presente em um baixo percentual na sua mistura, em termos de impacto ambiental, contribui fortemente, sendo responsável por até 80% da emissão de CO_2.

No contexto do Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/02, que trata diretamente de resíduos da construção civil, abordam a reciclagem como destino obrigatório aos resíduos pertencentes a determinadas classes, como é o caso de componentes de concreto e cerâmicos provenientes da construção, demolição, reformas e reparos de edificações (BRASIL, 2011; BRASIL, 2012).

O concreto e o adensamento das cidades também geram um problema relacionado ao clima, as chamadas Ilhas de Calor. Este fenômeno decorrente da concentração de asfaltos, concretagem de pisos e edificações nas ruas tende a alterar o microclima daquele local em função da dificuldade de dissipação do calor (CALDEIRA; WERNECK, 2020). As Ilhas de Calor são geralmente presentes em grandes centros urbanos e é extremamente prejudicial para a qualidade de vida das pessoas e para o meio ambiente, pois, contribui para a intensificação do aquecimento global, propagação de doenças, bem como para uma maior dependência de energia e equipamentos elétricos.

2.2 SOBRE ILHAS DE CALOR E AS SUAS CAUSAS

O fenômeno da Ilha de Calor afeta silenciosamente grandes centros urbanos, causando aumento de temperatura devido ao excesso de edificações, áreas asfaltadas ou concretadas, ausência de áreas permeáveis e vegetação, além da poluição industrial e emissões de gases (SANTOS; RODRIGUES, 2016). Segundo a Environmental Protection Agency (EPA, 2008), a Ilha de Calor indica microclimas urbanos diferentes das áreas rurais.

Os primeiros estudos sobre o clima urbano e Ilhas de Calor datam do início do século XIX, quando Luke Howard identificou maior calor em Londres comparado ao campo, atribuindo-o à absorção de radiação solar e falta de umidade. Estudos subsequentes, como os de Landesberg (1956) e Chandler (1965), são fundamentais para a climatologia moderna (ROMERO et al., 2019). No Brasil, Lombardo (1975) estudou as Ilhas de Calor em São Paulo, ligando mudanças climáticas urbanas à forma da cidade e atividades humanas. Projetos de espaços públicos devem considerar o impacto no clima e entorno, evitando materiais que causem Ilhas de Calor.

Santos e Rodrigues (2016) alertam que Ilhas de Calor podem causar doenças cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórias, além de asmas e infecções. Assim, é crucial analisar o impacto climático desde as etapas de projeto para prevenir problemas de saúde pública.

2.3 O VALE DO ANHANGABAÚ E O NOVO ANHANGABAÚ

Compondo um dos marcos mais importantes da cidade de São Paulo, o Vale do Anhangabaú é o palco de diversos eventos culturais, além de espaços para variados esportes (Figura 1). Localizado no centro da cidade, mais especificamente entre os Viadutos do Chá e Santa Ifigênia, é envolto ao prédio da Prefeitura de São Paulo, o Teatro Municipal, a Escola Municipal de Balé, o Conservatório Dramático e Musical de São Paulo, além da Escola de Direito da Universidade de São Paulo.

De acordo com o Portal Cidade de São Paulo (2022), o nome Anhangabaú é de origem indígena e em tupi significa rio ou água do mau espírito. Essa denominação pode estar ligada aos maus-tratos sofridos pelos indígenas por parte dos bandeirantes nas imediações do rio à época das Expedições Entradas e Bandeiras. Hoje, o rio Anhangabaú está sob o asfalto no vale.

Figura 1 – Vista do Vale do Anhangabaú nos dias de hoje. Fonte: O Autor (2022)

Ao longo de todo o século 19, a região do Vale do Anhangabaú configurava-se num certo empecilho para a modernização de São Paulo, uma vez que não se sabia, como transformar o local. Esse quadro começa a mudar a partir de 1877 quando é iniciada a construção do Viaduto do Chá, que perdurou até 1892, além de posteriormente ser realizada a canalização do Ribeirão Anhangabaú, em 1906. Ao longo desses processos, as chácaras e propriedades rurais que existiam na região foram sendo desapropriadas e desaparecendo do local. Em 1910, toda a região foi arborizada e transformada em uma grande área de parque, esse reduto foi mantido até o final da década de 1930. Prosseguindo ao progresso para a cidade de São Paulo, o Parque do Anhangabaú perde a sua função de parque e ganha uma via expressa de cerca de 50 metros, fazendo a ligação entre o Norte e Sul da cidade (GAZETA DE SÃO PAULO, 2022).

Com a abertura do parque para os carros, criou-se um problema no que diz respeito à relação entre pedestres e motoristas. De acordo com Grunow (2020) a então Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo (EMURB) havia proposto construir 6 passarelas sobre o vale, para os pedestres, solução essa amplamente criticada pelos setores de profissionais ligados ao urbanismo. Deste modo, e para solucionar esse impasse foi aberto em 1981, o Concurso Público Nacional para Elaboração de Plano de Reurbanização do Vale do Anhangabaú. Um total de 152 propostas de vários estados do Brasil foram inscritas, contudo, destas, apenas 93 concorrentes entregaram o projeto. O

concurso foi vencido por unanimidade pela proposta de número 17 (Figura 2) dos arquitetos Jorge Wilheim, Rosa Kliass e equipe: Carmem Lydia Silva, Jamil Kfouri, Jonas Birger, Marcelo Martinez, Maria Lucinda Aguiar e Michel Todel Gorski (GRUNOW, 2020).

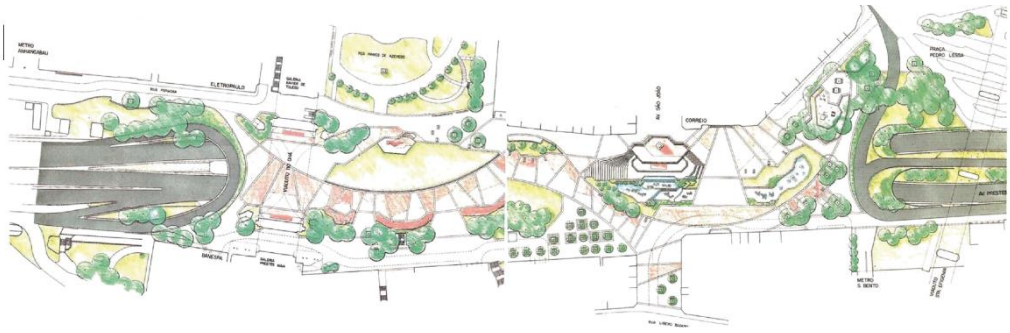


Figura 2 – Desenho da proposta vencedora. Fonte: Revista Projeto (2020)[1]

O projeto transformaria o Anhangabaú em uma grande praça de 50 mil m², sobre dois túneis de cerca de 570m cada, com quatro pistas para o tráfego entre as regiões norte e sul da cidade. O projeto executivo, desenvolvido pelos escritórios de Kliass, Wilheim, Kfouri e Roseli Martins, ficou engavetado por anos devido a questões políticas e divergências internas governamentais e empresariais.

Após essas reviravoltas, as propostas de Kliass, Wilheim e parceiros receberam o sinal verde, tornando o Anhangabaú um local para pedestres. Como menciona Grunow (2020), um projeto dessa magnitude não se encerra na sua intenção ou implantação, pois envolve manutenção, infraestrutura urbana, gestão e políticas públicas (Figura 3). Nos anos 2000, o Vale do Anhangabaú apresentava problemas para pedestres, segurança e questões sociais, servindo de abrigo para pessoas em situação de rua.

Figura 3 – Projeto vencedor de 1981 implantado Fonte: Archdaily (2020)[2] | Foto: Bruno Niz (2019)

Os primeiros passos para uma futura requalificação do Vale do Anhangabaú começaram em 2007, quando a Secretaria Municipal de Relações Internacionais de São Paulo trouxe o arquiteto Jan Gehl para comandar um ciclo de oficinas com o objetivo de pensar nos médio e longo prazos, pontos

[1] Disponível em: < https://revistaprojeto.com.br/acervo/prefeitura-municipal-de-sao-paulo-jan-gehl-pjj-malucelli-mario-biselli-consorcio-central-requalificacao-e-reurbanizacao-do-vale-do-anhangabau-sao-paulo/>. Acesso em: 11 nov. 2022.

[2] Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/952948/vale-do-anhangabau-multiplicidade-do-espaco-no-imaginario/5fd0dc9b63c0173e08000017-vale-do-anhangabau-multiplicidade-do-espaco-no-imaginario-imagem?next_project=no>. Acesso em: 11 nov. 2022.

importantes para o futuro da cidade. Desses momentos saiu a pauta da requalificação do Vale do Anhangabaú, tendo a baixa permanência no local sido identificada como principal problema.

Para o arquiteto, o objetivo da proposta era criar uma sistemática diferente de reflexão sobre a cidade. “Não é um projeto autoral, mas a difusão de metodologias novas junto ao corpo técnico da municipalidade e, neste sentido, o Anhangabaú foi um projeto muito importante” (GRUNOW, 2020).

Em maio de 2019, começaram as intervenções de reforma do Vale do Anhangabaú, visando a requalificação do centro de São Paulo. As obras foram concluídas em 30 de outubro de 2020, mas ainda estão sob operação assistida pelo consórcio responsável pela manutenção dos equipamentos sociais (PORTAL CIDADE DE SÃO PAULO, 2022). A Gestão Urbana de São Paulo (2022) destaca que os principais desafios incluíam sinalização deficiente, dificuldade de orientação, ausência de bancos e barreiras criadas por escadarias. Um "Centro Diálogo Aberto" foi estabelecido, envolvendo arquitetos, planejadores, técnicos municipais e representantes da sociedade civil para garantir a participação popular no processo de construção da proposta.

Grunow (2020) observa que o sucesso do novo projeto (Figura 4) não pode ser avaliado imediatamente devido a restrições de aglomerações e ao crescimento das árvores. Além disso, é necessário que a população se adapte ao novo local. O arquiteto Mario Biselli, do escritório Biselli Katchborian Arquitetos, responsável pelo gerenciamento do projeto, afirma que a gestão de Haddad mudou a relação das pessoas com os espaços públicos de São Paulo, o que pode contribuir para o sucesso do novo projeto.

Figura 4 – Atual Vale do Anhangabaú. Fonte: Guia Folha UOL (2021)[3]

Para Sousa (2018), o Vale do Anhangabaú possui uma dimensão simbólica do coração de São Paulo. Um profundo vale que já foi irrigado pelas águas do Anhangabaú, se tornou o eixo de conexão norte e sul da cidade e após novas transformações fez a ligação do Centro Velho ao Centro Novo. O que mais poderá vir desta terra, agora totalmente concretada?

3 METODOLOGIA

A área de estudo deste trabalho é o atual Vale do Anhangabaú, com aproximadamente 50 mil m², localizado no Centro Histórico de São Paulo, entre o Viaduto do Chá e a avenida São João. A nova

[3] Disponível em: <https://guia.folha.uol.com.br/passeios/2021/01/novo-vale-do-anhangabau-tera-cafes-e-atividades-culturais-mas-falta-data-de-inauguracao.shtml>. Acesso em: 12 nov. 2022.

configuração do vale, resultante de um recente projeto, visa repensar o uso do espaço público. Situado entre as coordenadas 23° 32' 45.51" S e 46° 38' 13.33" O, o vale pertence à zona climática 'CFA' (úmido em todas as estações com verão quente) segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014).

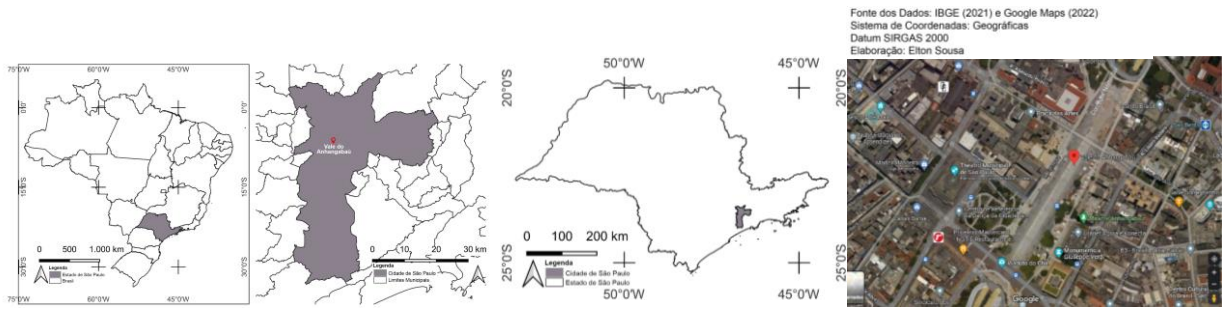


Figura 5 – Localização do Vale do Anhagabaú. Fonte: Elaboração do Autor (2022)

Para o estudo da variação térmica no Vale do Anhangabaú, foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e 8, obtidas por meio do site Earth Explorer[4]. As numerações citadas correspondem à geração de cada um deles. De acordo com o site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022), o Landsat é um projeto desenvolvido pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) e dedica-se a exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres.

Dessa forma, com o intuito de compor uma pequena linha do tempo comparativa entre as imagens espectrais térmicas obtidas, foram consideradas para este estudo as bandas termais correspondentes ao resultado anual espectral de temperatura dos seguintes anos 1985 e 2005 (ambos Landsat-5), 2015, 2021 e 2022 (ambos Landsat-8). Sobre o ano de 2022, há um detalhe a ser mencionado, desse ano foram colhidos apenas os resultados termais referentes aos meses de março e maio daquele ano. Essa escolha se deu em função de esses meses terem sido considerados respectivamente o mês mais quente (G1, 2022) e o mês mais frio (UOL, 2022).

Posteriormente à coleta das imagens, elas foram tratadas no software de análise de dados georreferenciados QGIS™, onde também foi realizada a composição de cor para a geração das bandas termais. Nesse processo também foi utilizado um arquivo de shapefile (SHP)[5] da cidade de São Paulo obtido através do site do IBGE (2021), do qual foi feito um recorte e retirado o shapefile apenas da área do Vale do Anhangabaú.

As imagens das bandas térmicas foram agrupadas conforme o momento histórico vivido pelo Vale do Anhangabaú para a análise e discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 exibe uma linha temporal de bandas termais do Vale do Anhangabaú considerando os anos estudados.

[4] O site https://earthexplorer.usgs.gov/ é um portal desenvolvido pelo Departamento de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos da América onde são disponibilizadas imagens espectrais da superfície terrestre captadas pelos satélites da NASA em atuação na órbita do planeta.

[5] Arquivo que contém dados geoespaciais de uma determinada localização.

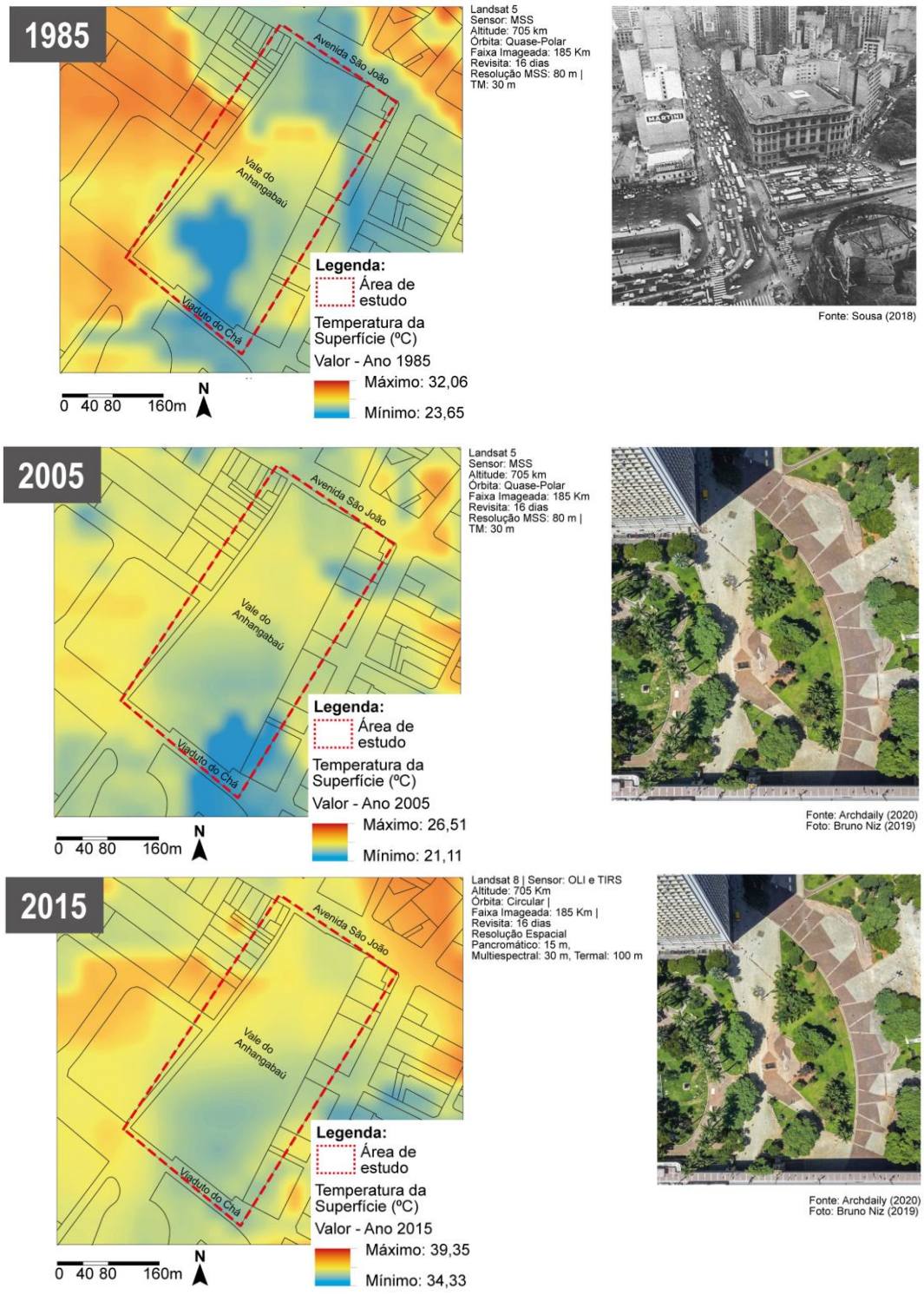


Figura 6 – Anos avaliados, Bandas termais e o Imagem do Parque no período (1985 a 2015). Fonte: Dados na imagem com elaboração do autor (2022)

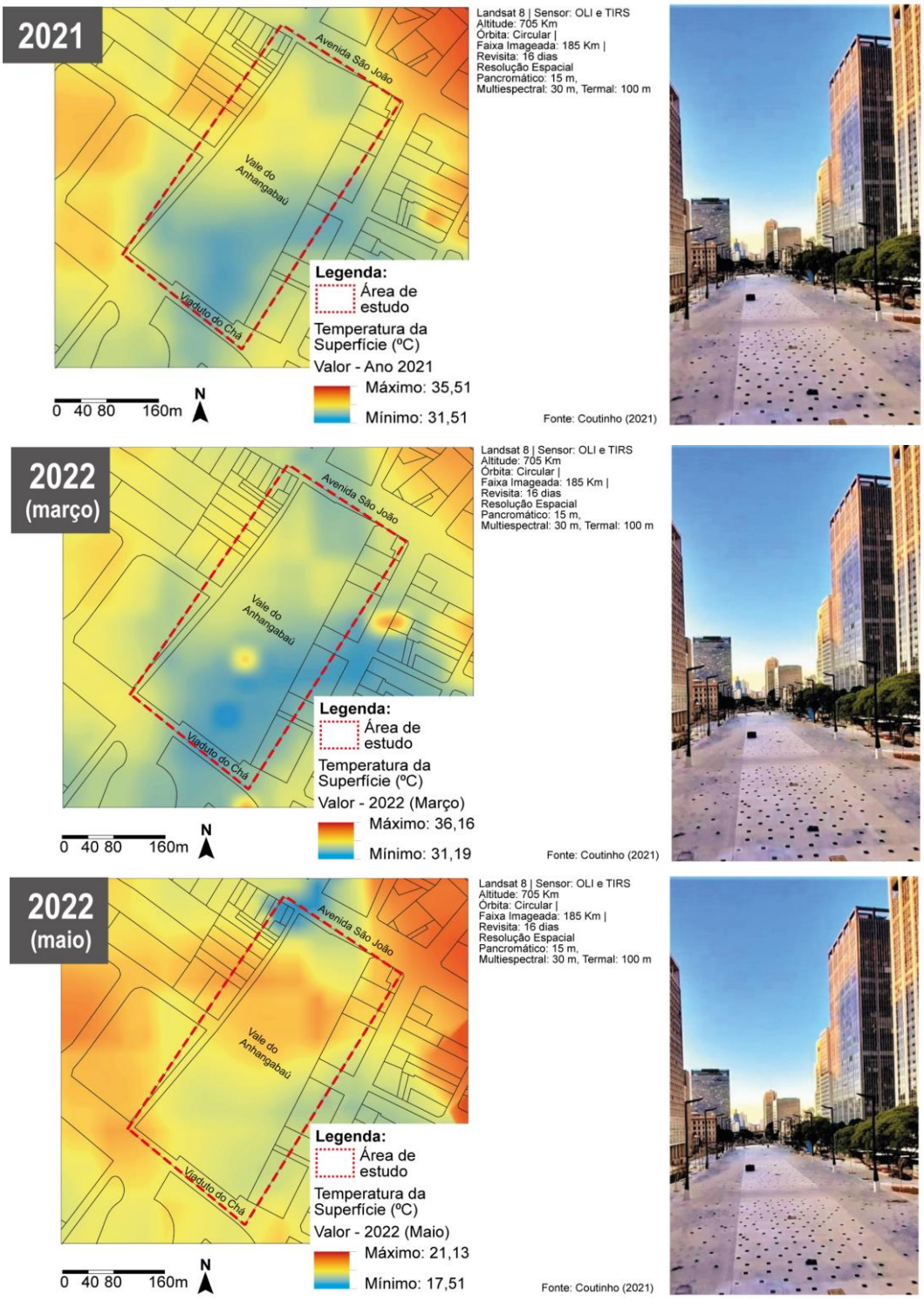


Figura 2 (cont.) – Anos avaliados, Bandas termais e o Imagem do Parque no período (2005 a março/2022). Fonte: Dados na imagem com elaboração do autor (2022)

Em 1985, o Vale do Anhangabaú funcionava mais como um corredor de trânsito do que como um parque. Os carros dominavam o espaço, com temperaturas registradas pelo satélite Landsat 5 que variavam entre 23,65 ºC e 32,06 ºC, com uma média de 27,79 ºC. Em 1985, a superfície do Anhangabaú se aproximava desse patamar, mas o local não oferecia espaço para a interação social, sendo apenas uma via de passagem para carros.

Em 2005, vinte anos depois, as temperaturas no Vale do Anhangabaú variavam entre 21,11 ºC e 26,51 ºC, com uma média de 24,71 ºC. Nesse período, o projeto vencedor do Concurso Público Nacional para Elaboração de Plano de Reurbanização do Vale do Anhangabaú, idealizado em 1981 por Jorge Wilheim e Rosa Kliass, já estava implementado. O parque, agora com áreas verdes e permeáveis, ainda enfrentava problemas de segurança e baixa frequência de visitantes, em parte devido à presença de moradores de rua. Dados da NASA indicam que 2005 foi o ano mais quente até então, superando o recorde de 1998, com uma temperatura média global aproximadamente 0,055 ºC mais alta (FOLHA DE SÃO PAULO, 2005).

Em 2015, o Vale do Anhangabaú apresentou uma média máxima anual de 39,35 ºC, cerca de 2,8 ºC mais quente que a própria cidade de São Paulo. Pegorim (2015) e G1 (2015) reportam que o ano foi marcado por temperaturas elevadas devido ao fenômeno El Niño e uma forte massa de ar seco, que resultaram em uma baixa umidade do ar e um estado de atenção decretado pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC). A área do Vale estava mais adensada, com maior circulação de pessoas e estabelecimentos comerciais, contribuindo para a formação de uma ilha de calor.

Em 2021, o novo projeto do Vale do Anhangabaú, projetado pelo arquiteto dinamarquês Jan Gehl, foi concluído. As temperaturas variaram entre 31,51 ºC e 35,51 ºC, com uma média anual de 33,62 ºC. A nova configuração do parque, com uma grande passarela concretada e áreas permeáveis nas laterais, oferecia poucas áreas de sombra e vegetação, aumentando o calor. Dados do INMET (2021a, 2021b) mostram que São Paulo teve aumentos de temperatura, refletindo na média anual elevada do Vale, com médias de temperaturas máximas de 29 ºC e mínimas de 19,6 ºC durante o verão.

Em 2022, março foi o mês mais quente, com o Vale registrando médias máximas de 33,16 ºC e mínimas de 31,19 ºC, cerca de 4,1 ºC e 11,09 ºC acima das médias da cidade, respectivamente. Em maio, o mês mais frio, o Vale apresentou temperaturas mínimas de 17,51 ºC e máximas de 21,13 ºC, com uma média de 19,93 ºC, acima da média da cidade. Este cenário reflete uma constante elevação das temperaturas e a formação de uma ilha de calor no Vale do Anhangabaú (INMET, 2022a, 2022b; UOL, 2022). Os dados indicam uma alteração significativa na temperatura da superfície do Vale ao longo dos anos. A concretagem da superfície é um fator importante, mas não o único responsável pelas mudanças. As comparações entre os projetos arquitetônicos mostram diferenças na permeabilidade e no uso de materiais, com a segunda proposta apresentada com uma grande área concretada e menos vegetação, o que contribui para o aumento das temperaturas e a formação de ilhas de calor (Figura 15)

Figura 15. Comparativo entre as propostas arquitetônicas do Vale do Anhangabaú (esquerda: Jorge Wilheim, Rosa Kliass (1981), direita: Jan Gehl (2020)). Fonte: Revista Projeto (2020)[6]

[6] Disponível em: < https://revistaprojeto.com.br/acervo/prefeitura-municipal-de-sao-paulo-jan-gehl-pjj-malucelli-mario-biselli-consorcio-central-requalificacao-e-reurbanizacao-do-vale-do-anhangabau-sao-paulo/>. Acesso em: 11 nov. 2022.

O novo projeto do Vale do Anhangabaú, finalizado em 2020, aumentou a área concretada em cerca de 7 mil m², reduzindo a área permeável de 42% para 26%. O parque ainda carece das árvores planejadas, resultando em poucas áreas de sombra. Segundo o Plano Diretor Estratégico de São Paulo (GESTÃO URBANA, SP, 2016), a taxa de permeabilidade mínima deve ser de 0,2, enquanto o novo projeto apresenta 0,26, o que é legalmente aceito, mas insuficiente para o conforto térmico. Além disso, a Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana não possui limite de altura para novas construções, o que pode aumentar o calor na área. Rocha (2018) aponta que a constante exposição ao sol pode enfraquecer o concreto, tornando-o suscetível a desplacamento e esfarelamento. Portanto, é crucial manter uma boa manutenção para garantir a durabilidade da estrutura do parque.

5 CONCLUSÕES

O concreto presente no atual do projeto do Vale do Anhangabaú não pode ser considerado como o único agente causador de Ilha de Calor naquele local. É preciso analisar o seu contexto histórico e urbano, uma vez que muitos fatores que não foram considerados também interferem nesse processo. Todavia, a análise da temperatura feita através das bandas térmicas identificou que Vale apresenta sim um comportamento térmico diferenciado se comparado com as médias de temperaturas da cidade de São Paulo, apresentado em sua superfície temperaturas mais elevadas. Esse fato é um indício de que algo naquela região está contribuindo com isso, sendo o concreto aplicado na superfície o protagonista da principal hipótese.

É preciso considerar que a diminuição de áreas permeáveis e ausência de árvores no atual projeto, também contribuem para esse aumento de temperatura, uma vez que ajudam na diminuição da evapotranspiração local e em conjunto com o acúmulo do calor sensível provocado por materiais com alta admitância, como é o caso do concreto, podem sim estar naquele local promovendo uma ilha de calor. O projeto atual não tomou das melhores diretrizes para alcançar os seus objetivos, não é apenas uma grande esplanada em concreto que vai atrair as pessoas para as ruas. O conforto térmico no local também é algo que precisava ter sido pensado para a concepção deste projeto, que está locado em um país tropical e em uma cidade com um alto adensamento.

REFERÊNCIAS

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Moraes, G., Leonardo, J., & Sparovek, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711-728.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. (2011). Resolução nº 431 - Altera o art. 3º da Resolução nº 307, estabelecendo nova classificação para o gesso, Brasília.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. (2012). Resolução nº 448 - Altera os arts. 2º a 11º da Resolução nº 307, Brasília.

Caldeira, J., & Werneck, T. (2020). Você sabe o que são ilhas de calor? Belo Horizonte: Ius Natura. Disponível em: https://iusnatura.com.br/ilhas-de-calor/. Acesso em: 11 nov. 2022.

Couto, J. A. S., Carminatti, R. L., Nunes, R. R. A., & Moura, R. C. A. (2013). O concreto como material de construção. Cadernos de Graduação, Ciências Exatas e Tecnológicas, 1(17), 49-58.

Damineli, B. L., Pileggi, R. G., & John, V. M. (2012). Eco-eficiência do uso do cimento em concreto: estado atual, possibilidades e tendências. In: CBC2012 – 54CBC, 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do... Maceió-AL.

Environmental Protection Agency - EPA, U. S. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.

Folha de São Paulo. (2005). Dados preliminares da Nasa mostram que média de temperatura global anual já superou a de 1998, recorde anterior. Clima. São Paulo: Folha de São Paulo. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe1410200501.htm. Acesso em 22 nov. 2022.

G1 São Paulo. (2015). São Paulo registra temperatura mais alta do inverno, diz Inmet. G1. Disponível em: http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2015/09/sao-paulo-registra-temperatura-mais-alta-do-inverno-diz-inmet.html. Acesso em: 22 nov. 2022.

G1. (2022). Cidade de SP teve apenas 48 dias de sol, com temperaturas acima de 30ºC neste ano, diz levantamento. G1. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/10/04/cidade-de-sp-teve-apenas-48-dias-de-sol-com-temperaturas-acima-de-30oc-neste-ano-diz-levantamento.ghtml. Acesso em: 12 nov. 2022.

Gazeta de São Paulo. (2022). Memória: as transformações do Vale do Anhangabaú. São Paulo: Gazeta de São Paulo. Disponível em: https://www.gazetasp.com.br/estado/memoria-as-transformacoes-do-vale-do-anhangabau/1114561/. Acesso em: 12 nov. 2022.

Gestão Urbana de São Paulo. (2022). O Vale do Anhangabaú. São Paulo: Gestão Urbana SP. Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/centro-dialogo-aberto/o-vale-do-anhangabau/. Acesso em: 15 nov. 2022.

Gestão Urbana SP. (2016). Lei nº 16.402, de 22 de março de 2016. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo, de acordo com a Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 – Plano Diretor Estratégico (PDE). São Paulo: Gestão Urbana.

Gonçalves, D. P. F. (2019). Concreto pigmentado aparente: recomendações para o processo de projeto arquitetônico (Monografia de Graduação, Universidade de São Paulo).

Grunow, E. (2020). Requalificação e Reurbanização do Vale do Anhangabaú, Prefeitura Municipal de São Paulo. Revista Projeto. Disponível em: https://revistaprojeto.com.br/acervo/prefeitura-municipal-de-sao-paulo-jan-gehl-pjj-malucelli-mario-biselli-consorcio-central-requalificacao-e-reurbanizacao-do-vale-do-anhangabau-sao-paulo/. Acesso em: 10 nov. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). Malha Municipal. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto. Acesso em: 20 nov. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (2015). Análise das anomalias das temperaturas no ano de 2015. Notas Técnicas. Brasília, DF.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (2021a). São Paulo: balanço do inverno e prognóstico para a primavera 2021. Boletim SP. Brasília, DF. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/BoletimSP_inverno_prog_primavera_2021_final.pdf. Acesso em: 21 nov. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (2021b). Balanço do verão e prognóstico para o outono 2022. Boletim SP. Brasília, DF. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/BOLETIM-SP-CLIMA-VER%C3%83O_OUTONO_2022.pdf. Acesso em: 21 nov. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (2022a). Balanço do mês de março de 2022 em São Paulo-SP. Notícias. Brasília, DF. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/noticias/balan%C3%A7o-do-m%C3%AAs-de-mar%C3%A7o-de-2022-em-s%C3%A3o-paulo-capital. Acesso em: 21 nov. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (2022b). São Paulo (SP): Balanço Climatológico / maio de 2022. Notas Técnicas. Brasília, DF. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/BOLETIM-SP_CAPITAL_MAIO_2022.pdf. Acesso em: 21 nov. 2022.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2022). Landsat. São Paulo: INPE. Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat. Acesso em: 15 nov. 2022.

Lombardo, M. A. (1985). Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Editora Hucitec.

Pedroso, F. L. (2009). Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. Concreto e Construções (Revista Oficial do IBRACON), 37(53).

Pegorim, J. (2015). Como foi São Paulo em 2015. ClimaTempo. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/noticia/2015/12/30/como-foi-sao-paulo-em-2015-3207#:~:text=A%20m%C3%A9dia%20da%20temperatura%20m%C3%A1xima,%C2%B0C%20acima%20do%20normal. Acesso em: 22 nov. 2022.

Portal Cidade de São Paulo. (2022). Vale do Anhangabaú. São Paulo: Portal Cidade de São Paulo. Disponível em: https://cidadedesaopaulo.com/atrativos/vale-do-anhangabau/?lang=pt. Acesso em: 15 nov. 2022.

Prefeitura de São Paulo. (2020). Entenda a requalificação do Vale do Anhangabaú: um lugar para convívio, lazer e permanência das pessoas. Prefeitura Municipal. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/licenciamento/noticias/?p=301650. Acesso em: 17 nov. 2022.

Rocha, R. A. S. (2018). Efeito da alta temperatura em concretos: uma revisão da literatura. InterScientia, 6(1).

Romero, M. A. L., Baptista, G. M. M., Lima, E. A., Werneck, D. R., Vianna, E. O., & Sales, G. L. (2019). Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas. Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo: Editoria ETB, 11-25.

Santos, A. M., & Rodrigues, G. A. (2016). Ilhas de Calor: Conceito, Problemas e Alternativas. In: III SIMTEC – Simpósio de Tecnologia da FATEC. Anais do... Taquaritinga-SP.

Sousa, T. E. D. (2018). Vale do Anhangabaú: um estudo sobre o espaço construído e reconstruído (Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Campinas).

UOL. (2022). São Paulo: Mês de maio é considerado o mais frio na cidade desde 1990. UOL. Disponível em: https://abrir.link/ZozIX. Acesso em: 14 nov. 2022.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. (2007). The Cement Sustainability Initiative (CSI Report). Disponível em: https://www.wbcsd.org/. Acesso em: 11 nov. 2022.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO DINÂMICO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Margarida Gonçalves[a]; António Figueiredo[a]; Ricardo M.S.F. Almeida[b,c]; Romeu Vicente[a]; António Samagaio[d]

[a]RISCO-Riscos e Sustentabilidade na Construção, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, margaridagoncalves@ua.pt, ajfigueiredo@ua.pt, romvic@ua.pt

[b]Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510 Viseu, Portugal, ralmeida@estgv.ipv.pt

[c]CONSTRUCT-LFC- Instituto de I&D em Estruturas e Construção, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, ralmeida@estgv.ipv.pt

[d]Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, samagaio@ua.pt

RESUMO

Considerando a significativa pegada carbónica do sector da construção, torna-se crucial encontrar estratégias de descarbonização focadas na melhoria do desempenho térmico e energético do ambiente construído. As Fachadas Dinâmicas surgem como uma possível solução, devido à sua adaptabilidade aos estímulos climáticos. Além disso, a crescente utilização de Materiais de Mudança de Fase (PCM) no sector dos edifícios reforça o potencial destas soluções na otimização da eficiência energética e do conforto térmico neste sector. Contudo, um desafio das aplicações com PCM reside em garantir um ciclo diário completo de carga e descarga do calor latente. Este estudo apresenta o protótipo de um dispositivo de sombreamento dinâmico com PCM, construído à escala real, testado e comparado com uma solução de referência instalada num edifício idêntico. A monitorização avaliou diferentes estratégias de operação para otimizar o potencial do sistema. O sistema opera movendo o dispositivo de um compartimento interno para uma câmara de descarga, potencializando a mudança de fase do PCM. Este protótipo demonstrou capacidade de regulação térmica, reduzindo as temperaturas máximas em até 1.1°C. A estratégia preliminar de aquecimento revelou maior eficiência energética com a aplicação do protótipo, resultando em poupanças energéticas diárias entre 18 e 29%.

Palavras-chave: Fachada dinâmica, Sistema de sombreamento interno, PCM, Eficiência energética, Conforto térmico.

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas prevê um aumento de 1.5°C no aquecimento global nas próximas duas décadas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Em resposta a esse desafio, a União Europeia comprometeu-se a reduzir as emissões de CO_2 em pelo menos 40% até 2030. Este compromisso é apoiado por medidas propostas focadas em três objetivos principais: priorizar a eficiência energética, alcançar a liderança global em energias renováveis e garantir um tratamento equitativo para os consumidores (European Comission, 2016; Ringel e Knodt, 2018).

Dado o impacto substancial do sector da construção na pegada carbónica, há um foco nas estratégias de descarbonização através da melhoria do desempenho do ambiente construído para reduzir o consumo global de energia e as emissões de gases com efeito de estufa, sem descurar o conforto térmico (Ganesh et al., 2021). Entre os vários elementos de um edifício que contribuem para as perdas ou ganhos de calor, a envolvente translúcida é um dos mais relevantes, sendo responsável por aproximadamente 25 a 40% das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento (Feng et al., 2021; Huang et al., 2021). Os sistemas de proteção solar são ampla e mundialmente utilizados como estratégias passivas para proteger os edifícios da radiação solar. No entanto, os sistemas de sombreamento estáticos são notavelmente incapazes de responder adequadamente aos estímulos dinâmicos das condições climáticas. Como resultado, as fachadas dinâmicas utilizadas como sistemas de sombreamento, são priorizadas devido à sua capacidade dinâmica de ajuste aos parâmetros climáticos exteriores ou interiores, promovendo elevados níveis de conforto e desempenho energético (Al-Masrani e Al-Obaidi, 2019). Outra estratégia eficaz que promete poupanças substanciais de energia e redução da dependência de combustíveis fósseis envolve a integração de sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios (Liu et al., 2022), através da utilização de materiais de mudança de fase (do inglês *Phase Change Materials* - PCM) como solução de armazenamento de calor latente. No entanto, a principal desvantagem associada às aplicações do PCM em edifícios está relacionada com o seu comportamento térmico diário, que requer amplitudes térmicas adequadas para um ciclo completo de fusão e cristalização do PCM (Figueiredo et al., 2020).

Assim, este estudo apresenta o desenvolvimento de uma prova de conceito que consiste num inovador dispositivo de sombreamento dinâmico com PCM (DS-PCM), projetado para promover a regulação térmica de forma passiva e promover maior eficiência energética. O sistema opera deslizando de um compartimento interior para uma câmara de descarga, para potencializar e acelerar a mudança de fase do PCM. Para avaliar o desempenho do sistema, foi construído um protótipo e testado em compartimentos à escala real, e a monitorização foi realizada de acordo com diferentes estratégias de operação. Os resultados permitiram uma análise comparativa dos ambientes térmicos interiores (REF e DS-PCM), demonstrando o impacto do uso e gestão deste novo sistema contendo PCM para atenuar tanto o sobreaquecimento como o consumo de energia.

2 CASO DE ESTUDO

2.1 CONCEITO E CASO DE ESTUDO

O sistema introduz um novo conceito que incorpora o PCM num dispositivo de sombreamento dinâmico para a envolvente translúcida em edifícios, com o objetivo de melhorar a regulação térmica passiva. O princípio de funcionamento do sistema consiste em mover um dispositivo de sombreamento interno, de um compartimento para uma câmara de descarga que visa potencializar a mudança de fase do PCM. O DS-PCM absorve a energia solar térmica incidente quando posicionado em frente ao envidraçado (posição a amarelo, Figura 1a). Assim que o PCM completa o processo de

fusão, o sistema desloca-se para uma câmara de descarga conectada ao ambiente exterior através de grelhas de ventilação (posição a preto, Figura 1a), permitindo que o PCM cristalize e liberte o calor absorvido para o exterior do edifício. Concluído este processo, o DS-PCM regressa à sua posição inicial para recomeçar um novo ciclo de carga.

O desempenho do novo DS-PCM foi analisado experimentalmente para demonstrar o seu potencial numa aplicação à escala real. O protótipo foi instalado e avaliado na maior superfície envidraçada (de dimensões 2.07×2.08m^2) de dois edifícios com estrutura em aço leve (LSF) à escala real, orientada a sul para maximizar os ganhos solares. Um edifício foi equipado com uma cortina de tecido tradicional (REF), enquanto no outro foi incorporada a solução dinâmica que contempla também uma cortina de tecido mas neste caso acoplada com tubos de PCM (DS-PCM) (Figura 1b).

a) b)

Figura 1 – Caso de estudo: a) princípio de funcionamento esquemático do DS-PCM, e b) edifícios REF e DS-PCM.

Cada edifício é composto por dois pisos, com uma área total de 35m^2 correspondendo a um volume de 125m^3, e uma área envidraçada de 13m^2. As propriedades térmicas das soluções das envolventes opaca e translúcida (valores de *U* e coeficiente de ganho de calor solar) são apresentadas no Quadro 1. O caso de estudo situa-se no Campus da Universidade de Aveiro, localizado na costa Norte de Portugal. A região de Aveiro enquadra-se na zona climática "Csb" de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), caracterizada por temperaturas quentes (C) e secas (s) e verões quentes (b).

Quadro 1 – Caso de estudo: caracterização geral.

Envolvente translúcida		**Envolvente opaca**	
$U_{\text{Caixilharia-alumínio}}$ **(W m^{-2} °C^{-1})**	2.40	$U_{\text{Laje-piso-térreo}}$ **(W m^{-2} °C^{-1})**	0.54
U_{Vidro} **(W m^{-2} °C^{-1})**	1.00	U_{Paredes} **(W m^{-2} °C^{-1})**	0.47
Coeficiente de ganho de calor solar (-)	0.21	$U_{\text{Cobertura}}$ **(W m^{-2} °C^{-1})**	0.63

A prova de conceito deste dispositivo de sombreamento dinâmico foi testada num compartimento dentro do caso de estudo, com uma área que corresponde a aproximadamente o dobro da área envidraçada e um volume de 2.2×3.3×2.2m^3 (visível na Figura 1a). O perímetro deste novo compartimento foi delimitado com placas de poliestireno expandido (EPS) com 8cm de espessura, de forma a minimizar as trocas térmicas com os restantes compartimentos.

2.2 DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO DINÂMICO COM PCM

2.2.1 Materiais

A macrocápsula para incorporação do PCM foi um tubo de polimetilmetacrilato (PMMA), selecionado pela sua elevada transparência, essencial para garantir uma iluminação natural adequada em espaços interiores. Estes tubos de PMMA têm um diâmetro externo de 40mm, diâmetro interno de 36mm (com espessura de parede de 2mm) e comprimento de 2000mm, com condutividade térmica de 0.19W m^{-1} $°C^{-1}$ e densidade de 1.19kg dm^{-3} (GEVACRIL®, 2023). O PCM escolhido para os protótipos consiste numa parafina pura da *RUBITHERM* (referência RT28HC) (RUBITHERM®, 2020). Além disso, para atender às questões estéticas e de privacidade sem comprometer a iluminação natural, foi utilizada também uma cortina de tecido tradicional, como já referido. No Quadro 2 são apresentadas as propriedades termo físicas do PCM.

Quadro 2 – Principais propriedades do PCM.

Faixa de temperatura de cristalização/fusão (°C)	27 a 24/27 a 31
Capacidade de armazenamento de calor (J g^{-1})	227
Condutividade térmica (W m^{-1} $°C^{-1}$)	0.20
Densidade (kg dm^{-3})	0.88 (sólido); 0.77 (líquido)

2.2.2 Construção do protótipo

A fase de construção do protótipo foi dividida em três etapas principais, conforme ilustrado na Figura 2: 1) enchimento dos tubos com PCM; 2) colocação dos tubos preenchidos no sistema de sombreamento; e 3) construção da câmara de descarga. Inicialmente, 9 tubos de PMMA foram preenchidos com aproximadamente 1.7l de PCM cada e fixos numa calha automática juntamente com a cortina de tecido, de forma a permitir o movimento do sistema. A câmara de descarga, de dimensões 0.2×0.7×2.2m^3, foi conectada ao ambiente exterior através de duas furações no piso e uma na parede de fachada para a instalação de um ventilador mecânico. A parede interna da câmara de descarga foi construída com uma camada de EPS de 8cm de espessura. Por fim, uma placa isolante rígida (1cm de espessura) foi fixa no início do dispositivo de sombreamento. Este elemento acompanha os movimentos do sistema e permite o fecho do topo da câmara de descarga, de forma a minimizar as transferências de calor entre esta câmara e o compartimento.

Figura 2 – Principais etapas da construção do protótipo.

2.3 PROCEDIMENTOS DE MONITORIZAÇÃO

A campanha de monitorização realizada para avaliar e comparar o desempenho térmico dos dois compartimentos ocorreu de agosto a outubro de 2023, para a estratégia de arrefecimento, e de dezembro de 2023 a março de 2024, para a estratégia de aquecimento.

Durante a estratégia de arrefecimento, duas abordagens foram aplicadas para avaliar as temperaturas internas: i) estática, onde o DS-PCM permaneceu continuamente em frente ao envidraçado; e ii) dinâmica, onde o sistema de sombreamento se encontrava em frente ao envidraçado para absorver a energia solar térmica das 9h às 17h, e era posteriormente movido para a câmara de descarga para libertar o calor absorvido para o exterior do edifício, entre as 17h e as 9h.

Na estratégia de aquecimento, foi testada apenas a abordagem estática para analisar o consumo de energia. O sistema de aquecimento consistia em duas lâmpadas de aquecimento dentro de cada compartimento (perfazendo um total de 500W em cada compartimento) com um *setpoint* de temperatura de 20°C a 21°C, para garantir o conforto térmico interior durante o período de inverno.

Este procedimento envolveu a recolha de dados climáticos através de uma estação meteorológica local e a monitorização das condições interiores foi realizada segundo a norma ISO 7726 (International Organization for Standardization, 1998). Dois *dataloggers* registraram os dados em intervalos de 10minutos, e foram utilizados os seguintes sensores e equipamentos: termopares tipo K e termohigrómetros (*HOBO MX2301A*) para medição das temperaturas do ar interior nos compartimentos e para controlar a temperatura do PCM dentro dos tubos; transdutores de velocidade do ar (*Série TSI 8455*) para monitorizar o fluxo de ar dentro da câmara de descarga, nos pontos de entrada e saída; e controladores de energia (*Eve Energy*) e temporizadores térmicos (*TFA Thermo-timer 37.3000*) na estratégia de aquecimento, para gerir o consumo de energia e as temperaturas de *setpoint*, respetivamente.

3 CAMPANHA DE MONITORIZAÇÃO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTRATÉGIA DE ARREFECIMENTO

3.1.1 Abordagem estática

Os resultados da campanha de monitorização considerando a estratégia de arrefecimento são apresentados nesta secção, e fornecem detalhes para uma semana representativa do período de monitorização, de acordo com a abordagem estática. Para clarificar a análise destes resultados, a temperatura interior do compartimento representa o valor médio de todos os sensores posicionados após o DS-PCM (9 em cada compartimento), e as taxas de aquecimento/arrefecimento apresentadas (T. aquec./T. arref., respetivamente) refletem o valor médio de todas as taxas considerando um ciclo diário.

A Figura 3 apresenta os perfis de temperatura do ambiente interior de cada compartimento, a temperatura do PCM e os dados climáticos.

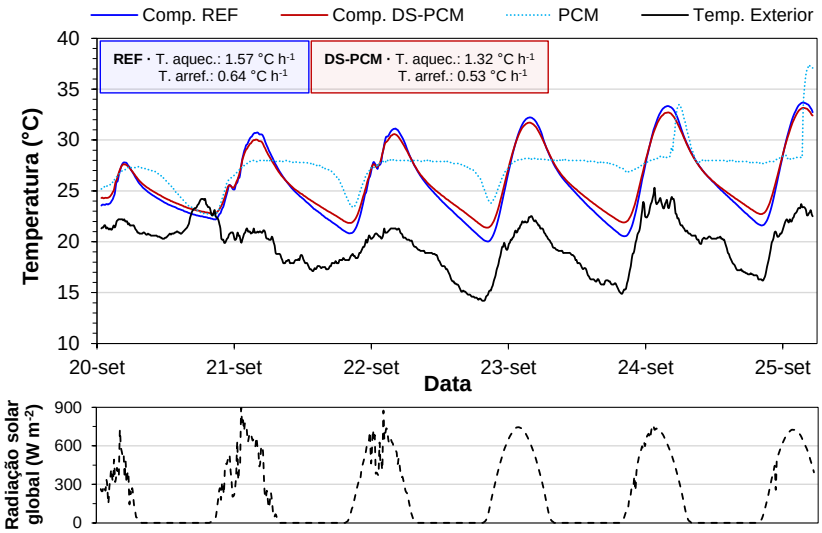


Figura 3 – Resultados da estratégia de arrefecimento: abordagem estática.

Analisando o comportamento do PCM, observou-se que não foi conseguida a mobilização do volume total do mesmo numa análise diária. O PCM teve capacidade para completar o processo de carga apenas em dias com temperaturas exteriores mais elevadas (ou seja, superiores a 24°C). Em dias com menores flutuações diárias da temperatura exterior, o PCM não completou a transição para a fase líquida, mas completou o processo de descarga (transição para a fase sólida). No entanto, durante o período diurno, as temperaturas foram geralmente mais elevadas no compartimento REF, uma vez que no compartimento DS-PCM o PCM se encontrava a absorver energia proveniente da radiação solar, resultando numa redução em até 0.8°C no pico de temperatura máxima, sugerindo que esta pode ser uma solução promissora para abordar o sobreaquecimento de espaços interiores. Por outro lado, durante o período noturno, o compartimento DS-PCM apresenta geralmente temperaturas mais elevadas devido à energia térmica libertada pelo PCM. Além disso, o compartimento DS-PCM também revelou capacidade para reduzir as taxas de aquecimento e arrefecimento em aproximadamente 17%, bem como para atenuar significativamente a amplitude térmica diária (em até 2.2°C).

3.1.2 Abordagem dinâmica

O efeito do PCM no compartimento DS-PCM também foi avaliado considerando uma abordagem dinâmica de operação (Figura 4).

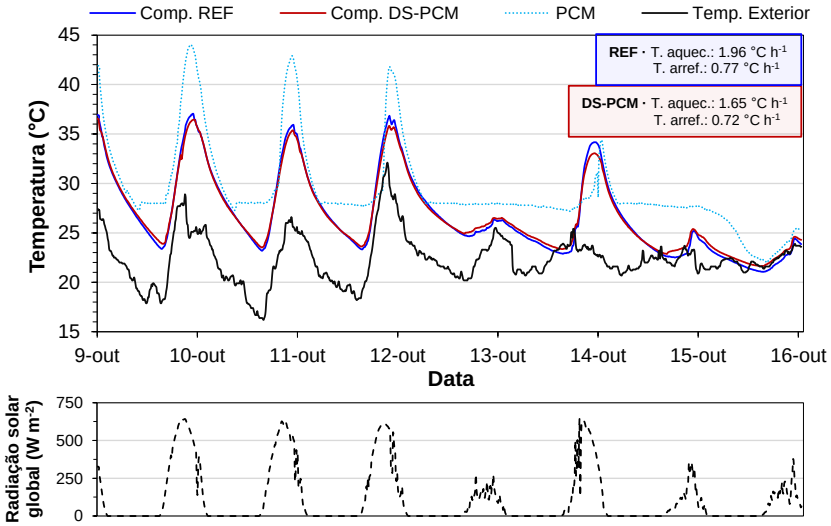


Figura 4 – Resultados da estratégia de arrefecimento: abordagem dinâmica.

Os resultados indicam que a radiação solar pode ser considerada como um fator determinante para o comportamento do PCM, uma vez que as temperaturas nos dois compartimentos são praticamente idênticas em dias com radiação solar fraca. Notavelmente, a abordagem dinâmica conduz a maiores diferenças entre os picos de temperatura máxima dos compartimentos, com reduções em até 1.1°C no compartimento DS-PCM. Tal como observado na abordagem estática, o compartimento DS-PCM apresenta uma taxa de aquecimento mais lenta do seu ambiente (16% inferior ao compartimento REF), sublinhando a eficiência da solução dinâmica no armazenamento de energia térmica e na redução dos perfis de temperatura máxima. Os picos de temperatura mínima são quase idênticos em ambos os compartimentos, uma vez que nesta abordagem, o DS-PCM é movido para a câmara de descarga na fase de cristalização para dissipar a energia térmica absorvida para o ambiente exterior. Consequentemente, o efeito latente do PCM não é sentido nas temperaturas interiores durante este período e as taxas de arrefecimento são idênticas em ambos os casos. É importante destacar que durante este período de monitorização, a temperatura exterior foi mais elevada do que a observada durante a abordagem estática, o que pode dificultar a interpretação e comparação dos resultados entre estratégias.

3.2 ESTRATÉGIA PRELIMINAR DE AQUECIMENTO

Nesta secção são apresentados os resultados preliminares da estratégia de aquecimento, com base numa abordagem estática, com o objetivo de avaliar o impacto do PCM no consumo de energia.

A Figura 5 apresenta os perfis de temperatura interiores, os dados climáticos e o consumo diário de energia, bem como a diferença observada neste parâmetro entre os compartimentos (referido como potencial de poupança de energia).

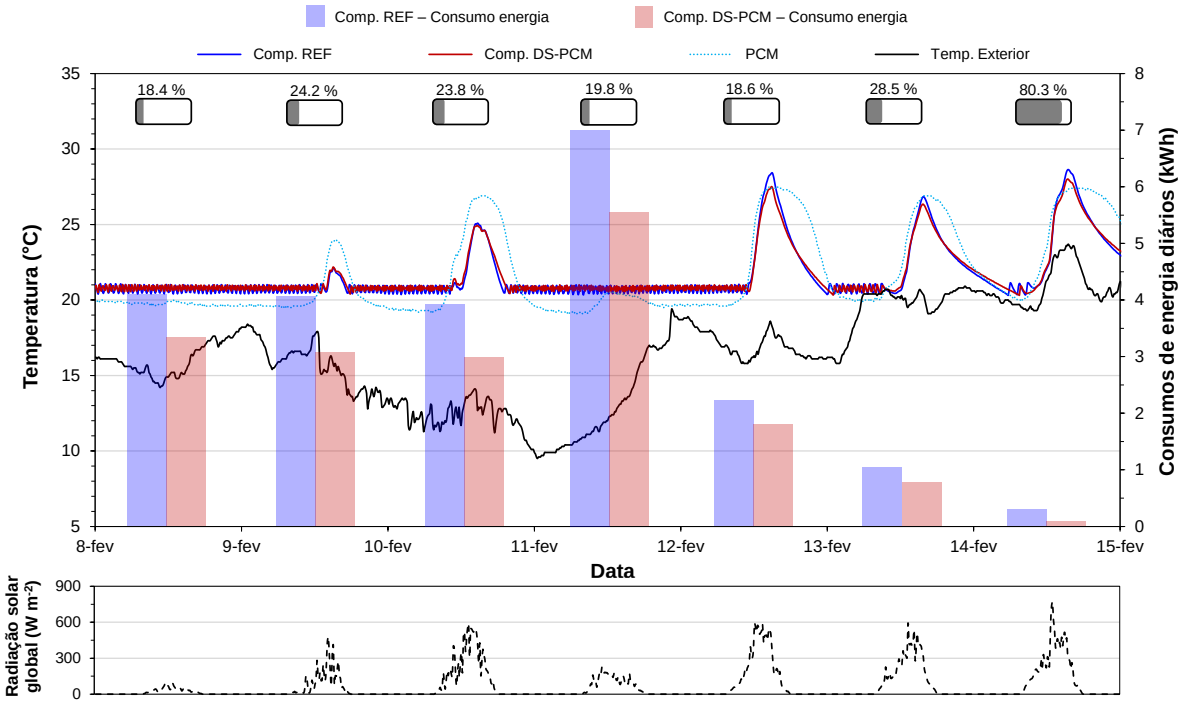


Figura 5 – Resultados preliminares da estratégia de aquecimento.

A Figura 5 mostra que nos dias em que a temperatura do PCM está mais próxima do pico de fusão (particularmente no dia 13 de fevereiro), as diferenças no consumo de energia entre os compartimentos tornam-se mais evidentes. Isto confirma que a energia térmica absorvida pelo material foi libertada para o compartimento, reduzindo a taxa de arrefecimento do ambiente interior e minimizando a duração do funcionamento do sistema de aquecimento para manter o limite inferior de 20°C para o conforto térmico.

O consumo de energia total para o período de monitorização foi de 22.7kWh para o REF e 17.7kWh para o compartimento DS-PCM, sendo que o sistema dinâmico demonstrou uma maior eficiência energética no âmbito desta estratégia e resultou numa poupança diária que varia entre 18% e 29% (uma poupança energética de 80% foi atingida para uma situação especial, onde os valores de consumo são muito baixos e, portanto, pequenas diferenças têm um peso percentual significativo).

4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi realizada uma campanha de monitorização a uma prova de conceito de um novo dispositivo de sombreamento dinâmico com incorporação de PCM (denominado por DS-PCM), para avaliar e comparar o seu desempenho térmico com uma solução equivalente sem PCM, solução de referência (REF), de acordo com diferentes estratégias (arrefecimento e aquecimento; abordagem estática e dinâmica).

Os resultados indicam que, para este estímulo de temperatura, o PCM não teve capacidade para completar o processo de carga e descarga num ciclo diário. No entanto, os resultados demonstram uma capacidade significativa de regulação térmica por parte do PCM, destacando o seu potencial para mitigar o sobreaquecimento interior e promover a eficiência energética, com reduções em até 1.1°C nos picos de temperatura máxima e poupanças energéticas diárias que variam entre 18 e 29%.

Para uma avaliação completa do desempenho térmico do sistema dinâmico, a campanha de monitorização será repetida para a estação de arrefecimento, considerando abordagens alternativas e utilizando diferentes gamas de temperatura de mudança de fase do PCM. Embora a câmara de descarga não tenha sido utilizada nesta fase preliminar da estratégia de aquecimento, esta será incluída nas etapas seguintes da investigação, para promover o aproveitamento da energia térmica acumulada no material diretamente para o interior do compartimento.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi apoiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) – Ref. 2022.12799.BD e pelo Centro de Investigação de Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020]. Este trabalho foi também apoiado pelo Projeto "Agenda ILLIANCE" [C644919832-00000035 | Projeto n° 46], financiado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência no âmbito do *Next Generation EU* da União Europeia.

REFERÊNCIAS

Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. Automation in Construction, 102:195–216. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014.

European Comission (2016). Commission Recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings. Official Journal of the European Union.

Feng, F., Kunwar, N., Cetin, K., O'Neill, Z. (2021). A critical review of fenestration/window system design methods for high performance buildings. Energy and Buildings, 248, 111184. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111184.

Figueiredo, A., Vicente, R., Oliveira, R., Rodrigues, F., Samagaio, A. (2020). Multiscale Modelling Approach Targeting Optimisation of PCM into Constructive Solutions for Overheating Mitigation in Buildings. Applied Sciences, 10 (22). https://doi.org/10.3390/app10228009.

Ganesh, G. A., Sinha, S. L., Verma, T. N., Dewangan, S. K. (2021). Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review. Building and Environment, 204, 108146. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108146.

GEVACRIL® (2023). Gevacril All cast acrylic products in PMMA – technical properties.

Huang, Y., El Mankibi, M., Cantin, R., Coillot, M. (2021). Application of fluids and promising materials as advanced inter-pane media in multi-glazing windows for thermal and energy performance improvement: A review. Energy and Buildings, 253, 111458. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111458.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). IPCC press release AR6 - Climate change widespread, rapid, and intensifying. Climate Change 2021: The Physical Science Basis:1–6.

ISO - International Organization for Standardization (1998). ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15 (3):259–263. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130.

Liu, Z., Hou, J., Wei, D., Meng, X., Dewancker, B. J. (2022). Thermal performance analysis of lightweight building walls in different directions integrated with phase change materials (PCM). Case Studies in Thermal Engineering, 40, 102536. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102536.

Ringel, M., Knodt, M. (2018). The governance of the European Energy Union: Efficiency, effectiveness and acceptance of the Winter Package 2016. Energy Policy, 112:209–220. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.047.

RUBITHERM® (2020). Data sheet - Rubitherm RT28HC.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARATERIZAÇÃO MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM AREIAS DA ILHA DE SÃO MIGUEL

Vidália Maria Cordeiro Miranda [a]; Luís Miguel Fernandes Teixeira [a]; André Almeida Santos [a]; Lisandra Câmara Miranda [a]; João Manuel Correia Pimentel [a]

[a] Laboratório Regional de Engenharia Civil - Rua de São Gonçalo s/n, 9500-343 Ponta Delgada, Açores, Portugal, lrec@azores.gov.pt, vidalia.mc.miranda@azores.gov.pt, luis.mf.teixeira@azores.gov.pt, andre.a.santos@azores.gov.pt, lisandra.c.miranda@azores.gov.pt, joao.mc.pimentel@azores.gov.pt.

RESUMO

A construção do edificado no Arquipélago dos Açores tem especificidades genéricas e específicas de cada uma das nove ilhas, e que são distintas de Portugal Continental, abordando-se no presente artigo um estudo efetuado pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (LREC - Açores), sobre as argamassas tradicionais de reboco da ilha de São Miguel.

Os objetivos consistiram na caracterização mecânica de nove tipos de argamassas tradicionais cimentícias de reboco. A metodologia adotada consistiu numa campanha experimental com realização de ensaios em argamassas no estado fresco e no estado endurecido aos 7 e 28 dias de idade. De forma a tentar entender como os materiais locais afetam o comportamento dessas argamassas, foram formulados nove tipos de argamassas que se distinguem essencialmente pela natureza do agregado e traço volumétrico de cimento e areia.

Como expectável, verificou-se que as argamassas com traço mais rico em ligante e com menores relações água/cimento, possuem maior massa volúmica aparente e maiores resistências mecânicas. Verificou-se ainda que argamassas com areia do mar necessitam de maiores quantidades de água de amassadura para se garantir a consistência adequada e que, com traços mais pobres em cimento, tendem a apresentar maior ductilidade. Por sua vez, argamassas com areia prefabricada de tufo apresentam em geral maiores resistências mecânicas.

PALAVRAS-CHAVE

Argamassas tradicionais, argamassas de cimento, resistências mecânicas, rebocos, Açores

1 INTRODUÇÃO

Os edifícios de construção recente apresentam, em geral, uma estrutura de betão armado que é preenchida por painéis de alvenaria de tijolo cerâmico ou de bloco de betão. Na ilha de São Miguel, as paredes de alvenaria são constituídas por blocos de betão de bagacina. Para garantir as condições de conforto, estética e a impermeabilização, no caso de paredes exteriores, estas são revestidas com argamassa de reboco.

Os rebocos tradicionais realizados na ilha de São Miguel são constituídos por argamassas doseadas e preparadas em obra e são constituídas, em geral, por cimento Portland composto de pozolana Natural CEM II/B-P 32,5 N, água, agregado e, eventualmente, adjuvantes e aditivos para melhorar determinadas características. Em termos de trabalhos de investigação destas argamassas, foi realizado um levantamento em obra das soluções de reboco correntemente aplicadas e uma campanha experimental de ensaios de aderência de oito soluções de reboco de cimento e areia do mar com traço volumétrico de 1:3 (Miranda, 2004). Depois, e para aumentar o conhecimento destas argamassas face aos problemas de fissuração dos rebocos, foi realizada no Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) - Açores uma campanha experimental de ensaios de flexão e compressão dessas argamassas, com os tipos de areias comercializadas na ilha de São Miguel – Açores e para os traços volumétricos de cimento e areia 1:2, 1:3 e, 1:4 (Santos e Miranda 2014).

O presente artigo pretende divulgar na comunidade científica este último trabalho desenvolvido pelo LREC e que é explanado no Relatório 76/2014 intitulado “Caracterização mecânica de argamassas com areias da ilha de São Miguel ((Santos e Miranda 2014), do qual se apresentam figuras, quadros e informação relevante. A metodologia adotada consistiu numa campanha experimental que começou com a definição e caracterização dos constituintes das argamassas, seguindo-se as formulações, amassaduras e fabrico de provetes prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, cura e ensaios de argamassa no estado fresco (consistência do espalhamento, de acordo com a norma EN 1015-3) e no estado endurecido aos 7 e 28 dias de idade (Massa volúmica aparente, resistências à flexão e à compressão, de acordo com a EN 1015-11). Os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos, bem como são tecidas as principais conclusões.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

De seguida apresenta-se uma breve descrição e caracterização dos constituintes das argamassas deste projeto.

2.1.1 Agregados

De acordo com a Figura 1, observa-se os dois tipos de areia utilizados nas argamassas tradicionais na ilha de são Miguel, designadamente a areia natural dragada do mar (AM) e a areia de tufo ou areia prefabricada (AP), uma vez que resulta da “crivação” do tufo vulcânico. Por observação da Figura 1, salienta-se que a areia do mar apresenta uma heterogeneidade mais acentuada, podendo conter vestígios de pedra-pomes, bagacina, conchas e outros resíduos.

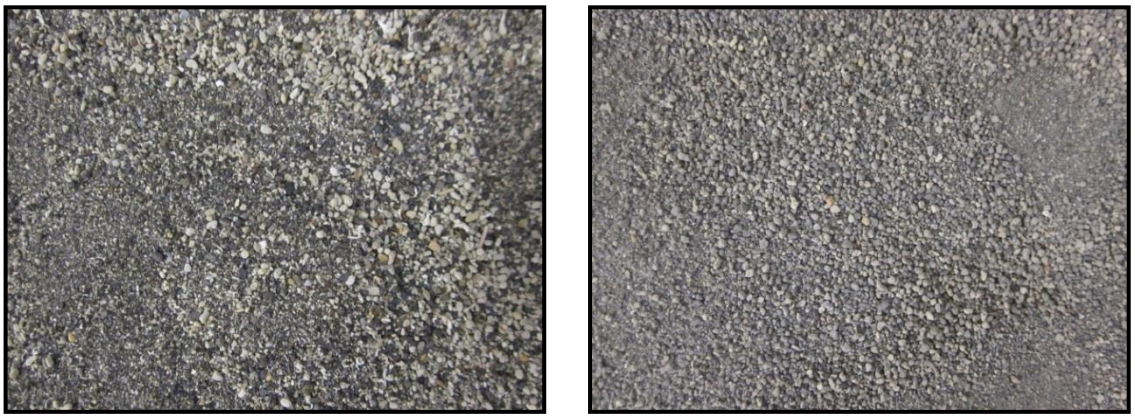


Figura 1 - Areia do mar (à esquerda) e areia prefabricada (à direita).

Para estes dois tipos de areia e de acordo com a Norma EN 933-1, efetuou-se no LREC as análises granulométricas através do método de peneiração. Na Figura 2 apresenta-se, assim, as respetivas curvas granulométricas das areias utilizadas neste projeto.

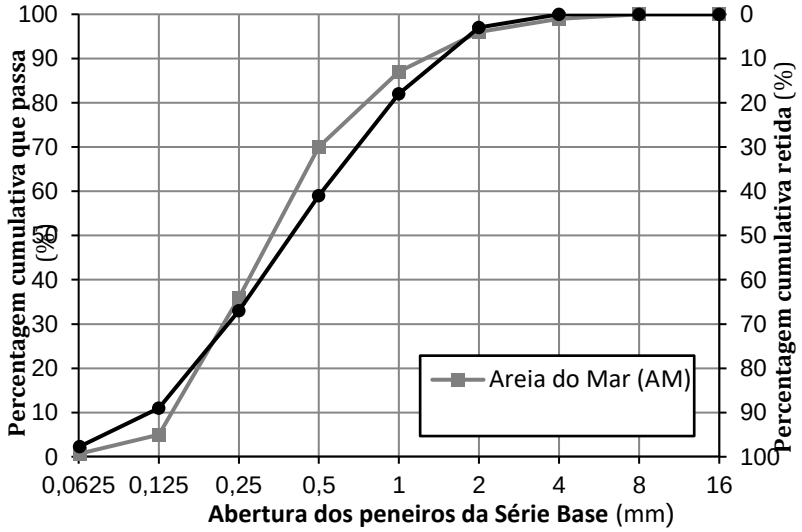


Figura 2 – Curvas granulométricas das areias.

De acordo com a Figura 2, é possível observar que ambas as areias apresentam granulometrias continuas, que se caraterizam pela distribuição uniforme das partículas pelas diversas frações, apesar da areia prefabricada apresentar maior percentagem de finos, 2,3 % passados no peneiro de 63 µm, acima do triplo da percentagem determinada para a areia do mar (0,7 %).

Para efeitos deste estudo das argamassas, as areias foram utilizadas conforme entregues, ou seja, sem qualquer lavagem, mas foram peneiradas em laboratório, de modo a garantir que só se iria utilizar dimensões inferiores ao peneiro com abertura de 2,36 mm. A dimensão da malha de peneiração resultou duma pesquisa do mercado das malhas de peneiração mais vendidas para utilização em obras na ilha. Por observação da Figura *3*, verificou-se que 50 % destas malhas encontravam-se entre 2 e os 3 mm. Assim, optou-se por escolher uma malha intermédia, pelo que se usou o peneiro com abertura de 2,36 mm.

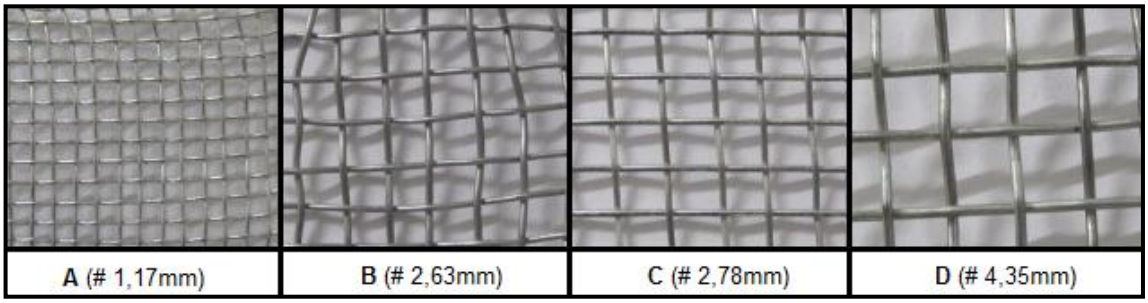


Figura 3 – Malhas de peneiração avaliadas.

As areias utilizadas no fabrico das argamassas foram previamente secas em estufa e repartidas através de um repartidor. Para um maior rigor na dosagem destes constituintes das argamassas, foram determinadas as suas baridades de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002). Para a areia do mar e areia prefabricada, obtiveram-se valores de baridade de cerca de 1265 kg/m^3 e 1246 kg/m^3, respetivamente.

2.1.2 Ligante Hidráulico

O ligante hidráulico utilizado na composição das argamassas foi o cimento Portland composto de pozolana Natural, designado CEM II/B-P 32,5 N, de acordo com a EN 197-1 (2001). Os principais constituintes deste cimento são o Clínquer do cimento Portland (65-79 % em massa) e a pozolana natural da ilha de São Miguel (21-35 % em massa). No Quadro 1 apresenta-se a caracterização mecânica do cimento desta campanha no LREC. Procedeu-se também à caracterização física, sendo de realçar a baridade do cimento, determinada segundo a norma NP EN 1097-3 (2002), a qual obteve-se um valor de cerca de 927 kg/m^3.

Quadro 1 – Caracterização mecânica do cimento.

Idade	Resistências (MPa)		Método de ensaio
	Flexão	Compressão	
2 dias	3,5	14,9	NP EN 196 -1 : 2006
7 dias	5,5	28,6	
28 dias	7,4	42,7	

2.1.3 Água de amassadura

A água da amassadura das argamassas foi fornecida pela rede publica com prévia desmineralização em laboratório.

2.2 PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA

2.2.1 Definição das formulações

Nesta campanha foram formulados nove tipos de argamassas, que se distinguem essencialmente pela natureza do agregado e traço volumétrico de cimento e areia. No Quadro 2 apresenta-se os três tipos de argamassas formuladas quanto à natureza do agregado. Por sua vez, para cada uma destas argamassas, adotou-se três traços volumétricos (1:2, 1:3 e, 1:4). Para um maior rigor laboratorial na produção, os traços volumétricos dos diversos constituintes sólidos das argamassas produzidas foram convertidos, através da baridade dos seus constituintes determinadas anteriormente, para traços ponderados em massas. A dosagem de água das argamassas foi determinada experimentalmente, de

forma a obter a consistência e trabalhabilidade necessária para a argamassa, tendo-se definido um espalhamento de 165 ± 10 mm.

Quadro 2 -– Tipos de argamassas formuladas quanto à natureza do agregado.

Designação	Ligante	Areias
AP	Cimento	100 % Areia Prefabricada
APM	Cimento	50 % Areia Prefabricada + 50 % Areia do Mar
AM	Cimento	100 % Areia do Mar

2.2.2 Amassadura, fabrico e cura dos provetes prismáticos

As amassaduras foram realizadas numa misturadora de laboratório, em velocidade lenta durante 150 segundos, seguindo-se uma paragem de 60 segundos de modo a homogeneizar a argamassa manualmente com raspadeira, e, por fim, novamente em velocidade lenta durante 30 segundos. Em primeiro lugar, todos os constituintes sólidos foram pesados numa balança e a água foi medida em provetas graduadas, sendo adicionada aos constituintes sólidos durante os primeiros 15 segundos de funcionamento da misturadora. Em último lugar. previamente à amostra ser ensaiada, a argamassa deve ser novamente homogeneizada manualmente com raspadeira.

Os provetes prismáticos para a realização dos ensaios de resistência, com dimensões de 160 x 40 x 40 mm, foram realizados em moldes triplos e a respetiva cura segundo a EN 1015-11 (1999). Nos primeiros 7 dias, utilizou-se uma câmara climática com controlo de temperatura a 20 ± 2 º C e a uma humidade relativa de 95 ± 5 %; e nos restantes 21 dias, os provetes foram colocados noutra câmara com uma temperatura de 20 ± 2 º C e humidade relativa de 65 ± 5 %. A desmoldagem dos provetes realizou-se aos 2 dias.

2.3 MÉTODOS DE ENSAIOS DAS ARGAMASSAS

A metodologia dos ensaios realizadas nas argamassas no estado fresco e no estado endurecido apresenta-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Ensaios realizados nas argamassas.

Ensaio	Estado da argamassa	Norma
Determinação da consistência (método do espalhamento)	fresco	EN 1015-3 (1999)
Determinação da massa volúmica (1)	endurecido	Adaptada EN 1015- 10 (1999)
Determinação das resistências mecânicas (2)	endurecido	EN 1015-11 (1999)
(1) Previamente ao ensaio de resistência, isto é, provetes não foram secos em estufa; (2) Adotou-se as taxas de compressão respetivas às classes de compressão II, III e IV, respetivamente, para as argamassas com traço volumétrico de 1:4, 1:3 e 1:2.		

3 RESULTADOS E DISCUSÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas em estado fresco e endurecido são apresentados e discutidos para os nove tipos de argamassas, designadas pelo tipo de areia e traço volumétrico, nomeadamente:

- 3 argamassas com 100 % de areia prefabricada (AP), aos traços volumétricos de 1:2, 1:3 e 1:4;
- 3 argamassas com 50 % de areia prefabricada e 50 % de areia do mar (APM), aos traços de 1:2, 1:3 e 1:4;
- 3 argamassas com 100 % de areia do mar (AM), aos traços volumétricos de 1:2, 1:3 e 1:4.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

No Quadro 4 apresentam-se os valores do quociente entre a quantidade de água e a quantidade de cimento (relação A/C), bem como também o valor do espalhamento médio de cada argamassa produzida.

Quadro 4 – Valores da relação água/cimento e espalhamento das argamassas.

Argamassa	Relação A/C	Espalhamento médio [mm]
AP [1:2]	0,85	163
AP [1:3]	1,23	167
AP [1:4]	1,63	163
APM [1:2]	0,87	171
APM [1:3]	1,28	167
APM [1:4]	1,71	169
AM [1:2]	0,90	171
AM [1:3]	1,32	164
AM [1:4]	1,80	156

De acordo com os valores do Quadro 4, é possível verificar que todas as argamassas apresentam espalhamentos dentro do valor definido de 165±10 mm e que para o mesmo traço, são as argamassas com areia do mar (AM) que necessitam de maior quantidade de água, enquanto que s argamassas de areia prefabricada (AP) são as que necessitam de menores quantidades de água para garantir uma boa trabalhabilidade. As argamassas com a mistura das duas areias (APM) situam-se numa posição intermédia. É possível ainda verificar que as argamassas de areia do mar ao traço 1:4, ou seja, AM [1:4], são as que apresentam o valor do espalhamento mais baixo (156 mm). Pois, para espalhamentos mais elevados esta argamassa tendia a apresentar alguma exsudação. Ainda, segundo o Quadro 4, pode-se verificar que para traços mais ricos em cimento, as argamassas necessitam de uma menor quantidade de água de amassadura, uma vez que A/C diminui.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os valores médios da massa volúmica aparente (MVA), das resistências à tração por flexão (Rf) e à compressão (Rc) são apresentados, para os 7 e 28 dias de idade, respetivamente, na Figura 4 à Figura 6.

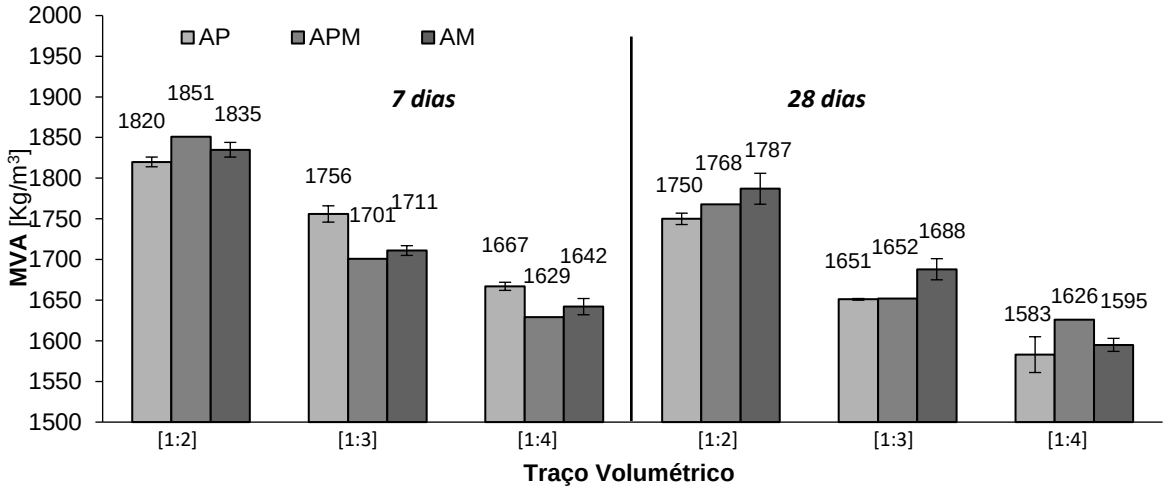


Figura 4 - Massa volúmica aparente aos 7 e 28 dias de idade.

De acordo com Figura 4, observa-se que a massa volúmica aparente apresenta maior expressão para traços volumétricos mais ricos em ligante e, consequentemente, com uma menor relação A/C, implicando assim uma reduzida porosidade. Houve, como era de esperar, uma descida deste valor aos 28 dias face os valores obtidos aos 7 dias que foi originada, essencialmente, pela perda de água associada ao processo de cura dos provetes em câmara climática.

De um modo geral, e de acordo com a Figura 4, é possível verificar que os valores de massa volúmica aparente das diferentes argamassas, com o mesmo traço volumétrico, não apresentam grandes variações entre si, apresentam sim alguma variabilidade na sua ordenação, principalmente aos 7 dias, uma vez que ainda decorrem alterações acentuadas na sua estrutura cristalina em resultado do processo de hidratação do cimento.

Relativamente aos diferentes tipos de argamassa, e tendo em consideração as areias utilizadas na sua formulação, é possível verificar que, aos 28 dias, a argamassa AM tende a apresentar maiores valores de massa volúmica aparente, seguindo-se as argamassas APM e AP, por esta mesma ordem e seguindo o mesmo andamento dos valores obtidos para as baridades das areias, onde a baridade da areia do mar era maior do que a da areia prefabricada.

No que concerne à resistência mecânica, os revestimentos de argamassa devem ser capazes de acompanhar as deformações após o final da aplicação de esforços, sem romperem ou danificarem ao longo do tempo. As tensões impostas no revestimento têm de ser aliviadas por uma deformação suficiente, pois, caso contrário, poderá ocorrer o aparecimento de fendas no revestimento. É neste âmbito que a resistência à tração assume um papel fundamental: deve suportar os esforços de tração induzidos, de modo a evitar a fendilhação do revestimento.

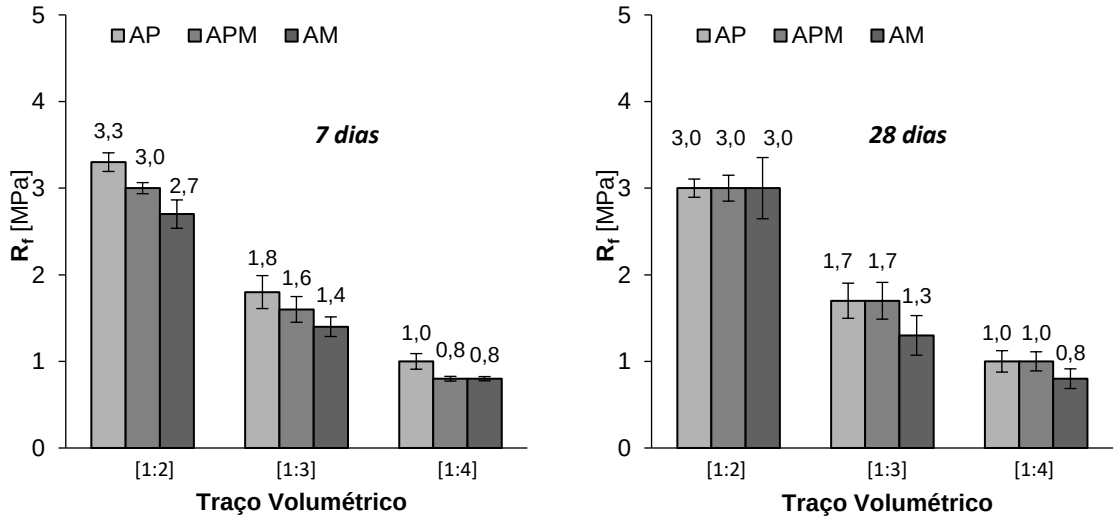


Figura 5 – Resistência à flexão aos 7 e 28 dias de idade.

De acordo com a Figura 5, é possível observar que apesar de aos 28 dias algumas argamassas apresentarem valores da resistência à flexão ligeiramente superiores aos obtidos aos 7 dias, é importante salvaguardar o facto de também apresentarem uma maior incerteza (desvio-padrão).

Como era de esperar e conforme Figura 5, verifica-se que quanto mais ricas em cimento são as argamassas maiores são as suas resistências à flexão. Conclui-se ainda que, ao variar o traço em volume de 1:4 para 1:3, nota-se que as resistências à flexão aumentam para cerca do dobro, quer aos 7 quer aos 28 dias, o mesmo acontecendo ao variar do traço 1:3 para 1:2.

Relativamente ao tipo de areia utilizado na constituição das argamassas, verifica-se que as argamassas com areia prefabricada tendem a apresentar resistências à flexão mais elevadas, seguindo-se as de mistura de areias e as de areia do mar, por esta ordem.

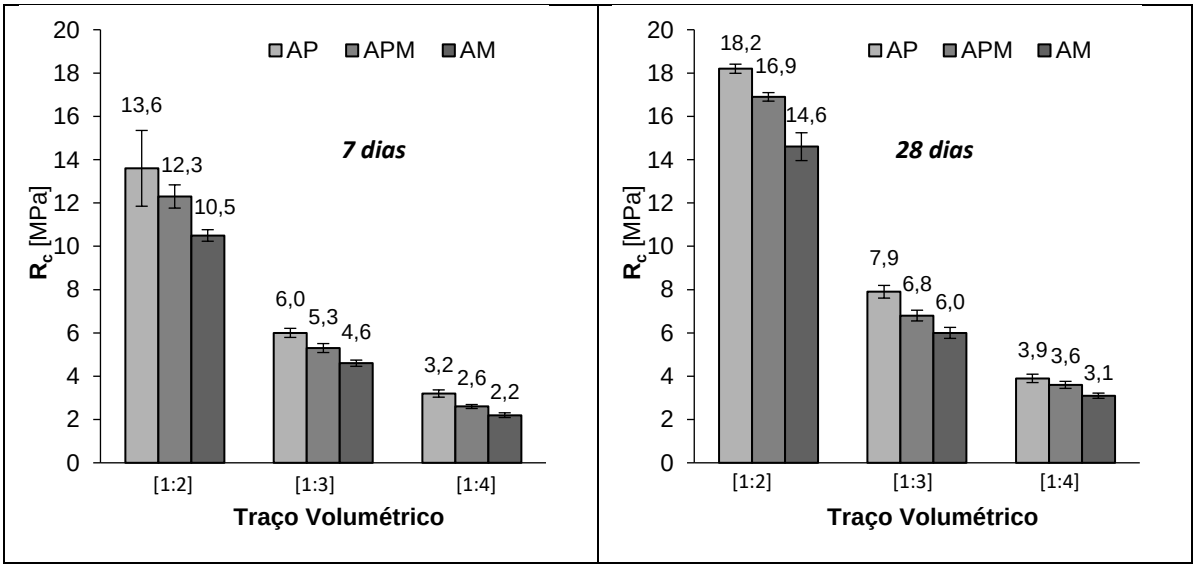


Figura 6 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.

Conforme Figura 6, é evidente que existe um incremento da resistência mecânica das argamassas à compressão dos 7 para os 28 dias de idade. Relativamente ao tipo de areia que as constitui, as argamassas de areia prefabricada (AP) são as que apresentam valores superiores, seguindo-se as argamassas com mistura de areias (APM) e, por último, com menores resistências, as argamassas formuladas com areia do mar (AM). A maior relação água/cimento (A/C), induzindo uma maior porosidade, assim como a existência de pedra-pomes e outros detritos mais frágeis, na areia do mar, podem estar na origem desta perda de resistência associada à fragilidade destes detritos.

De acordo com Veiga (1998), os critérios conhecidos de avaliação da suscetibilidade à fendilhação de argamassas referem-se essencialmente à fendilhação por retração restringida. Contudo, existem dois critérios de avaliação da suscetibilidade à fendilhação, embora com reconhecidas limitações de eficácia e rigor. Um desses critérios é baseado na relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão.

Segundo Veiga (1998), numa argamassa, como é sabido, a resistência à tração é muito inferior à resistência à compressão, sendo, no entanto, a relação entre aqueles dois valores (R_t/R_c) tanto maior (tanto mais próxima de 1) quanto mais dúctil for o material. De facto, a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão é um indicador da ductilidade do material, já que a variação entre a rotura por tração e a rotura por compressão se deve, principalmente, à fragilidade.

Dado que a ductilidade é uma medida da capacidade de deformação do material antes da rotura, é natural que o referido quociente permita de algum modo avaliar a suscetibilidade à fendilhação por retração, ou seja, a capacidade de o revestimento acomodar sem rotura as deformações impostas pelos mecanismos da retração restringida (Veiga, 1998).

Os valores de ductilidade obtidos para os diferentes tipos de argamassa, aos 7 e aos 28 dias, são apresentados na Figura 7, em função do seu traço volumétrico.

Por observação da Figura 7, conclui-se que houve um decréscimo da ductilidade dos 7 para os 28 dias, devido, essencialmente, ao maior aumento da resistência à compressão das argamassas do que a resistência à tração por flexão. Esta última (Rt) concluiu-se anteriormente que aumentava muito ligeiramente dos 7 aos 28 dias. No que concerne ao tipo de areia utilizado, são as argamassas AP que tendem a apresentar, em geral, valores mais baixos de ductilidade do que as argamassas formuladas com areia do mar e de mistura (AM e APM). É ainda importante salientar que as argamassas APM com traço volumétrico de 1:4 apresentam valores muito próximos de ductilidade quer aos 7 quer aos 28 dias, 0,32 e 0,29 respetivamente.

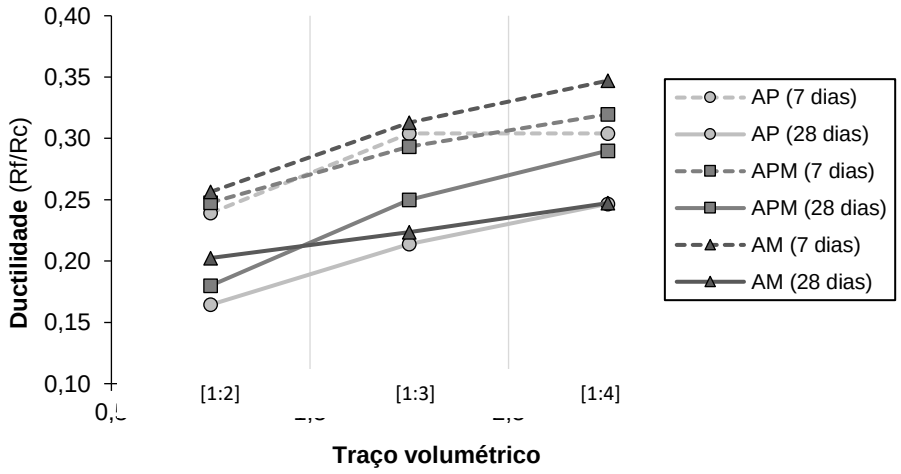


Figura 7 - **Ductilidade das argamassas, aos 7 e aos 28 dias.**

Avaliando as argamassas por traço em volume verifica-se, de acordo com a Figura 7, e sem grande surpresa, que à medida que reduzimos a quantidade de ligante e, consequentemente, aumentamos a relação A/C, aumenta também o valor da ductilidade das argamassas. Ora, este fenómeno é tido como consequência da redução das resistências mecânicas, fundamentalmente das resistências à compressão, para argamassas com menos dosagem de cimento.

4 CONCLUSÕES

Este projeto teve por objetivo a caracterização mecânica de diversos tipos de argamassas tradicionais de reboco que podem ser produzidas em obras nos Açores, mais precisamente na ilha de São Miguel, através da incorporação do cimento e dos tipos de areia fornecidos nesta ilha.

Os resultados dos ensaios mostraram, como seria de esperar, que as argamassas com traço mais rico em ligante e, consequentemente, as argamassas com menores relações água/cimento, são as que possuem maior massa volúmica aparente, e maiores resistências mecânicas. Por sua vez, apresentam uma menor ductilidade.

Relativamente ao tipo de areia utilizado na composição das argamassas, verificou-se que as argamassas com areia do mar necessitam de maiores quantidades de água de amassadura para se garantir a consistência adequada, seguindo-se as argamassas com as duas areias juntas e, e por fim, as argamassas com areia prefabricada de tufo. Quanto ao tipo de areia e aos resultados dos ensaios mecânicos, verificou-se que as argamassas com areia prefabricada de tufo são as que apresentam maiores resistências à flexão e à compressão, seguindo-se as argamassas com mistura de areias e, por fim, as argamassas com areia dragada do mar. Por sua vez, são as argamassas com areia do mar (AM e APM) e com traços mais pobres em cimento que tendem a apresentar maiores valores de ductilidade.

Em termos de trabalhos futuros, seria interessante estender a caracterização deste tipo de argamassas a outros ensaios, por exemplo, de absorção de água, capilaridade e retração. Também, seria importante, caraterizar argamassas com constituintes das outras ilhas dos Açores, com fibras, entre outros.

REFERÊNCIAS

Santos, André, Miranda, Vidália. (2014). Caraterização mecânica de argamassas com areias da ilha de São Miguel, RT 76/2014, LREC, Ponta Delgada

EN 1015-3 European Standard (1999). Methods of test for mortar masonry – part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table), European Committee for Standardization (CEN)

EN 1015-10 European Standard (1999). Methods of test for mortar masonry – part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN)

EN 1015-11 European Standard (1999/A1 2006). Methods of test for mortar masonry – part 10: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN)

EN 933-1 European Standard (1997). Tests for geometrical properties of aggregates – part 1: determination of bulk density of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN)

Miranda, Vidália (2004). Análise da aderência de soluções de reboco tradicional sobre suportes de betão, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Construção pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa

NP EN 1097-3 Norma Portuguesa (2002). Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – parte 3: método para determinação da baridade e dos vazioS, Instituto Português da Qualidade

NP EN 196-1 Norma Portuguesa (2006). Métodos de ensaio de cimentos – parte 1: determinação das resistências mecânicas, Instituto Português da Qualidade

NP EN 197-1 Norma Portuguesa (2001). Cimento – parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes", Instituto Português da Qualidade

Veiga, Maria R. (1998). Comportamento de argamassas de revestimento de paredes – Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LNEC, 1998

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE POR TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS - RESULTADOS PRELIMINARES

Diana P.F Neves[a]; Letícia C. M. Dafico[b], Ricardo M. S. F. Almeida[c], Romeu Vicente[d], Eva Barreira[e]

[a] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201905055@up.pt

[b] CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201911110@up.pt

[c] Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses 3504-510 Viseu, Portugal, ralmeida@estv.ipv.pt

[d] RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal, romvic@ua.pt

[e] CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, barreira@fe.up.pt

RESUMO

A humidade é uma das principais causas de patologias dos edifícios, levando frequentemente à degradação dos elementos construtivos. Consequentemente, técnicas de ensaio não destrutivas são necessárias para diagnosticar e prevenir o dano causado pela humidade. A termografia de infravermelhos (TIV) tem um grande potencial para mapear a humidade em edificações, mas carece de critérios quantitativos que relacionem as diferenças entre as temperaturas superficiais e os teores de humidade. Este trabalho apresenta os resultados de ensaios realizados com a TIV e o método gravimétrico para avaliar a correlação entre o gradiente de temperatura entre a zona seca e a zona molhada de provetes de argamassa e o respetivo teor de humidade, considerando três cenários de temperatura e humidade relativa do ar: Cenário I – 20ºC e 70%, Cenário II – 25ºC e 60%, Cenário III – 15ºC e 80%.

Os resultados mostram que o gradiente de temperatura máximo é diferente nos vários cenários analisados, atingindo os valores de 2.25°C, 3.14°C e 1.31°C, nos cenários I, II e III, respetivamente. Verificou-se ainda que, existe uma correlação elevada entre o gradiente de temperatura máximo e o teor de humidade para os três cenários considerados, sendo o modelo de regressão quadrático o que melhor se ajusta aos valores medidos.

Palavras-chave: termografia de infravermelhos, método gravimétrico, teor de humidade

1 INTRODUÇÃO

A humidade é um dos problemas mais comuns dos edifícios, representando aproximadamente 70% das patologias observadas (Bomberg e Brown, 1993). Pode ter várias causas, como a utilização de materiais inadequados, especificação inadequada na fase de projeto, execução deficiente, não cumprindo as indicações do projeto, ou mesmo eventuais erros de utilização. Problemas relacionados com a humidade têm várias consequências, não só para o bem-estar dos utilizadores, mas também para o próprio edifício, resultando na diminuição da sua durabilidade e salubridade.

Sendo um problema tão recorrente, é necessário definir procedimentos, não só que garantam a eficácia das soluções de reparação, mas sobretudo, que garantam a sua prevenção. É, assim, essencial proceder ao correto diagnóstico desse tipo de patologia. Desta forma, torna-se crucial que existam métodos de diagnóstico de fácil utilização e com precisão relativamente elevada, que permitam estabelecer de forma fiável a gravidade e extensão dos problemas (Rosina, 2018).

A termografia de infravermelhos (TIV) tem vindo a ser aplicada a diversas áreas da Engenharia Civil, nomeadamente, ao estudo de problemas relacionados com destacamentos e vazios (Garrido et al., 2022; De Freitas et al., 2014; Milovanoviće e Pecur, 2016); com o desempenho térmico e a eficiência energética dos edifícios (Mahmoodzadeh et al., 2022; Sfarra et al., 2019); e com fissuração (Freitas et al., 2014; Bauer e Pavón, 2016). Também permite detetar humidade em materiais e elementos construtivos, pois alterações no teor de humidade estão relacionadas com variações da temperatura superficial (Barreira e Almeida, 2019; Dafico et al. 2022).

Apesar da utilização da TIV para a deteção de humidade ser cada vez mais frequente, ainda não se estabeleceu uma correlação abrangente entre o teor de humidade dos materiais e o respetivo gradiente da temperatura superficial nas zonas seca e molhada. Por outro lado, ainda que a TIV permita avaliar a extensão da humidade nas superfícies, porque fornece uma imagem 2D, há estudos que mostram que a deteção da humidade através desta técnica é sobretudo superficial (Cárdenas-Del Campo et al., 2019), o que se pode traduzir numa limitação na aplicação deste método.

Desta forma, procura-se com este artigo colmatar uma das falhas no conhecimento nesta área, nomeadamente, procura-se avaliar possíveis correlações entre o gradiente de temperatura entre a zona seca e a zona molhada de provetes de argamassa e o respetivo teor de humidade, considerando três cenários de temperatura e humidade relativa do ar.

2 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados em provetes de argamassa pré-doseada para reboco interior, preparada de acordo com a ficha técnica do produto, e cujas principais propriedades se indicam no Quadro 1. Foram moldados 9 provetes com 21x21x2 cm^3 que, após cura, foram impermeabilizados em 5 das suas faces (as laterais, com 21x2 cm^2, e a posterior, com 21x21 cm^2) e colocados numa estufa a 70ºC até estabilização da massa (variação entre duas medições espaçadas de 24h inferior a 0.1%).

Depois de retiradas da estufa e avaliada a massa do material seco, 6 provetes foram totalmente imersos em água, 3 até estabilização da massa, assumindo-se 100% saturados, e 3 até um teor de humidade correspondente a cerca de 50% de saturação. Os restantes 3 foram avaliados totalmente secos. Cada conjunto de 3 provetes (100% saturado, 50% saturado e seco) foram colocados no interior de uma câmara climática, considerando 3 cenários de temperatura e humidade relativa ambiente: (i) Cenário I – 20°C e 70%, (ii) Cenário II – 25°C e 60%, (iii) Cenário III – 15°C e 80%. Para cada cenário, foi avaliada a presença de humidade através da TIV e do método gravimétrico, de acordo com a Figura 1.

Quadro 1 – Principais propriedades da de argamassa pré-doseada para reboco interior utilizada

Densidade (pó)	1500 ± 200 kg/m³
Densidade (pasta)	1750 ± 200 kg/m³
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 6 N/mm^2
Capilaridade (28 dias)	> 0,40 kg/m^{2}min$^{0.5}$
Permeabilidade ao vapor (28 dias)	μ ≤ 15
Condutibilidade térmica (λ10,seco)	0,8 W/mK

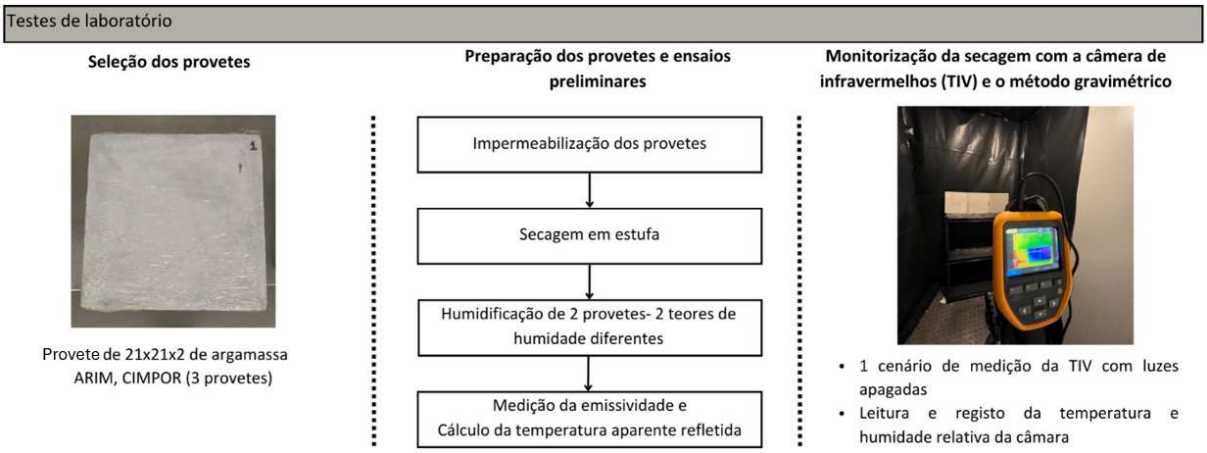


Figura 1 – Etapas dos ensaios laboratoriais

Os provetes e a água utilizada para a sua humidificação foram colocados, antes do início dos ensaios, no interior da câmara climática para garantir o equilíbrio térmico. A superfície interior da câmara climática foi forrada com lona preta para evitar reflexões durante os ensaios e foi marcada a posição dos provetes no suporte para garantir que eram colocados na mesma posição após a pesagem.

As principais características da câmara termográfica utilizada nos ensaios são indicadas no Quadro 2. Todas as imagens térmicas foram corrigidas utilizando o software da câmara, considerando a emissividade da argamassa, medida de acordo com a ASTM C1371 (2004), e a temperatura aparente refletida, medida de acordo com a ASTM E1862 (1997). Para cada provete, a temperatura superficial utilizada para o tratamento quantitativo das imagens térmicas foi a média dos valores pertencentes a um quadrado central com 60 x 60 pixels (Figura 2).

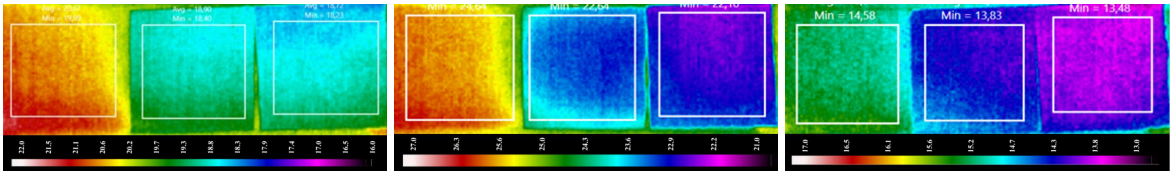
Quadro 2 – Especificações da câmara termográfica utilizada

Sensibilidade térmica	≤ 0,045 °C a 30 °C
Banda espetral	7,5 μm até 14 μm
Resolução IV	320 × 240 (76 800 pixéis)
Distância mínima de focagem	46 cm
Campo de visão	34,1° × 25,6° (H x V)
Resolução espacial (IFOV)	1,86 mRad, D:S 532:1

Foram realizadas 15 a 17 medições (captura de imagem térmica e pesagem do provete), dependendo das condições ambiente para cada um dos cenários. Para cada medição calculou-se o gradiente de temperatura (temperatura média do provete húmido subtraída da temperatura média do provete seco) e o teor de humidade (em kg/kg).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 mostram-se as imagens térmicas tiradas num dos momentos do ensaio, correspondente às primeiras 2 horas de secagem, para os Cenários I, II e III, com os provetes posicionados, da esquerda para a direita, do mais seco para o mais saturado (seco, 50% saturado, 100% saturado).



a b c

Figura 2 – Imagens térmicas correspondentes às primeiras 2 horas de secagem, considerando da esquerda para a direita, o provete seco, 50% saturado e 100% saturado, para: (a) Cenários I (T=20°C e HR=70%); (b) Cenário II (T=25ºC e HR=60%); (c) Cenário III (T=15ºC e HR=80%)

Como se pode observar, existe uma clara diferença entre as temperaturas do provete seco, à esquerda de cada conjunto, e dos provetes húmidos, ao centro e à direita de cada conjunto. Uma vez que a temperatura superficial depende da intensidade de evaporação, que, por sua vez, depende das condições ambiente, observa-se ainda que o gradiente térmico entre os provetes seco e húmidos é maior no Cenário II, com temperatura mais elevada e menor humidade relativa do ar.

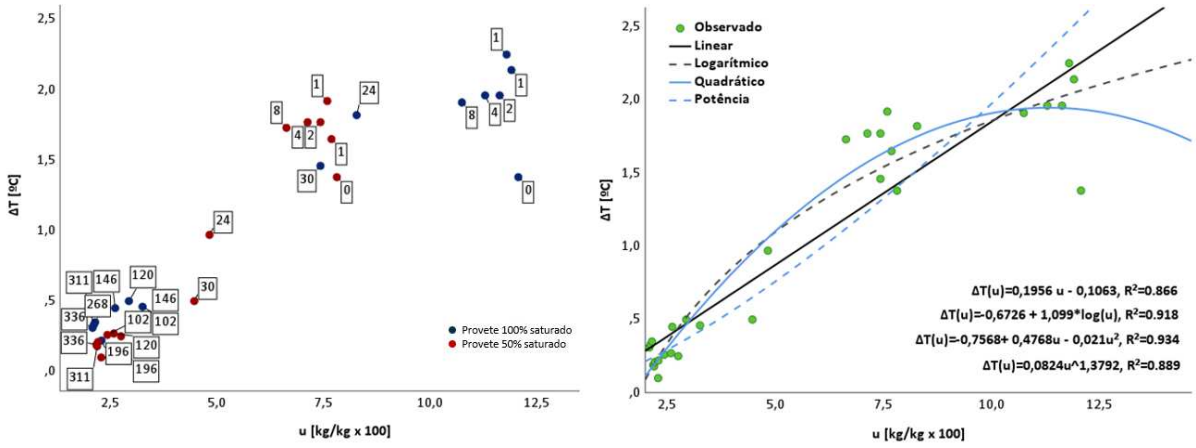
Em todos os cenários, o gradiente vai diminuindo ao longo do tempo, até não se observarem diferenças significativas nas imagens térmicas dos 3 provetes. Para o Cenário I, este momento acontece às 96 horas e para o Cenário II, as diferenças entre imagens térmicas deixam de ser percetíveis mais cedo, às 56 horas. No entanto, para o Cenário III, com piores condições de secagem, a termografia deixa de identificar padrões térmicos às 262 horas, mostrando que a capacidade evaporativa nestas condições é muito baixa.

O gradiente térmico entre o provete húmido e o provete seco, ΔT (°C), e o teor de humidade, u (%), nos três cenários considerados, mostram-se nas Figura 3 a Figura 5, correspondendo as figuras (a) às nuvens de pontos, em que os rótulos dos dados indicam os tempos de medição em horas, e as figuras (b) à análise de regressão realizada. Para cada ambiência, é evidente que quanto menor o teor de humidade do provete, menor é o gradiente térmico registado. Por outro lado, quanto maior o grau de saturação inicial, maior o ΔT, uma vez que os pontos a azul, correspondentes aos provetes 100% saturados, se situam sempre acima dos pontos a vermelho, correspondentes aos provetes 50% saturados (Figura 3a, Figura 4a e Figura 5a).

Embora, genericamente, as variáveis ΔT (°C) e u (%) sigam a mesma tendência em todas as ambiências, decrescendo ao longo da secagem, verifica-se que, nas primeiras horas, o comportamento do teor de humidade é contrário ao do gradiente térmico. Este fenómeno pode ser explicado devido à elevada evaporação que ocorre no início do ensaio, resultante da secagem da água existente na superfície do provete, que potencia o arrefecimento evaporativo e, consequentemente, aumenta o gradiente térmico, sem que isso corresponda a uma variação significativa no teor de humidade do provete. Assim, o ΔT (°C) aumenta rapidamente até um determinado valor, mantendo-se o teor de humidade

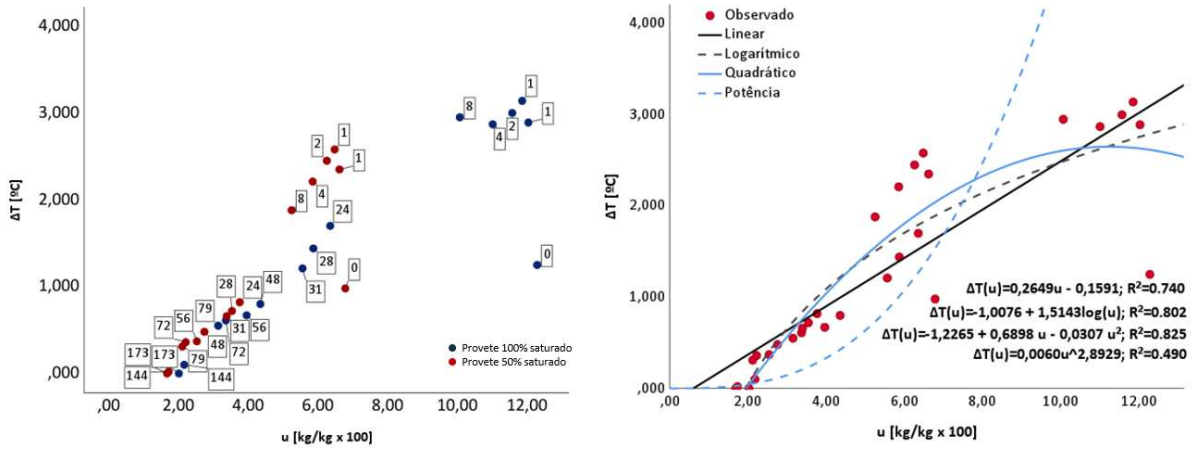
mais ou menos constante. Após esse momento, que varia para os diferentes cenários, o gradiente de temperatura vai diminuindo progressivamente, até deixar de ser visível nas imagens térmicas, correspondendo o teor de humidade ao valor de equilíbrio com a ambiência. Este decréscimo é tanto mais acentuado quanto mais favoráveis são as condições de secagem (temperatura mais alta e humidade relativa mais baixa).

Foi também realizada uma análise de regressão entre as variáveis ΔT (°C) e u (%) para os 3 cenários estudados (Figura 3b, Figura 4b e Figura 5b e Quadro 3). Os resultados mostram que os valores das primeiras horas de secagem condicionam os modelos que melhor se ajustam ao fenómeno. Realmente, considerando o valor do coeficiente de correlação, R^2, verifica-se que o modelo de regressão quadrático é, genericamente, o que se ajusta melhor à nuvem de pontos, existindo também uma boa correlação com o modelo logarítmico. O melhor ajuste verifica-se sempre para o Cenário I, o que poderá significar que não é condicionado pelas condições de secagem, uma vez que o Cenário II é o que corresponde às condições de secagem mais favoráveis.



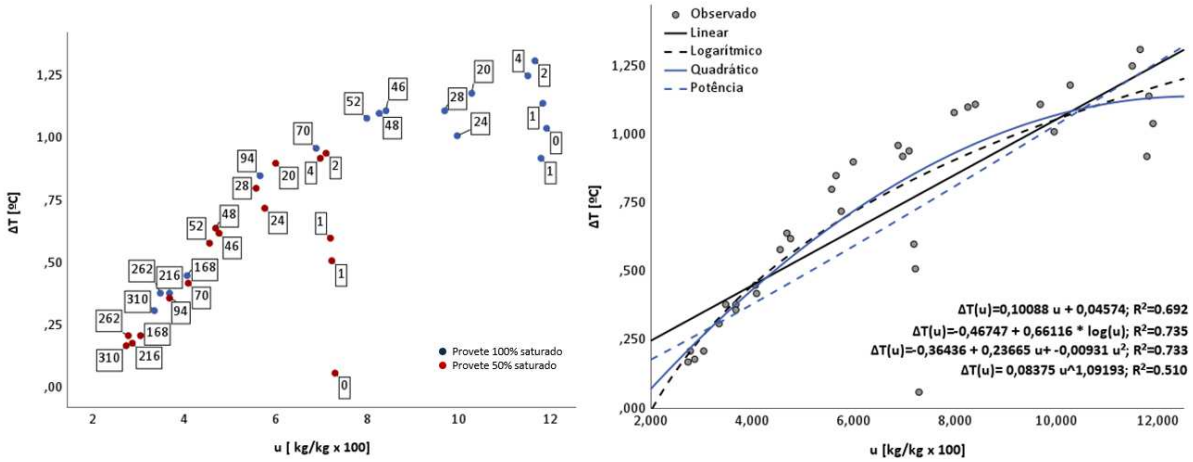
a b

Figura 3 – Diferença de temperatura superficial entre o provete húmido e o provete seco e teor de humidade para o Cenário I (T=20°C e HR=70%): (a) Nuvem de pontos; (b) Curvas de Regressão



a b

Figura 4 – Diferença de temperatura superficial entre o provete húmido e o provete seco e teor de humidade para o Cenário II (T=25°C e HR=60%): (a) Nuvem de pontos; (b) Curvas de Regressão



a b

Figura 5 – Diferença de temperatura superficial entre o provete húmido e o provete seco e teor de humidade para o Cenário III (T=15°C e HR=80%): (a) Nuvem de pontos; (b) Curvas de Regressão

Quadro 3 – Modelos de regressão testados para os diferentes cenários

Modelo de regressão	Cenário I (20°C e 70%)	Cenário II (25°C e 60%)	Cenário III (15°C e 80%)
Linear	0.866	0.740	0.692
Logarítmico	0.918	0.802	0.735
Quadrático	0.934	0.825	0.733
Potência	0.889	0.490	0.510

4 CONCLUSÕES

Com este trabalho é possível concluir que o processo de secagem pode ser avaliado através da termografia de infravermelhos, existindo uma correlação entre o gradiente térmico entre o provete húmido e o provete seco, ΔT (°C), e o teor de humidade, u (%), diminuindo ambas com a secagem, independentemente das condições climáticas.

Os resultados mostram também que o gradiente de temperatura máximo é diferente nos vários cenários analisados, atingindo os valores de 2.25°C, 3.14°C e 1.31°C, nos cenários I, II e III, respetivamente. Verificou-se ainda que, dos modelos de regressão testados, o que apresenta melhor ajuste, para os três cenários considerados, é o quadrático, possivelmente devido ao comportamento da correlação dos 2 parâmetros no início do processo de secagem. Contudo, mesmo no modelo quadrático, observa-se alguma variabilidade no valor do coeficiente de correlação obtido para o ajuste nos diferentes cenários.

Por fim, destaca-se que as equações encontradas para os modelos de regressão de cada cenário aplicam-se apenas ao material e às condições ambientais testadas. Contudo, procedimentos semelhantes àqueles da metodologia deste trabalho podem ser adotados para obtenção de equações que se apliquem a outros materiais e condições ambientais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). L. C. M. Dafico agradece o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo financiamento da bolsa de doutoramento 2022.11621.BD.

REFERÊNCIAS

ASTM C1371 (2004). Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. ASTM International

ASTM E1862 (1997). Standard Test Method for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. ASTM International

Barreira, E., Almeida, R.M.S.F. (2019). Infrared Thermography for Building Moisture Inspection. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-75386-7

Bauer, E., Pavón, E. (2016). Inspeção Termográfica de Fachadas - Investigação da Influência da Fissuração. Anais do 2.º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2016. 1433-1441.

Bomberg, M., Brown, W. (1993). Building Envelope: Heat, Air and Moisture Interactions.

Cárdenas-Del Campo, P., Soto-Lara, F., Marín-Granados, M. (2019). Description of moisture thermal patterns in concrete for the thermal inspection method by infrared thermography, Lect. Notes Mech. Eng. 1. 622-631. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_60

Dafico, L.C.M., Barreira E., Almeida, R.M.S.F., Carasek, H. (2022). Comparison of Infrared Thermography and Other Traditional Techniques to Assess Moisture Content of Wall Specimens. Sensors. 22(9):3182. https://doi.org/10.3390/s22093182

De Freitas, S.S., De Freitas, V.P., Barreira, E. (2014). Detection of façade plaster detachments using infrared thermography - A non-destructive technique, Constr Build Mater. 70. 80–87. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.094

Freitas, J.G., Carasek, H., Cascudo, O. (2014). Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura, Ambiente Construído. 14. 57–73. https://doi.org/10.1590/s1678-86212014000100006

Garrido, I., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F., Lagüela, S. (2022). Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building façades, Infrared Phys Technol. 121. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.104012

Mahmoodzadeh, M., Gretka, Lee, V. I., Mukhopadhyaya, P. (2022). Infrared thermography for quantitative thermal performance assessment of wood-framed building envelopes in Canada, Energy Build. 258. 111807. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111807

Milovanović, B., Pečur, I.B. (2016). Review of active IR thermography for detection and characterization of defects in reinforced concrete, J Imaging. 2. 1–27. https://doi.org/10.3390/jimaging2020011

Rosina, E. (2018). When and how reducing moisture content for the conservation of historic buildings. A problem solving view or monitoring approach. Journal of Cultural Heritage. 31 S82-S88. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.023

Sfarra, S., Cicone, A., Yousefi, B., Ibarra-Castanedo, C., Perilli, S., Maldague, X. (2019). Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools. Energy Build. 182 159–171. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.017

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REUSO DE SACOS DE CIMENTO PORTLAND COMO ISOLANTE TERMOACÚSTICO

Ricardo Soares[a]; Albano Neves e Sousa[b]

[a]Instituto Federal do Alagoas, Rua Odilon Vasconcelos, 57035-660, Maceió, Alagoas, Brasil, ricardo.soares@ifal.edu.br

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, albano.n.e.sousa@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Considerando os danos ambientais causados pelas atividades da construção civil e a busca por conforto no ambiente construído, este trabalho apresenta uma metodologia que visa minimizar as consequências causadas pela disposição das embalagens contaminadas com cimento *Portland*, através da reutilização das mesmas, processadas e inclusas no preenchimento de vazios de tijolos, aumentando a sua massa e melhorando o seu desempenho acústico. Faz parte deste trabalho a obtenção de um subproduto oriundo de sacos contaminados com cimento *Portland*, após ação de solução de hidróxido de sódio (NaOH), com otimização da massa volumétrica dos sacos e verificação da sua condutibilidade térmica. O material obtido também foi caracterizado quanto à densidade, composição e termogravimetria, sendo o objetivo estudá-lo como isolante termoacústico. Cada tijolo com dimensões de 30x20x9cm consumiu cerca de 11 sacos processados, aumentado a massa em até 27%, melhorando o desempenho acústico cerca de 5dB. Foi verificado que o material resultante dos sacos processados apresentou condutibilidade térmica na ordem de 0,04 a 0,08W/m.°C, podendo melhorar significativamente o isolamento térmico do tijolo. Os resultados demonstram que o procedimento proposto permite o reuso progressivo de sacos descartados, sendo uma alternativa viável, evitando a disposição inadequada e incineração com emissões de gases como o CO_2.

Palavras-Chave: Isolamento acústico, Isolamento térmico, Reaproveitamento de resíduos, Sacos de cimento.

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que, no Brasil, tenham sido descartadas quase 900 milhões de embalagens contaminadas com cimento *Portland* em 2021 (SNIC, 2021). Este cenário resulta da dificuldade para logística reversa, da limitação de opções para reuso e da disposição inadequada destas embalagens, as quais, sendo consideradas resíduos perigosos (ABRECON, 2014), são, em geral, destinadas à incineração térmica, com os elevados custos associados (Vieira, 2012) e também com impactos ambientais significativos (Me *et al*., 2019; Nelles, 2020).

O desenvolvimento de tecnologias para redução do impacto ambiental causado pela construção civil é uma preocupação atual em diversas geografias. O Pacto Ecológico Europeu (COM, 2019), por exemplo, que tem como objetivo último alcançar a neutralidade climática até 2050, encoraja novas tecnologias para a prevenção de emissões no descarte de resíduos sólidos da construção civil.

Tendo em consideração a necessidade de tecnologias para o reaproveitamento de resíduos sólidos de construção exatamente onde eles são gerados (Addis, 2006), sobretudo aqueles com características mais críticas como os sacos contaminados com cimento *Portland*, o objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica inovadora para o processamento deste tipo de embalagens que confere versatilidade no reuso e permite a utilização combinada com materiais tradicionais da construção de modo a reforçar o seu isolamento termoacústico, e com ganhos de economia.

O conforto acústico no ambiente construído resulta do tratamento da envolvente para atenuar a propagação sonora. O isolamento de ruído aéreo, originado por vozes, música, trânsito rodoviário, ferroviário e aéreo, estaleiros de obras ou fábricas, é, em geral, conseguido através de barreiras, como fachadas, divisórias, portas ou janelas, e será tanto maior quanto mais elevada for a massa destes componentes(Gerges, 2000). Em geral, a massa volúmica dos materiais com utilização corrente na envolvente dos espaços a proteger acusticamente é elevada, pelo que a massa total irá depender das espessuras adotadas, as quais se pretende minimizar.

Um isolante térmico é um material ou substância que reduz a transferência de calor entre dois ambientes com diferentes temperaturas, mantendo uma barreira eficaz contra a condução, convecção e radiação de calor (Callister, 2008). Os isolantes térmicos minimizam a perda ou ganho de calor de um ambiente para outro (ASTM C168, 2022). Alguns materiais de construção tradicionalmente utilizados na envolvente dos espaços interiores têm condutibilidade térmica conhecida elevada, como é o caso do: concreto entre 1,7 e 2,5W/m.°C (Mindess *et. al*., 2003); vidro entre 0,8 e 1,2W/m.°C (ASTM C128, 2019); e tijolo entre 0,6 e 1,0W/m.°C (Ochsner *et. al*., 2016). Assim, em geral, é necessário aplicar materiais de reforço do isolamento térmico.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO

Entre julho e agosto de 2022 foram obtidos sacos de cimento *Portland* composto (25kg) com origem numa obra em curso, os quais foram trasportados para o Laboratório de Construção (LC) do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa. Cerca de 200 sacos foram separados para tratamento e estudos de reaproveitamento. Os sacos de cimento de papel *kraft*, que são ricos em resíduo de cimento, foram introduzidos pelo período de 2 horas numa solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 10% e, em seguida, foram decantados e submetidos, por 4 horas, a secagem a 100°C em estufa Icamo – 11 litros. Após secagem e efeito do NaOH na celulose do papel (inchamento), a polpa endurecida, sob efeito do resíduo de cimento, foi triturada num liquidificador Moulimex com 4

lâminas e 300W de potência, obtendo-se um material macroscopicamente heterogêneo e de baixa granulometria para fins de reforço, nomeado nesta investigação de "subproduto" (Figura 1).

Figura 1 – Processo de produção do subproduto

O subproduto foi caracterizado quanto a:

a) Condutibilidade térmica, sendo os ensaios realizados de acordo com o especificado na norma européia EN 12667:2001 –*Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance*. Para este ensaio, o subproduto foi separado com uma peneira de 1mm, obtendo a moagem grossa (A1) e a moagem fina (A2), considerando que as partes maiores teriam mais vazios, podendo fazer diferença em relação à parte mais fina. Os provetes foram previamente condicionados num ambiente caracterizado por uma temperatura de (23 ± 2)°C e uma umidade relativa de (50 ± 5)%. Os ensaios de determinação da condutibilidade térmica decorreram num ambiente de características idênticas ao ambiente de condicionamento inicial ([23 ± 2]°C; [50 ± 5]%). Os provetes foram ensaiados à temperatura média de (10,0 ± 0,3)°C, num equipamento fluximétrico da marca TAURUS, modelo TCA 500 P.

b) Densidade dos sacos e das partes A1 e A2 do subproduto, utilizando um recipiente com capacidade de 100cm³, um jogo de peneira para granulometria de solo e uma balança Kern FK8, com precisão de 0,1g.

c) Termogravimetria (TGA), utilizando equipamentos TGA-51 /DSC-60 da marca Shimadzu.

d) Composição através de Espectroscopia por Infravermelho, utilizando espectrofotômetro com Transformação de Fourier – FTIR modelo IRAffnity-1 Shimadzu.

2.2 Aplicação do Subproduto como Isolante Acústico

Considerando a lei acústica da massa (Gerges, 2000), foram preenchidos 16 tijolos cerâmicos furados, com dimensões de 30x20x9cm, com a parte mais densa do subproduto (A2). Ou seja, os espaços vazios dos tijolos, com volume total de aproximadamente 1.920cm³ por tijolo, foram preenchidos com o subproduto e em seguida fechados nos dois lados com argamassa industrializada para assegurar a estanqueidade (Figura 2).

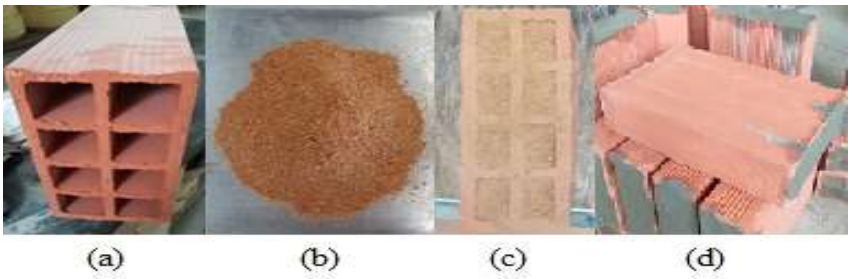


Figura 2 – Tijolo (a), subproduto (b), tijolo preenchido (c) e fechado (d)

Foram verificadas as massas superficiais, M (kg/m^2),dos tijolos vazios (Figura 2.a) e preenchidos (Figura 2.d) e foi utilizada a Equação 1 (EN12354-1) para estimar o índice de redução sonora (R).

$$R = 37{,}5 \log(M) - 42\text{dB} \qquad (1)$$

Posteriormente, os tijolos foram ensaiados, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), em Lisboa, de acordo com a norma ISO 16283-1:2018 - *Acoustics - Field measurement of acoustic insulation in buildings and building elements. - Part 1: Airborne noise isolation*. Foi avaliado e comparado o desempenho de duas alvenarias de aproximadamente 5,5m², sendo uma executada, em primeiro lugar, com tijolos do mesmo tipo vazios, e outra, obtida pela substituição na primeira de 16 tijolos centrais, os quais foram preenchidos com o subproduto (Figura 3).

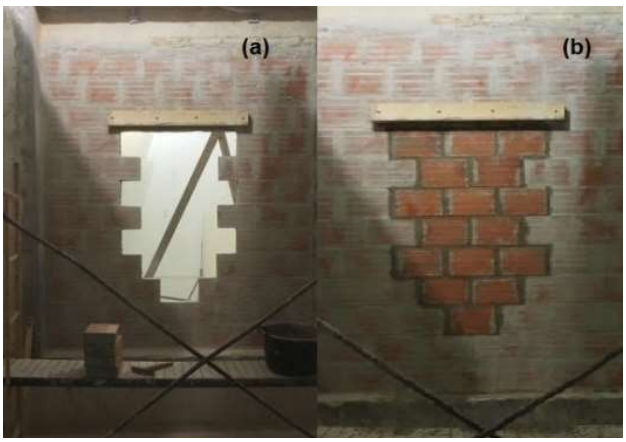


Figura 3 – Tijolos vazios retirados (a) e substituídos pelos 16 tijolos com subproduto A2 (b)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO

Após trituração, as partículas acima de 1mm foram separadas com o jogo de peneira, avaliando uma amostragem A1 de aproximadamente 730g. Menos de 20% desta quantidade, apresentou partículas entre 1 e 10mm. Um total de 457g de material ficou retido nas malhas entre 0,25 e 0,50mm e o restante subproduto da amostragem A2 ficou retido nas demais peneiras. Observou-se, nos resultados calculados, que mais de 80% da amostra A2 apresentou granulometria no intervalo de 0,125 a 0,50mm.

3.2 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

As partes A1 e A2 apresentaram valores máximos de condutibilidade térmica relativamente baixos, de 0,453W/(m.°C) e 0,868W/(m.°C), respectivamente (Quadro 1).

Quadro 1 - Valores individuais obtidos nos ensaios de determinação da condutibilidade térmica (LNEC, 2023)

Provete	Características do provete			Condições de ensaio					Resultados dos ensaios
	Sequência de ensaio	Espessura de ensaio (mm)	Massa após condic. (g)	Direção e sentido do fluxo	Temp³ média (°C)	Queda de temp³ (°C)	Densidade de fluxo de calor (W/m²)	Variação relativa de massa durante o ensaio (kg/kg)	Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]
A1 (Moagem grossa)	1º ensaio	158,18	28,10	Vertical, ascendente	10,0	11,5	18,042	0,001	0,0442
	1º ensaio ren 1(*)	158,18	28,10		10,0	11,5	18,103	0,001	0,0441
	Após 7 meses	158,94	28,05		9,9	11,5	18,001	0,001	0,0439
	Após 7 meses ren 1(*)	158,94	27,99		9,9	11,5	17,900	0,001	0,0436
	Após enchimento	182,14	28,10		10,0	11,5	18,397	0,001	0,0450
	Após enchimento ren 1(*)	182,14	27,99		10,0	11,4	18,191	0,001	0,0445
	Após 2º enchimento	203,76	28,13		10,0	11,5	18,528	0,001	0,0453
	Após 2º enchimento ren 1(*)	203,76	28,10		10,0	11,5	18,555	0,001	0,0453
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
A2 (Moagem fina)	1º ensaio	1023,29	29,02	Vertical, ascendente	9,9	11,2	30,651	0,000	0,0791
	1º ensaio ren 1(*)	1023,29	28,72		9,9	11,1	30,892	0,000	0,0796
	Após 7 meses	1069,51	29,52		10,0	11,2	32,794	0,000	0,0862
	Após 7 meses ren 1(*)	1069,51	29,37		10,0	11,2	32,758	0,000	0,0856
	Após enchimento	1099,09	29,61		10,0	11,2	32,727	0,000	0,0868
	Após enchimento ren 1(*)	1099,09	29,40		10,0	11,1	32,709	0,000	0,0863
	Após enchimento ren 2(*)	1099,70	29,29		10,0	11,2	32,668	0,000	0,0852
	Após enchimento ren 3(*)	1099,70	29,01		10,0	11,3	32,724	0,000	0,0843

* - Repetição do ensaio após o provete ser remexido

Comparando os resultados do Quadro 1 com valores usuais e mínimos de referência para materiais tradicionalmente usados na construção de paredes, como o tijolo (0,6 W/m.°C) (Ochsner et. al., 2016), o vidro (0,8 W/m.°C) (ASTM C128, 2019) ou o concreto (1,7W/m.°C) (Mindess et. al., 2003), ou com materiais isolantes como a lã mineral (0,04W/m.°C) (ASHRAE, 2017) pode-se observar que o subproduto apresenta as características de desempenho típicas de um material isolante térmico (Figura 4).

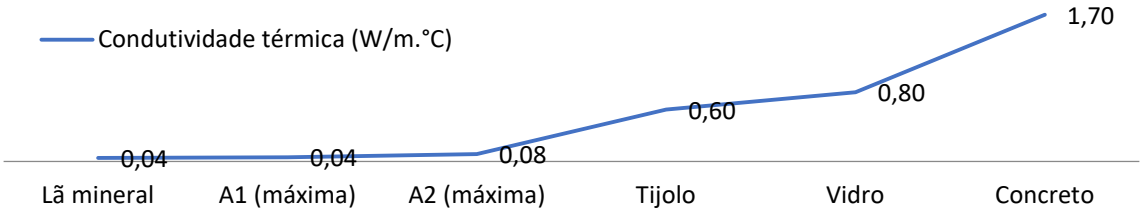


Figura 4 – Condutibilidade do subproduto em comparação com materiais tradicionais de vedação

3.3 DENSIDADE

Quanto à amostragem de sacos de cimento de 25kg usados, foi observado que a massa variou entre 65,7 e 68,1g, gerando uma quantidade de subproduto entre 69 e 79,6g. A massa dos sacos usados pode ser variável principalmente por conta da quantidade de resíduos de cimento. A massa de subproduto foi maior do que a massa original dos sacos por conta dos resíduos de NaOH, apesar da desidratação após secagem. Para os sacos de cimento de 25kg, obteve-se uma massa média de 75,17g de subproduto. Após separação, a densidade da parte A1 foi calculada em 0,06g/cm³, enquanto a da parte A2 foi de 0,45g/cm³ (Quadro 2).

Quadro 2 - Resultados de massa e densidade

Amostras	Massa dos sacos (g)	Massa de subproduto gerado (g)	Densidade (g/cm³)	Massa média do subproduto (g)/saco	Densidade A1 (g/cm³)	Densidade A2 (g/cm³)
1	66,7	69,0	0,46	75,17	0,06	0,45
2	65,7	76,9	0,49			
3	68,1	79,6	0,41			

Conhecendo as massas volúmicas, foi possível estimar as quantidades de sacos e subproduto necessárias para preencher os vazios dos tijolos, chegando-se ao valor de 11,5 sacos para preencher os 1.920cm³ vazios de um tijolo. Para o preenchimento dos 16 tijolos, estimou-se o uso de 184 sacos de cimento processados.

Quanto à aparência, o subproduto apresenta coloração semelhante à de solo argiloso e aspecto de solo arenoso, exibindo, contudo, textura próxima de um solo turfoso. As densidades médias do solo argiloso, arenoso e turfoso são respectivamente, 1g/cm³, 1,42g/cm³ e 0,35g/cm³ (SOHMA, 2020). Assim, a densidade da parte A2 do subproduto somente excedeu a do solo turfoso (Figura 5), o que significa que o contributo do material para o isolamento sonoro por via do aumento da massa não deverá ser significativo.

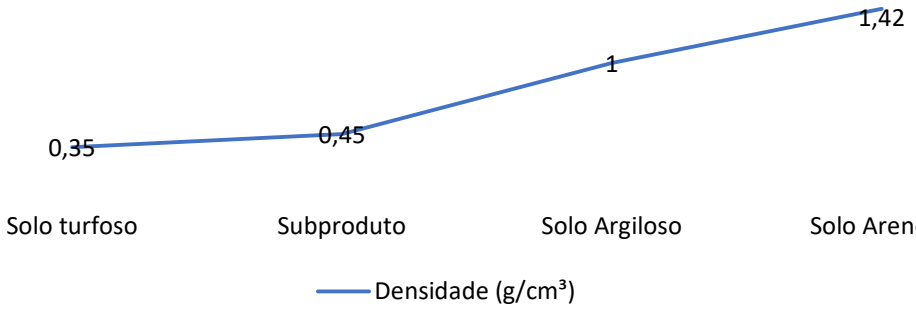


Figura 5 – Densidade do subproduto (A2) em comparação com a densidade média de solos

3.4 TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

À medida que a temperatura da amostra aumentou, ela pode ter sofrido diversas transformações, como perda de água, decomposição térmica, oxidação, desidratação, entre outras reações. Essas mudanças são observadas como variações na curva de TGA (Figura 6).

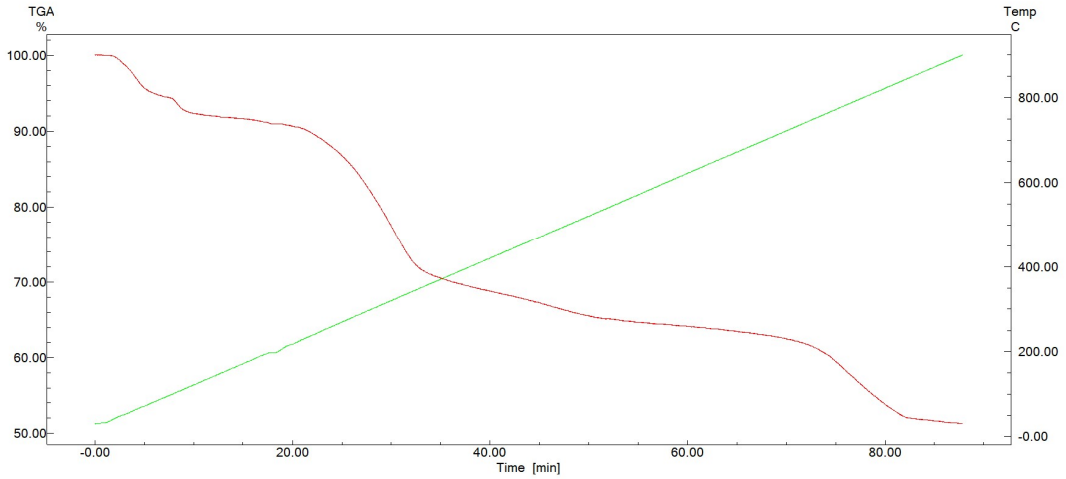


Figura 6 – Resultado de termogravimetria

A perda de massa se demostrou progressiva, principalmente após a temperatura de 53°C, onde foi observada uma inflexão na curva. O resultado foi considerado coerente por conta da desidratação da celulose. Observou-se uma temperatura de decomposição considerável entre 200°C e 400°C, onde também pode ter ocorrido resistência dos resíduos de NaOH e de cimento. Os resultados observados foram considerados suficientes para melhor precisão na descrição do subproduto como isolante térmico. As altas temperaturas podem assim afetar o benefício acústico do compósito devido à perda de massa.

3.5 ESPECTROSCOPIA

O subproduto é composto basicamente de celulose triturada ($C_6H_{10}O_5$), resíduo de cimento *Portland* composto (predominante de CaO e SiO_2) e resíduo de NaOH, apresentando uma mistura de odores característicos destes componentes. O ensaio de Espectroscopia utilizando Infravermelho com Transformação de Fourier – FTIR apresentou números de onda principalmente entre 1510 e 1540cm^{-1} e 1630 e 1650cm^{-1} (Figura 7), indicando características mais próximas do grupo Nitro e Alceno (grupo funcional NO_2 e C—C), segundo o esquema de interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho (Lopes, 2004).

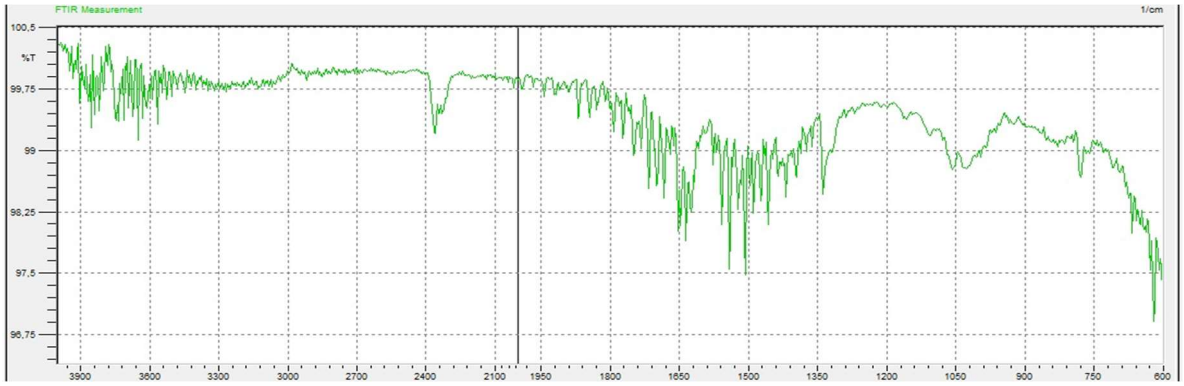


Figura 7 – Resultado de espectro com infravermelho da amostra

Isso quer dizer que o subproduto, que tem composição heterogênea na escala macroscópica, possui hidrocarbonetos, que tem suas peculiaridades como composto químico (Usberco, 2013). Não foram formulados efeitos termoacústicos imediatos relacionados às características espectroscópicas, porém,

as informações coletadas são pertinentes na avaliação de pós-ocupação e na oportunidade da expansão do reuso do subproduto.

3.6 APLICAÇÃO DO SUBPRODUTO COMO ISOLANTE ACÚSTICO

3.6.1 VERIFICAÇÃO POR CÁLCULO

Quando foram preenchidos com o subproduto, os 16 tijolos apresentaram massa entre 3,98 e 4,37kg. O índice de redução sonora (R) calculado apresentou melhoria entre 2,3 e 3,9dB em relação aos tijolos vazios, desprezando-se o efeito do espaço de ar (Quadro 3) (Figura 8). Esta melhoria de desempenho é da ordem de grandeza do contributo dos espaços de ar, pelo que não se esperam alterações significativas do desempenho acústico da parede com os vazios do tijolo preenchidos com subproduto em relação à parede original.

Quadro 3 – Resultados estimados do índice de redução sonora (R)

Tijolo	Massa (vazio) (kg)	Massa superficial (kg/m²)	R (dB) Vazio	Massa (c/subproduto) (kg)	Massa superficial (kg/m²)	R (dB) Cheio	Diferença R (Cheio-Vazio) dB
1.	3,43	57,24	23,91	3,98	66,39	26,33	2,42
2.	3,51	58,49	24,27	4,21	70,20	27,24	2,97
3.	3,49	58,24	24,20	4,29	71,47	27,53	3,33
4.	3,59	59,80	24,63	4,23	70,55	27,32	2,69
5.	3,45	57,57	24,01	4,14	69,06	26,97	2,96
6.	3,42	57,04	23,86	4,29	71,47	27,53	3,67
7.	3,5	58,33	24,22	4,22	70,37	27,28	3,06
8.	3,59	59,91	24,66	4,13	68,90	26,93	2,28
9.	3,67	61,13	24,98	4,29	71,55	27,55	2,56
10.	3,69	61,55	25,10	4,36	72,59	27,78	2,69
11.	3,62	60,37	24,78	4,29	71,47	27,53	2,75
12.	3,43	57,23	23,91	4,37	72,77	27,82	3,91
13.	3,58	59,72	24,60	4,36	72,59	27,78	3,18
14.	3,6	60,07	24,70	4,14	69,08	26,98	2,28
15.	3,43	57,22	23,91	4,12	68,69	26,88	2,98
16.	3,6	60,00	24,68	4,26	71,05	27,43	2,75

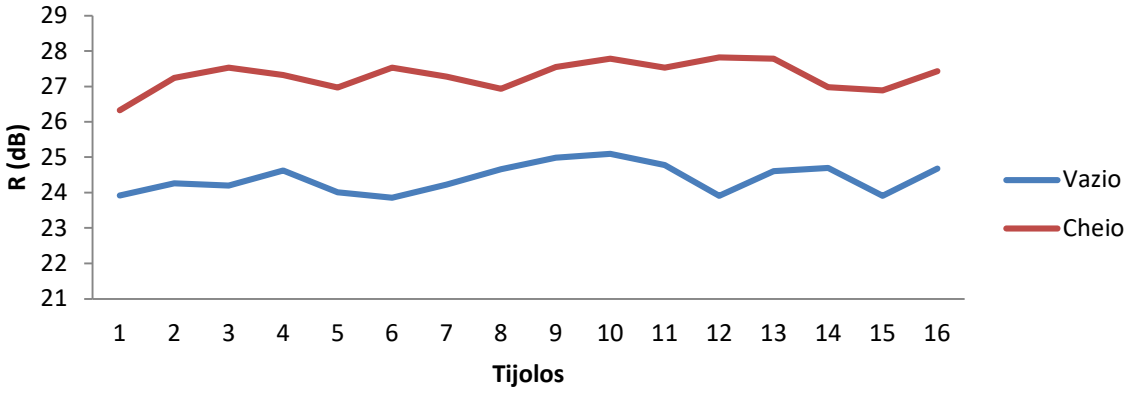


Figura 8 – Índice de redução sonora (R) estimado para os tijolos vazios e preenchidos

Estima-se, simplificadamente, um índice de redução sonora médio de 24,4dB para os tijolos vazios, com Desvio Padrão (DP) de 0,4. Para os tijolos cheio, obtém-se um valor médio de R de 27,3dB, com DP igualmente de 0,4. Visto que os resultados do DP não foram discrepantes, considera-se uma diferença média de R de 2,9dB já. Conforme se referiu acima, a pequena diferença de desempenho conferida pelo aumento de massa não permite concluir sobre o efetivo benefício do preenchimento dos tijolos com subproduto, pelo que será necessária a observação por experimento laboratorial.

3.6.2 VERIFICAÇÃO POR EXPERIMENTO LABORATORIAL

Em virtude do pequeno aumento de massas conseguido, a melhoria de isolamento acústico é pouco significativa, mas, ainda assim, superior à estimativa resultante do cálculo simplificado pela lei da massa. Em geral, os resultados experimentais (Quadro 4) foram ligeiramente superiores aos estimados no Quadro 3. As melhorias na maioria das frequências avaliadas ficaram, em geral, entre 4 e 5 dB. Apenas na frequência de terços de oitava de 250Hz não foi observada melhoria, o que pode ter ocorrido por conta de vários fatores, como por exemplo uma alteração das frequências naturais ou da frequência de coincidência (Quadro 4) (Figura 9).

Quadro 4 – Resultados experimentais da Perda de Transmissão (PT)

f(Hz)	R'_{vaz} (dB)	$R'_{cheio,min}$ (dB)	$\Delta R = R'_{cheio,min} - R'vaz$ (dB)
50	22,1	27,1	5,0
63	24,0	26,6	2,6
80	25,4	33,9	8,5
100	25,2	29,6	4,4
125	28,0	32,9	4,9
160	28,6	33,7	5,1
200	26,5	32,4	5,9
250	30,5	24,8	-5,7
315	28,0	33,4	5,4
400	29,3	34,7	5,4
500	29,7	34,7	5,0
630	30,0	34,7	4,7
800	29,4	34,0	4,6
1000	30,2	34,8	4,6
1250	30,7	35,2	4,5
1600	34,7	39,3	4,6
2000	36,0	40,6	4,6
2500	40,1	44,7	4,6
3150	41,2	45,8	4,6
4000	45,5	50,2	4,7
5000	42,1	46,6	4,5

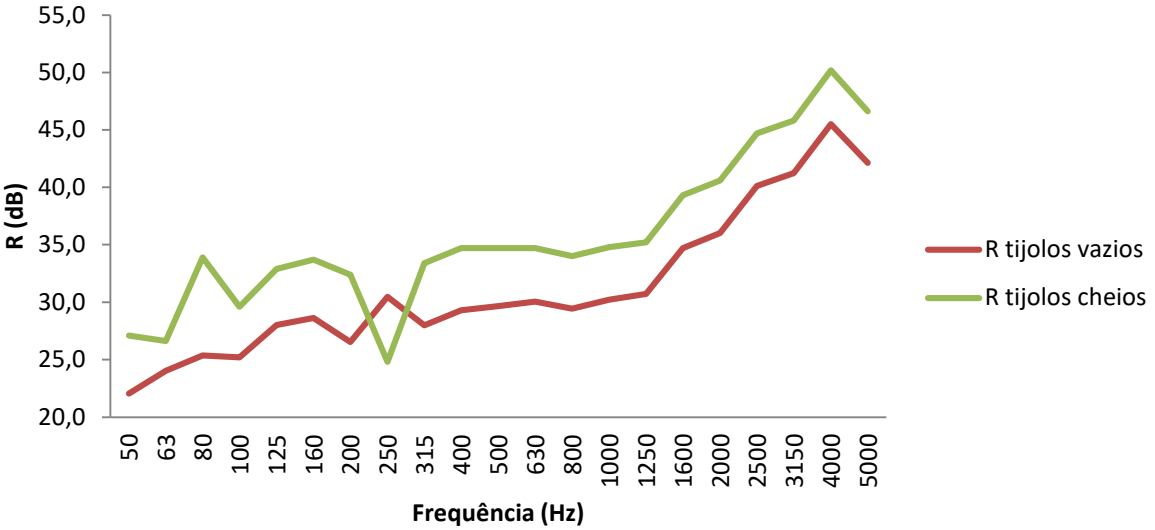


Figura 9 – Índice de reduçaõ sonora (R) medido para os tijolos vazios e preenchidos

4 CONCLUSÕES

O subproduto apresentou baixa condutibilidade térmica, principalmente quando separadas as partes grossas com peneira de 1mm, as quais são menos densas. A parte mais densa apresentou-se capaz de melhorar ligeiramente o isolamento acústico, mas também o isolamento térmico, uma vez que apresenta um condutibilidade térmica suficientemente baixa. As duas partes podem, no entanto, ser otimizadas de acordo com as necessidades do ambiente de um projeto de construção.

A densidade do subproduto fino tem potencial de aumentar a massa, ocupando vazios de materiais de construção, tais como tijolos, o que pode constituir um destino adequado para os sacos contaminados com cimento *Portland*, evitando disposição mais poluente e poupando uso de recursos naturais para reforço do isolamento termoacústico.

Adicionalmente, a transformação no subproduto reduz significativamente o volume dos sacos. De acordo com os resultados apresentados, calcula-se que para preencher 1m³ de subproduto seriam necessários mais de 5mil sacos processados. Um grande ganho do método proposto é o potencial de consumo de sacos contaminados com cimento *Portland*. Apenas para os 16 tijolos considerados no estudo, foram necessários 184 sacos. Para a totalidade da pequena alvenaria de 5,5m² executada no ensaio laboratorial realizado no LNEC, seriam necessários cerca de 900 sacos processados. Conclui-se que este método poderia ser amplamente disseminado pelo potencial de consumir a demanda de sacos descartados, oferecendo igualmente melhoria no desempenho termoacústico.

No processo final de produção do subproduto, sobram resíduos de cimento e NaOH, que serão usados em novos estudos como preenchimento de tijolos junto com o subproduto. Restam também águas turvas contaminadas com cimento e NaOH, onde o tratamento sustentável pode ser igualmente um trabalho futuro.

Os resultados de termogravimetria (TGA) foram analisados e não considerados preocupantes, pois a presente investigação propõe o uso do subproduto na parte interna dos tijolos para alvenarias, onde o oxigênio é escasso e o subproduto normalmente deve ficar submetido à temperatura ambiente.

O método também previne a incineração térmica e seus custos observados por Vieira (2012) e por mais de 97% dos artigos de revista científicas que relacionam as alterações climáticas com a emissão

de CO_2 (Nelles, 2020). Ainda, segundo Ma *et al.* (2019), cada saco de cimento de papel *kraft* emite 0,022g de CO_2 em seu ciclo de vida, podendo este número ser reduzido se este método fosse efetivado, contribuindo por exemplo para os objetivos do Pacto Ecológico Europeu.

Outros materiais mais densos poderiam contribuir para um melhor desempenho acústico nos tijolos, como por exemplo, recursos naturais como solo arenoso ou argiloso, porém, o subproduto é oriundo de um resíduo sólido com poucas alternativas para reaproveitamento e, ainda, os sacos de cimentos contaminados geralmente são descartados onde há execução de alvenaria com tijolos, sendo possível tornar a produção mais limpa e reaproveitar os resíduos da própria frente de produção como é visionado por Addis (2006). O subproduto se apresentou mais denso que o solo turfoso, que é natural, apresentando também baixa condutibilidade térmica.

O calor e o som são formas diferentes de energia e não sofrem o mesmo processo de transmissão, porém, a caracterização e os benefícios do subproduto foram razoavelmente demonstrados dentro dos objetivos deste trabalho. Uma granulometria ótima do subproduto pode ser estudada de modo que identifique o melhor desempenho termoacústico, como também outras granulometrias podem ser estudadas para aproveitamento do compósito em outros materiais de construção. É preciso também avaliar o impacto dos consumos de NaOH, água e energia que são requeridos neste processo.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - www.capes.gov.br), ao IFAL (Instituto Federal de Alagoas - www.ifal.edu.br) e a UFBA (Universidade Federal da Bahia – www.ufba.br) pelo financiamento e apoio desta pesquisa. Agradecemos também aos colaboradores do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.

REFERÊNCIAS

ABRECON. Construção civil sustentável. Disponível em: http://www. http://abrecon.org.br/construcao-civil-sustentavel/. Acesso em 06 set 2023.

ADDIS, B. Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling. Londres: Earthscan, 2006. 224p.

ASHRAE (American Society of Heating), Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2017

ASTM C128-15: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C168 - Standard Terminology Relating to Thermal Insulation. 2019.

Callister, W. D. (2008). Materials science and engineering: An introduction (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc

COM/2019/640final, Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Pacto Ecológico Europeu. Comissão Europeia (2019).

EN 12667:2001 - Thermal performance of building materials and products — Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods — Dry and moist products of medium and low thermal resistance. Brussels, Belgium: CEN.

GERGES, N.Y. S. Ruído – Fundamentos e Controle, 2ª edição, Florianópolis, SC, 2000.

Lopes, H. M. (2004). Materiais de construção: Caracterização e propriedades. Lisboa, Portugal: Lidel - Edições Técnicas.

ISO 16283-1:2018 - Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. Geneva, Switzerland: ISO.

Ma X., Li C., Lee B. (2019). Carbon emissions from cement packaging in China: Life Cycle Assessment, Sustainability, 11(20), 5554. https://doi.org/10.3390/su11205554

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. 2nd Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

NELLES, D. Mudanças Climáticas: Os fatos como você nunca viu antes. Rio de Janeiro: Sextante, 2020. 131p

Ochsner, A., Mares, T., & Altenbach, H. (Eds.). (2016). Heat Conduction (2nd ed.). Springer.

SNIC-SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual 2021. Rio de Janeiro: SNIC, 2021.

Sohma, T. (2020). Fundamentals of acoustics. Tokyo, Japan: Springer Nature.

USBERCO, João. Química: Volume Único, Edgars Salvador, 9. ed – São Paulo: Saraiva, 2013.

VIEIRA, M.P. Fundamentos de Incineração. São Paulo: Gregory, 2012.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONDOMÍNIO DE CASAS: UMA ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO SOBRE A QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO E OS USOS DOS ESPAÇOS

Mayara Costa de Lima[a]; Ed Carlo Rosa Paiva[b]; Heber Martins de Paula[c]; Cristiane Coelho Campos[d]

[a] Universidade Federal de Catalão, St. Universitário, 75705-220, Catalão/GO, Brasil, mayaracostalima.arq@gmail.com

[b] Universidade Federal de Catalão, St. Universitário, 75705-220, Catalão/GO, Brasil, ed_paiva@ufcat.edu.br

[c] Universidade Federal de Catalão, St. Universitário, 75705-220, Catalão/GO, Brasil, heberdepaula@ufcat.edu.br

[d] Universidade Federal de Catalão, St. Universitário, 75705-220, Catalão/GO, Brasil, criscampos.arquiteta@gmail.com

RESUMO

A Avaliação Pós Ocupacional (APO) na arquitetura é um processo que avalia a eficácia de um espaço construído com base na experiência dos usuários. Aspectos como iluminação, ventilação, layout, conforto térmico, acústica, acessibilidade e ergonomia são avaliados para identificar pontos fortes e áreas que podem ser melhoradas. O objetivo desta pesquisa foi realizar uma APO em um condomínio residencial horizontal de classe média, na cidade de Catalão/GO. Foram utilizados métodos como walkthrough, questionários e entrevistas para analisar aspectos construtivos das unidades, segurança, necessidade de adaptação, conforto ambiental, qualidade das edificações, satisfação em relação aos tamanhos dos ambientes, dentre outros. Observou-se que 88,8% dos entrevistados consideram o tamanho dos ambientes de regulares a muito pequeno e os materiais de acabamentos empregados de regular a muito ruim. Diante dos resultados observa-se que a qualidade do empreendimento não foi o principal aspecto de escolha da moradia e sim a questão de segurança, uma vez que morar no condomínio é mais seguro que em outras regiões da cidade. A deficiência sistêmica observada nos projetos e execução apontam para a necessidade de projetar moradias de forma mais humanizada, visando suprir melhor as demandas de seus moradores, invés de ter o foco somente no lucro.

Palavras-chave: Avaliação pós-ocupacional, Habitação, Conjunto habitacional.

1 INTRODUÇÃO

A residência desempenha um papel fundamental na vida das pessoas, pois é um local de refúgio, segurança, intimidade, conexão, identidade, bem-estar emocional, de desenvolvimento e conhecimento, conforto, autonomia e descanso. A residência vai além de ser apenas um local físico onde vivemos, pois possui papel crucial em nossa vida emocional, física e social, influenciando diretamente nossa felicidade, qualidade de vida e bem-estar geral. As características arquitetônicas de uma residência podem refletir e influenciar aspectos mais profundos no âmbito emocional e psicológico.

A casa deve atender não apenas às necessidades funcionais, mas que também seja esteticamente agradável e proporcione uma sensação de pertencimento, sendo uma representação simbólica dos valores, gostos e identidade para seus habitantes (Botton, 2007). Nesse sentido, embora o autor considerasse as ideias de Le Corbusier revolucionárias, inovadoras e visionárias, pondera que algumas das implementações práticas não consideravam particularmente as necessidades emocionais e psicológicas das pessoas que habitavam esses espaços, uma vez que esse projetava habitações iguais, sob a ótica de que a vivenda é “uma máquina de morar”, sem características próprias de seus moradores, assemelhando-se a seu local de trabalho, sem oferecer a sensação de aconchego que os usuários tinham em tempos passados. Porém, o conceito de morar extrapola a edificação, pois expande-se para o entorno imediato da residência, e agrega características subjetivas entre a relação do morador e o ambiente (Villa e Ornstein, 2013). É possível surgir um vínculo afetivo durante a interação entre o morador e a casa, um apego ao espaço em que se habita devido ao indivíduo passar grande parte de sua existência na moradia (Medeiros, 2011). O comportamento relacionado ao vínculo com o espaço ocupado é percebido a partir de indícios como: identificação com o local e personalização do ambiente. O indivíduo tende a modificar seu espaço, a fim de imprimir ali a sua marca e diferenciando-se dos outros (Villa e Ornstein, 2013). O processo de apropriação é evidente em conjuntos habitacionais homogêneos, pois os moradores transformam suas residências com reformas, pinturas e modificações de revestimentos, buscando diferenciá-las das demais (Gonçalves, 2002).

Para desenvolver uma pesquisa sobre habitações requer uma abordagem multidisciplinar, além de realizar um levantamento de aspectos construtivos, é necessário buscar informações de caráter subjetivo, como por exemplo, entender o comportamento dos usuários na moradia e sua relação com o ambiente construído. Além de aspectos como as interações dos moradores com o espaço, suas necessidades, hábitos e sentimentos em relação ao ambiente, serem essenciais na compreensão do significado de "lar" para as pessoas. Esta pesquisa foi realizada a partir de processos metodológicos praticados na Avaliação Pós-ocupacional (APO), que é um conjunto de técnicas e métodos utilizados para a avaliação de desempenho de edificações e ambientes construídos (Villa et al. 2015). A Análise Pós-Ocupação também incorpora as opiniões e níveis de satisfação dos usuários, examinando sua relação com o ambiente construído, bem como a avaliação técnica do pesquisador. As informações coletadas, leva em consideração o ponto de vista dos moradores, que juntamente com os dados levantados pelos pesquisadores, permite a produção de diagnósticos que abordam aspectos negativos e positivos, que poderão contribuir tanto para a melhoria do ambiente construído analisado, quanto para a produção de futuras edificações.

Segundo Shah (2012) a APO é uma ferramenta adequada para promover o aumento da qualidade na produção habitacional, pois por meio dela é possível captar a necessidade dos ocupantes do ambiente

construído, sendo possível relacionar as recomendações descritas na norma de desempenho, com o intuito de melhorar a qualidade ambiental.

Considerando os aspectos construtivos e de desempenho das edificações vale destacar a NBR 15575 (ABNT, 2024) é uma norma de desempenho brasileira que estabelece parâmetros, critérios, e padrões por meio de um conjunto de diretrizes para garantir o desempenho, a qualidade, a segurança de edificações, sistemas e produtos. O uso dessa norma potencializa a APO, uma vez que define os requisitos mínimos que devem ser atendidos em termos de durabilidade, conforto térmico e acústico, segurança estrutural, segurança contra incêndios, higiene, entre outros aspectos, garantindo que as construções atendam a padrões aceitáveis de desempenho ao longo do tempo. Isso permite avaliar a qualidade da produção que está sendo realizada pelo mercado imobiliário.

A APO foi realizada com o intuito de avaliar a qualidade de vida e bem-estar dos ocupantes das residências, bem como verificar o desempenho das edificações. Este tipo de pesquisa é fundamental para a melhoria contínua dos projetos habitacionais, pois o produto obtido possibilita o aprimoramento da qualidade dos projetos futuros. De acordo com Villa et al. (2015), o desenho das habitações não sofrem alterações há décadas, passando por modificações apenas de caráter construtivo, sem levar em consideração a articulação e melhoria dos espaços habitados. A prática contínua de manter mesma tipologia para diferentes arranjos familiares prejudica o atendimento às demandas do usuário.

Segundo as pesquisas desenvolvidas por Villa et al. (2015), as plantas ofertadas na maioria das residências brasileiras apresentam diversas inadequações relacionadas ao espaço, no tocante à disposição e tamanho dos ambientes, circulações restritivas, pequenas aberturas, impossibilidade de ampliação e implantações que não favorecem alterações na disposição dos cômodos. Além de problemas espaciais, as casas apresentam problemas quanto ao uso, pois comprometem a capacidade de conter o mobiliário básico, com ambientes que possuem sobreposição de atividades, acarretando no comprometimento da privacidade. Através da resposta dos usuários e da observação das interações com o espaço, é possível ajustar os projetos para atender melhor às necessidades reais dos moradores, tanto físicas quanto emocionais. Este estudo contribui para trazer a percepção dos moradores em relação à qualidade dos condomínios, abrangendo tanto a construção quanto o uso dos espaços.

O objetivo principal da pesquisa foi avaliar as habitações para identificar problemas que vão além dos aspectos de desempenho, incluindo questões relacionadas ao conforto, segurança e satisfação dos moradores. Dessa forma, a pesquisa oferece uma visão abrangente e detalhada das experiências dos usuários, permitindo a implementação de melhorias que atendam de maneira mais completa e eficaz às necessidades dos moradores.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 METODOLOGIA APLICADA

Segundo Villa e Ornstein (2013), as pesquisas devem coletar dados a partir de multimétodos, combinando dois ou mais meios de coleta de informações, pois essa ação fornece mais riqueza de dados, e aumenta o leque de elementos envolvidos no processo analítico. Informações obtidas através de fontes únicas podem ser passíveis de dúvidas, podendo gerar desvios-padrão e falhas na análise final. O pesquisador pode avaliar os ambientes residenciais por meio da observação do comportamento do usuário no espaço habitado, e identificar qual sua percepção em relação ao local.

Essas informações são complementadas por meio de entrevistas e questionários, que permitem traduzir a opinião do usuário.

A metodologia escolhida foi baseada na pesquisa desenvolvida por Villa et al. (2015) e adaptada à realidade do objeto de estudo devido a limitações de tempo para sua aplicação e desenvolvimento. A pesquisa envolveu a coleta de informações sobre o empreendimento, identificação da tipologia da unidade habitacional, registro fotográfico do local, *walkthroughs*, além de questionários e entrevistas com usuários-chave. A avaliação técnica realizada pelos pesquisadores considerou os aspectos construtivos, a qualidade da construção e o desempenho, sendo avaliados elementos de vedação, instalações, funcionalidade, uso, manutenção, conforto ambiental, conforto lumínico, conforto acústico e espacialidade. A avaliação comportamental dos usuários foi abordada qualitativamente, por meio de opiniões, e quantitativamente, por meio de questionários que forneceram dados numéricos. Com base nesses dados, os pesquisadores avaliaram questões relacionadas à segurança, conforto, espaço interno e adaptabilidade das famílias às unidades habitacionais.

2.2 ESTUDO DE CASO

2.2.1 Levantamento de dados

Na etapa de coleta de dados, foram reunidas as informações necessárias para compreender as características do objeto de estudo. Isso incluiu plantas baixas do projeto arquitetônico, projetos complementares e dados gerais do conjunto habitacional. O local do estudo de caso foi o Condomínio Solar das Américas, localizado no município de Catalão, no estado de Goiás, Brasil, cuja localização é apresentada na Figura 1.

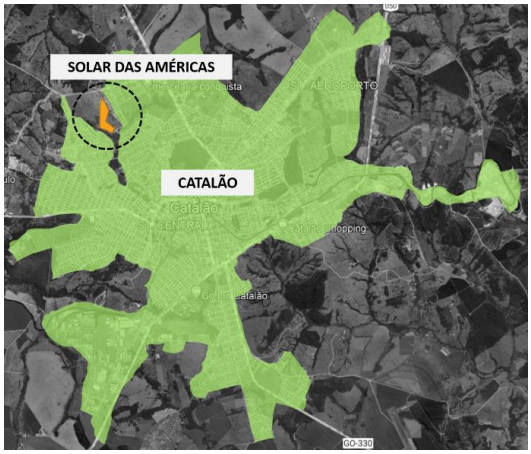


Figura 1 - Localização do Condomínio solar das Américas.

O condomínio está situado a 3,30 km do centro do município, sendo um conjunto habitacional de classe média. O local possui 228 unidades habitacionais térreas, distribuídas em três categorias: 59 casas com 3 suítes (incluindo uma suíte master), 79 casas com 1 suíte e 2 semi-suítes (ou suítes americanas) e 90 casas geminadas com 2 suítes (Figura 2). As áreas comuns do empreendimento somam 3 mil m² e incluem espaço gourmet com churrasqueira, academia, salão de festas, quadra poliesportiva, quadra de areia e piscinas para adultos e crianças. As unidades habitacionais começaram a ser construídas em 2017, adotando o sistema construtivo de alvenaria estrutural, possuindo laje superior e telhado coberto com telha cerâmica de cor clara. O reservatório de água da residência é incorporado no telhado. A construção das residências se baseou nas normas e regulamentos da ABNT

NBR 152275-1:2013, que estabelece requisitos mínimos de conforto para os usuários em novas construções.

A pesquisa concentrou-se na análise da tipologia de unidade habitacional com suíte americana, que inclui uma garagem para três carros (uma vaga descoberta), sala de jantar e estar integradas, cozinha, suíte principal, duas suítes que compartilham um banheiro, área de serviço, lavabo e área externa livre (Figura 3A).

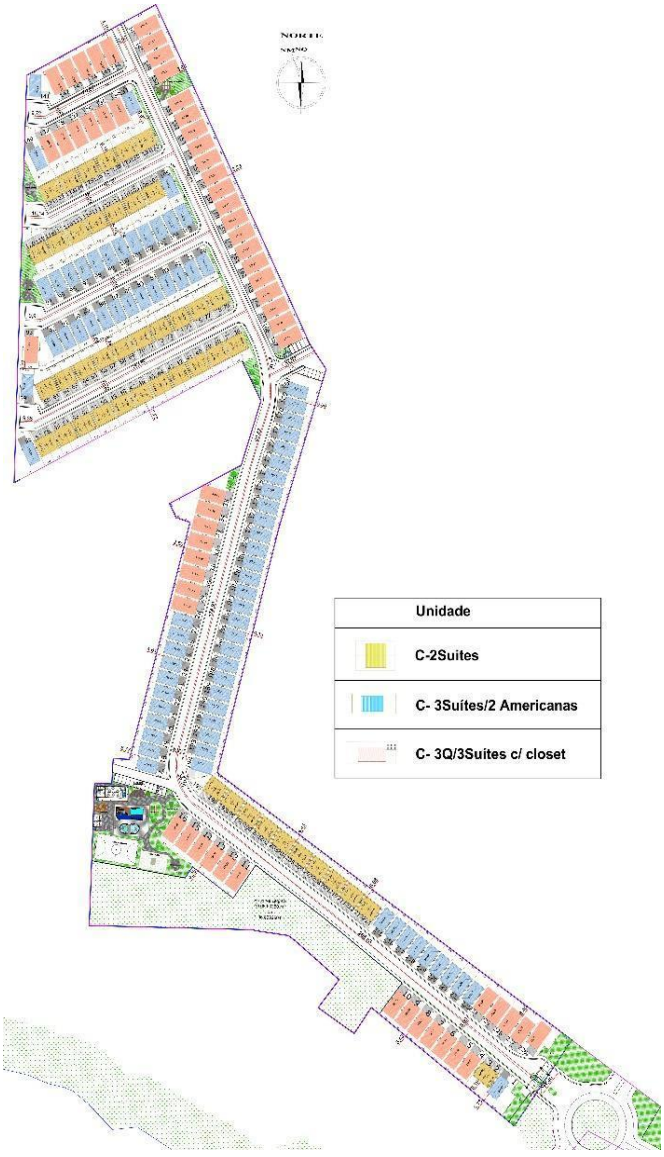


Figura 2 - Implantação do Condomínio Solar das Américas. Fonte: Prefeitura do município de Catalão, 2023.

A residência está inserida em um lote de 8,30 m por 22,00 m, respeitando os recuos laterais e de fundo de 1,5 m. Como está em um condomínio fechado, não se aplica o recuo frontal de 3 metros exigido pela legislação municipal para construções fora de condomínios. A fachada da casa (Figura 3B) inclui uma cobertura para abrigar dois carros, começando junto ao limite da calçada. As paredes de vedação são feitas de alvenaria estrutural, e a casa possui laje e telhado coberto com telha cerâmica. Os acabamentos internos consistem em porcelanato no piso e revestimento cerâmico nas paredes dos

banheiros e da cozinha. As portas são de madeira, enquanto as janelas são de esquadrias de alumínio e vidro com folhas de correr.

(A)

(B)

Figura 3 - Planta baixa da casa com 3 suítes (A). Perspectiva da fachada da casa com suíte americana (B). Fonte: Petrópolis Construções.

2.2.2 Walkthrough

O método consiste em observações realizadas durante o percurso do pesquisador no ambiente. Nessa etapa o pesquisador é responsável por observar o entorno do conjunto residencial, o lote e a residência, de modo a identificar aspectos funcionais, técnicos, estéticos e comportamentais. Essa etapa requer pouco tempo para análise, sendo considerada uma técnica de APO indicativa, em que o pesquisador aponta os aspectos positivos e negativos do ambiente construído, sendo essencial para a avaliação geral, pois embasa o processo segundo o olhar técnico (Villa et al. 2015). Através desse passeio guiado na edificação, é possível ainda identificar as alterações e adequações realizadas por seus ocupantes.

Durante esta etapa foi observado que há uma grande dificuldade na atuação do pesquisador no período da coleta de dados, pois é um momento complexo que demanda adentrar na intimidade do morador, entrar em sua casa, experimentar os sentimentos repassados e assumir por um momento o papel do usuário.

2.2.3 Questionário e entrevista semiestruturada com usuário-chave

As perguntas utilizadas no questionário foram baseadas no modelo disponibilizado por Villa et al. (2015). O questionário foi disponibilizado online por meio de um link usando a ferramenta Google *Forms*, permitindo identificar as respostas de cada participante. Conforme Kruse (2005), as diferenças nas respostas podem ser significativas quando se utilizam questões fechadas, abertas ou de múltipla escolha. Sendo assim, foram realizadas também entrevistas com os participantes para entender as razões por trás de suas respostas.

Questionários com perguntas de múltipla escolha são aplicados para medir o nível de satisfação dos usuários. O principal objetivo dessa técnica é identificar o grau de satisfação dos moradores em relação aos espaços privados e áreas comuns. As perguntas abordam aspectos como características do entrevistado, do entorno e da unidade habitacional.

2.2.4 Característica do entrevistado

Um aspecto importante a ser considerado neste tipo de pesquisa é o grupo familiar que reside na unidade, incluindo o grau de parentesco e o número de pessoas. Essa informação é particularmente esclarecedora quando analisada em conjunto com a tipologia da casa, permitindo identificar as necessidades específicas de cada família e o grau de conforto que têm em relação à residência.

Foram entrevistadas 9 pessoas, sendo 4 homens e 5 mulheres, sendo que um dos entrevistados tinha mais de 71 anos, 1 tinha entre 61 e 70 anos, 1 tinha entre 41 e 51 anos, 4 tinha entre 31 e 40 anos, e 2 tinham entre 15 e 20 anos. O grau de escolaridade dos entrevistados foi: 5 possuem pós-graduação, 2 possuem superior completo e os demais possuem ensino médio incompleto.

2.2.5 Obtenção dos resultados e sua análise

De acordo com Cukierman (2007), ao converter descobertas em dados numéricos, os pesquisadores se baseiam na objetividade científica, categorizam elementos, processam e interpretam os dados coletados. O uso de diversos métodos de coleta de dados na APO, tanto quantitativos quanto qualitativos, ajuda a equilibrar possíveis distorções nos resultados, permitindo ao pesquisador identificar suas causas. Segundo Villa e Ornstein (2013), entender que os usuários têm expectativas variadas pode contribuir para a elaboração de projetos que evitem reformas ineficientes e não planejadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a pesquisa, observou-se que as respostas coletadas por formulário online não captam completamente a experiência do morador em sua unidade. Em entrevistas diretas, é possível obter informações mais sensoriais, permitindo ao pesquisador uma análise mais precisa da qualidade da edificação. Com esses resultados, é possível aprimorar a concepção de futuros projetos, alcançando maior precisão e melhorando a qualidade de vida dos usuários.

3.1 BAIRRO

Foi observado que as ruas internas do condomínio têm dimensões estreitas, com calçadas também estreitas e desniveladas (em formato de rampas), o que dificulta o trânsito de pessoas com limitações físicas. Além disso, postes de iluminação foram instalados nas calçadas, ocupando parte do espaço disponível. Também foi notada a dificuldade dos moradores em receber visitas, pois não há área para estacionamento próximo às casas, as vagas destinadas a visitantes são limitadas e distantes da maioria das unidades.

Na Figura 4 estão apresentadas as percepções dos entrevistados, quanto a aspectos gerais do condomínio.

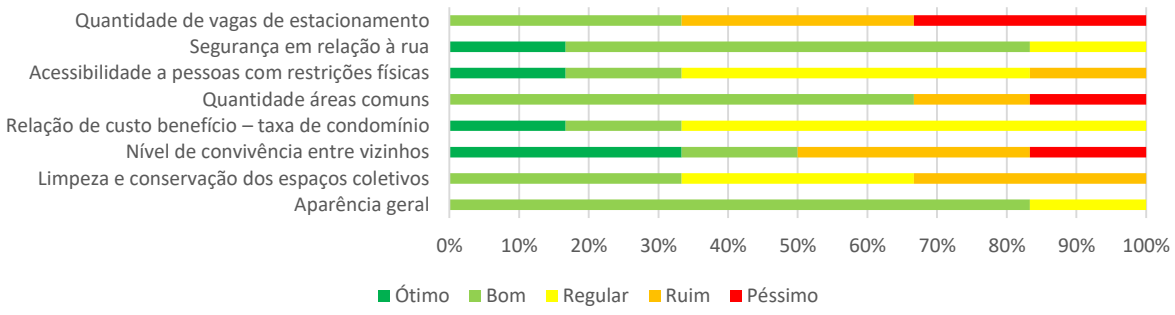


Figura 4 - Aspectos gerais do condomínio.

Os moradores destacam alguns aspectos negativos do local, como a insatisfação com as vagas de estacionamento dentro de seus lotes. As ruas internas foram projetadas exclusivamente para o

trânsito de veículos, sem espaço suficiente para estacionar ao longo do meio-fio, o que pode causar desconforto ao receber visitas. De modo geral, os moradores têm uma boa impressão sobre a segurança do condomínio. Todos concordam que se sentem mais seguros morando nesse novo espaço em comparação com suas residências anteriores em outras áreas da cidade. A segurança foi o principal motivo citado pelos entrevistados para escolher o local para morar, apesar da nova moradia ser menor e menos confortável que a anterior, além de estar mais distante do centro da cidade e dos locais de trabalho e escola de seus filhos. A busca por maior segurança nas moradias pode ser traduzida pelo rápido crescimento demográfico da cidade nos últimos anos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Catalão cresceu mais de 32% de 2010 a 2022. Pesquisas indicam que o índice de violência tem um aumento consideravelmente maior em relação ao crescimento da população (Caminha Neto, 2017).

Apenas 11,1% dos entrevistados consideram o bairro um local bonito, o restante considerou que é um local medianamente bonito ou muito feio. A maioria acha que o bairro não é muito cuidado, e 77,7% consideram o bairro desagradável.

3.2 UNIDADE HABITACIONAL

Foi observado, durante a etapa Walkthrough, que a moradia possui quartos com dimensões pequenas, e uma cozinha que não atende uma família, pois não dispõe de espaço suficiente para mobiliários de uso corriqueiro e armários para armazenamento de mantimentos.

Cinco dos entrevistados responderam que a casa em que moravam anteriormente era maior que a atual, apenas uma pessoa afirmou que sua antiga casa era menor. Todos informaram que sua antiga moradia era própria, e agora 3 estão em casas alugadas, 2 pessoas estão em imóvel próprio em aquisição e apenas 1 possui a casa quitada.

Na Figura 5 estão apresentados os resultados do questionário, considerando os aspectos gerais da residência e seu entorno.

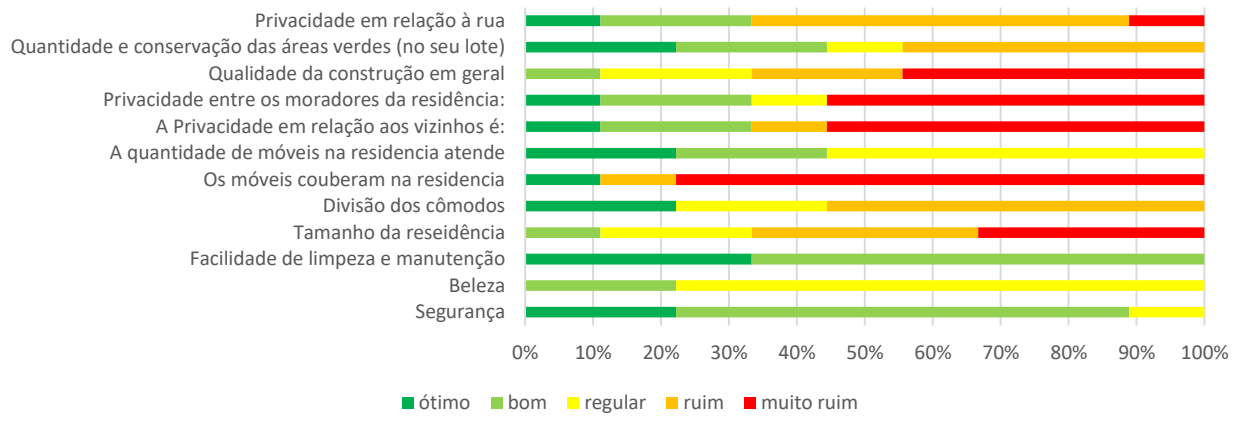
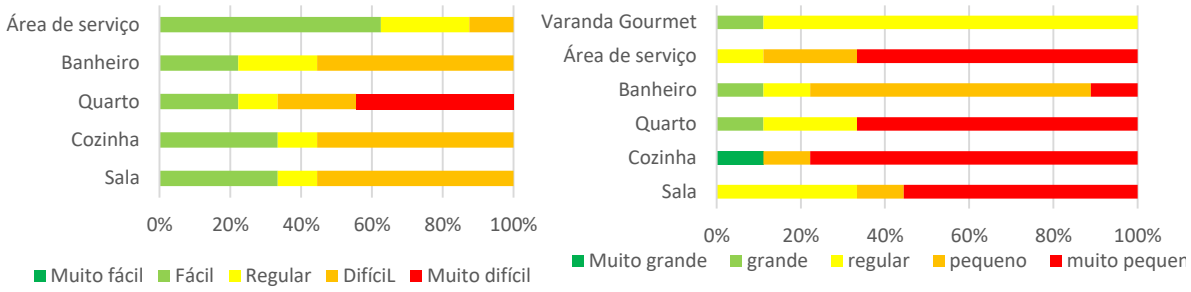


Figura 5 - Percentual de satisfação quanto a alguns aspectos gerais da residência.

A proximidade entre as casas também foi motivo de críticas por parte dos entrevistados. Alguns mencionam problemas de acústica entre as unidades habitacionais, enquanto outros sentem que a proximidade compromete a privacidade dentro de casa.

Todas as tipologias do condomínio têm ambientes com dimensões reduzidas, o que requer adaptação do mobiliário. Na tipologia foco desta pesquisa, os moradores destacaram a dificuldade de acomodar seus móveis antigos, optando por móveis planejados em quase todos os ambientes (Figura 6A). A maior dificuldade foi encontrada nos quartos, que não permitiam grandes alterações de layout. Como resultado, 88,8% dos entrevistados afirmaram que seus móveis antigos não couberam na nova casa.

Por outro lado, conforme pode ser observado na Figura 6B, apenas 11,1% consideram sua casa grande, 77,7% acham a divisão dos cômodos mediano ou ruim. A limitação de espaço interno é uma fonte de desconforto e, em alguns casos, insatisfação para os usuários, especialmente para famílias de 4 pessoas. A dinâmica dessa casa é mais intensa e a necessidade de espaço é maior. A cozinha foi apontada pela maioria dos usuários como muito pequena, foi relatado grande insatisfação com esse ambiente, sendo considerado o menos funcional.



(A) (B)

Figura 6 - Percepção do morador quanto a facilidade de mobiliar os ambientes (A). Percepção do morador quanto ao tamanho dos ambientes (B).

Em relação à construção, 88,8% dos entrevistados consideram os materiais de construção e acabamentos como regulares, ruins ou muito ruins, e apenas 11,1% considera os acabamentos bons. A pintura foi o elemento que gerou maior insatisfação entre os usuários, enquanto as janelas receberam as melhores avaliações. Os revestimentos de parede e piso foram considerados insatisfatórios, e alguns entrevistados classificaram as portas de madeira como péssimas (Figura 7). Durante as entrevistas, os usuários compararam a qualidade de suas residências atuais com a realidade de suas antigas casas. Embora as edificações no Brasil devam seguir as diretrizes da ABNT NBR 15575, há dificuldades em atingir os parâmetros mínimos recomendados devido à baixa qualificação da mão de obra, falhas de projeto, busca por economia e aumento do lucro na execução das obras, bem como a falta de uma fiscalização efetiva, o que afeta a qualidade das edificações e resultam em problemas de desempenho percebidos pelos moradores.

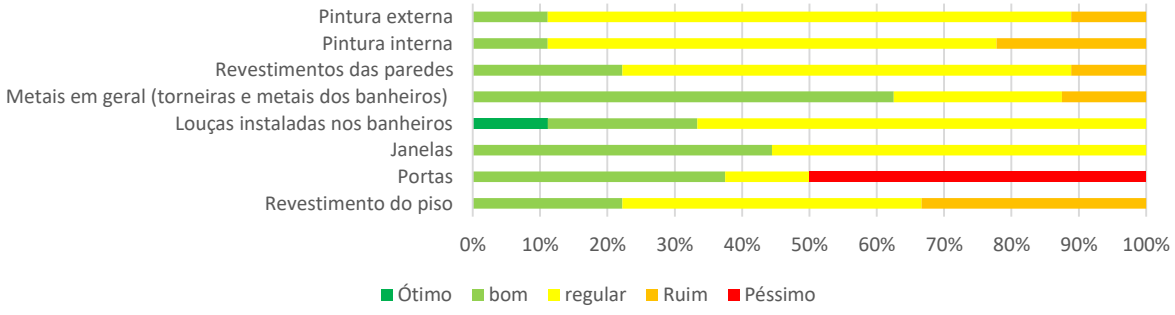
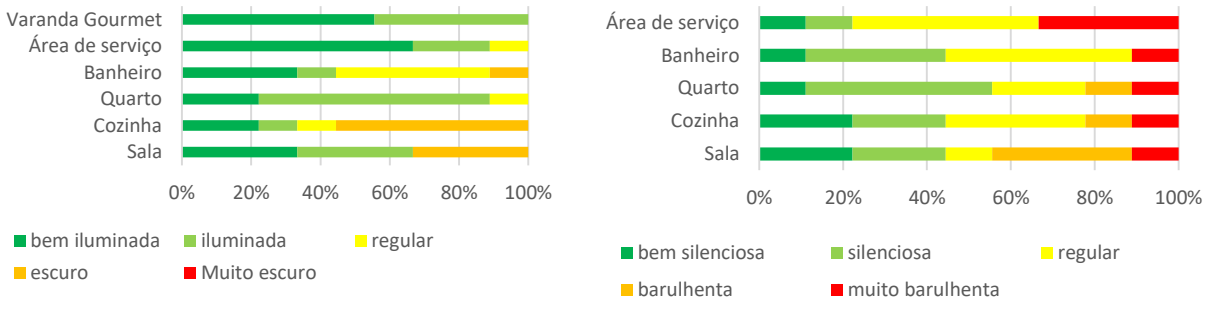


Figura 7 - Satisfação em relação aos materiais de construção utilizados.

Todos os entrevistados afirmaram ter realizado reformas ou alterações em suas casas, sendo que 50% delas foram feitas antes de começarem a morar nas residências. As reformas foram motivadas pela necessidade de ampliar algum cômodo, resolver problemas técnicos em instalações elétricas ou hidráulicas, melhorar a aparência estética, o conforto, os acabamentos ou modificar a função de algum espaço. As mudanças mais comuns foram pintura e a construção de paredes adicionais, com destaque para a criação de uma varanda gourmet nos fundos do terreno. A pesquisa mostrou que 77,7% dos entrevistados enfrentaram problemas com instalações hidráulicas, enquanto cerca de 90% tiveram dificuldades com o sistema de águas pluviais. Além disso, 66,6% relataram problemas de desempenho estrutural, e 88,8% identificaram fissuras e trincas em suas residências.

Quanto a percepção em relação a iluminação dos ambientes (Figura 8A), os ambientes da residência foram avaliados positivamente em relação à iluminação, com exceção da sala, que não possui janelas e é iluminada apenas pela porta de acesso à área de serviço. Em contrapartida, a percepção em relação acústica (Figura 8B) foi considerada insatisfatória, já que os entrevistados mencionaram que é possível ouvir muito ruído externo, inclusive sons provenientes das casas vizinhas. Houve uma entrevistada que considerou a sua casa bem silenciosa, porém essa mora em uma rua secundária, com pouca movimentação de veículos e possui vizinhos que passam a maior parte do dia fora de casa, sendo uma exceção entre os entrevistados. Observou-se que as casas localizadas na avenida principal tendem a ser mais barulhentas.



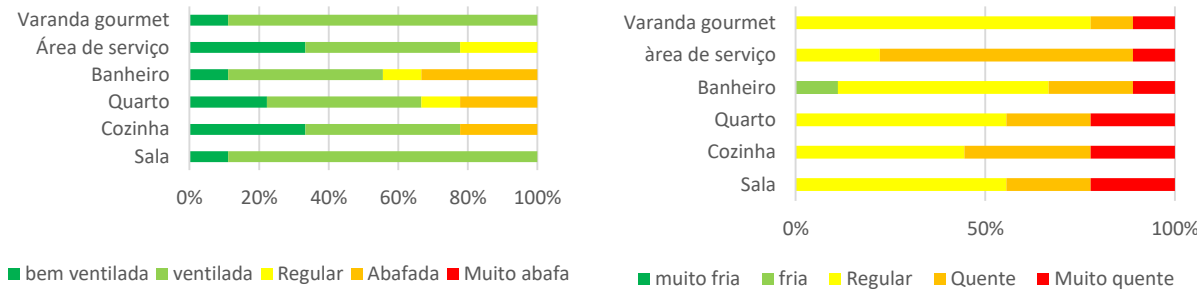
(A) (B)

Figura 8 - Percepção em relação a iluminação dos ambientes (A). Percepção em relação a acústica dos ambientes (B).

A maioria dos ocupantes considerou os ambientes bem ventilados (Figura 9A). No entanto, a sensação térmica foi considerada, predominantemente, de regular a muito quente (Figura 9B). A percepção dos moradores em relação à qualidade térmica de suas residências foi geralmente de desconforto em relação a calor, necessitando o uso de ar-condicionado durante quase todo o ano. Muitos atribuem esse desconforto ao tipo de cobertura das edificações, mas não conseguem especificar se é devido à altura do pé-direito ou ao tipo de telha utilizado. Nenhum entrevistado relacionou o calor à incidência solar direta em suas unidades.

Quando questionados sobre a ventilação natural, a maioria dos moradores afirmou que suas unidades eram bem ventiladas, embora ainda preferissem usar ar condicionado. Essa escolha pode ser explicada pela zona bioclimática em que a cidade está inserida. De acordo com a ABNT NBR 15220-3:2005, o município de Catalão está na zona bioclimática 6, caracterizada por maior sensação térmica de calor na área externa das edificações em relação à interna, o que faz com que o ar externo que entra nos ambientes seja mais quente que o ar interno. A baixa taxa de arborização tanto urbana quanto particular também contribui para esse desconforto.

Durante um walkthrough, foi observado que uma das residências analisadas era mais confortável termicamente devido à sua orientação em relação ao sol. Essa unidade tinha todos os cômodos com uma temperatura agradável, mesmo sem o uso de ventilação mecânica. Em outra residência estudada, no entanto, um dos dormitórios e a sala apresentaram uma sensação térmica desagradável, pois esses estavam voltados para a direção oeste, que é onde o sol se põe e, portanto, recebe a insolação da tarde.



(A) (B)

Figura 9 - Percepção em relação a ventilação dos ambientes (A). Percepção em relação a temperatura dos ambientes (B).

Conforme mencionado anteriormente, os cômodos da residência são pequenos, o que faz com que os usuários realizem várias atividades em diferentes ambientes. Durante a coleta de informações, os moradores indicaram em quais espaços costumam realizar atividades como comer, trabalhar, receber convidados, fazer exercícios, dormir, estudar, socializar, entre outras (Figura 10). Observou-se que a área da varanda gourmet é utilizada para a maioria das atividades, com exceção do dormir. Outro ponto relevante é que os moradores tendem a receber convidados em todos os ambientes, inclusive nos espaços privados, e socializam com outros ocupantes até mesmo nos banheiros. Esse levantamento pode ajudar a compreender a percepção dos usuários de que falta privacidade entre os ambientes, reflexo de uma residência compacta.

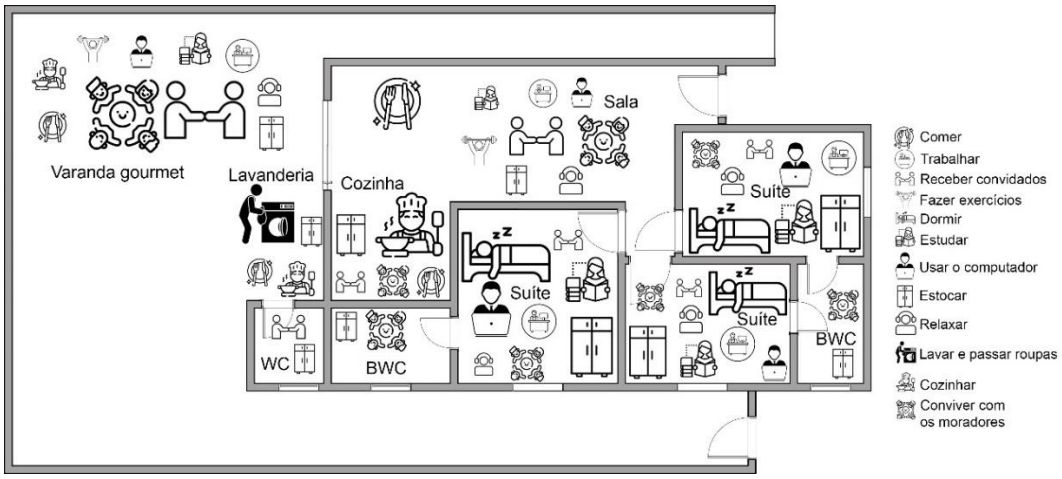


Figura 10 - Mapeamento de ambientes e seus respectivos usos.

Durante a pesquisa e análise, ficou evidente que a unidade habitacional não atende às necessidades da maioria das famílias. Entre os entrevistados, houve pessoas que moravam sozinhas, com um cônjuge ou em famílias com quatro membros, evidenciando diferentes rotinas. Observou-se que

apenas as pessoas que vivem sozinhas consideram o ambiente construído funcional e satisfatório. No entanto, para famílias maiores, a configuração não é ideal. Em resumo, os cômodos são pequenos e a qualidade da construção é insatisfatória, com diversos problemas de desempenho devido a falhas no projeto ou na execução.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante reconhecer a necessidade de produção em massa de residências, mas que atendam aos requisitos mínimos de desempenho na construção. No entanto, também é essencial considerar a dinâmica e os interesses dos moradores para construir habitações alinhadas aos desejos deles. Com isso, mesmo a residência não atendendo aos padrões de satisfação dos usuários, o baixo desempenho em relação ao conforto é tolerado devido a sensação de segurança que o bairro proporciona. Ao investigar a percepção dos usuários, é possível obter conhecimentos valiosos que servirão para aprimorar a produção de habitações. Os resultados de pesquisas de APO realizadas em empreendimentos habitacionais, podem ser aproveitadas posteriormente nas fases de planejamento do projeto, construção e manutenção, visando aprimorar a qualidade de execução e desempenho das novas habitações.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15220: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Botton, A. A arquitetura da felicidade. Tradução de Clóvis Marques. Rio de Janeiro: Rocco, 2006.

Caminha Neto, C. O. Descoberta de relações alométricas entre população e crime dentro de uma grande metrópole. Dissertação de doutorado. Universidade de Fortaleza, 2017.

Curierkman, H. Yes, nós temos Pasteur: Manguinhos, Oswaldo Cruz e a história da ciência no Brasil. Rio de Janeiro: Relume Dumará/Faperj, 2007.

Gonçalves, F. M. A apropriação dos espaços livres em áreas habitacionais: avaliação de uma experiência. In: NUTAU'2002. Anais. São Paulo: Fupam/FAU-USP ,2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. População no último censo [2022]. Brasil: IBGE, 2022.

Kruse, L. Compreendendo o ambiente em psicologia ambiental. In: TUSSARA, E. T. O. (Ed.). Psicologia e ambiente. Psicologia USP, São Paulo, v. 16, n. ½, p. 41-46, 2005.

Medeiros, S.T. Apego ao lugar. In: Cavalcante, S., Elali, G. A. (Org.). Temas básicos em psicologia ambiental. Petrópolis: Vozes, 2011.

Shah, S. Sustainable refurbishment. Oxford: wiley-blackwell, 2012.

Villa, S. B., Saramago, R. C. P., Garcia, L. C. (2015). Avaliação pós-ocupação no programa Minha Casa Minha Vida, uma experiência metodológica. Universidade Federal de Uberlândia.

Villa, S. B., Ornstein, S. W. Qualidade ambiental na habitação: avaliação pós-ocupação. São Paulo, 2013.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

GESTÃO INTEGRADA DA ÁGUA URBANA: ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA SISTEMAS HÍBRIDOS LOCAIS

Sara Bona[a]; Armando Silva-Afonso[ab]; Ricardo Gomes[c]; Fernanda Rodrigues[a]

[a] RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal, sara.cbona@ua.pt e mfrodrigues@ua.pt

[b] ANQIP, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal, asilva.afonso@outlook.pt

[c] INESC Coimbra e SMAS de Leiria, Departamento de Engenharia Civil, Politécnico de Leiria, Campus 2 Morro do Lena — Alto do Vieiro, 2411-901, Leiria, Portugal, ricardo.gomes@ipleiria.pt

RESUMO

Num contexto de escassez hídrica crescente, a gestão eficaz dos recursos hídricos é fundamental. Este estudo enfatiza a relevância de explorar técnicas para otimizar o uso da água local e promover a sua conservação, propondo um modelo inovador para equilibrar a oferta e a procura de água não potável em ambientes urbanos, como alternativa ou complemento ao abastecimento público de água, especialmente em regiões que sofrem com secas prolongadas, como a zona Mediterrânica. Para o efeito, foi realizado um estudo de investigação aplicada com uma abordagem qualitativa a partir de regulamentos, especificações e normas técnicas em vigor nacional e internacionalmente. Este estudo destaca tendências atuais na utilização e exploração de fontes alternativas de água, como águas cinzentas e pluviais em áreas urbanas, identificando lacunas no conhecimento e a necessidade de parâmetros precisos para implementar novos paradigmas na gestão urbana da água. A transição para edifícios com necessidades quase nulas de água e para comunidades urbanas sensíveis à água é salientada como uma direção promissora para soluções sustentáveis e resilientes. Além disso, é explorada a importância da gestão integrada e descentralizada da água, destacando também a recuperação de recursos das águas residuais, como nutrientes e energia.

Palavras-chave: Eficiência Hídrica; Água para Reaproveitamento; Gestão Integrada da Água; Resiliência Hídrica; Cidades Sustentáveis.

1 INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel fundamental para a concretização na consecução bem-sucedida dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) aprovados pelas Nações Unidas em 2015. As cidades, epicentro dos desafios dos ODS, exigem inovação na gestão da água face às consequências das alterações climáticas, à rápida urbanização e aos desafios da segurança hídrica. Além disto, as infraestruturas urbanas, caracterizadas pela complexidade e dependência de sistemas centralizados, carecem de adaptação à rápida urbanização. Embora a água doce seja um recurso natural em constante renovação, a sua disponibilidade é limitada e está sujeita a uma pressão crescente em várias regiões, como a bacia mediterrânica. A diminuição da pluviosidade e ocorrência de secas prolongadas, fenómenos agravados pelas alterações climáticas, exacerbam os desafios relacionados da gestão dos recursos hídricos nestas áreas (APA, 2019). As estratégias contemporâneas propõem sistemas híbridos locais que integram as infraestruturas existentes com soluções descentralizadas e flexíveis (Wong et al., 2023), promovendo uma progressiva resiliência a estes desafios emergentes. Por conseguinte, é imperativo adotar uma abordagem integrada que considere tanto os sistemas centralizados como os

descentralizados na gestão da água urbana para promover uma maior sustentabilidade e resiliência face aos desafios em evolução.

Uma análise dos novos paradigmas do ciclo urbano da água (Silva-Afonso, 2024) e das dinâmicas transversais que regem o setor revela áreas essenciais de ação (Talone, 2023), como a eficiência hídrica no ambiente construído, a reutilização da água e a captação de águas pluviais. A inovação em ferramentas e soluções tecnológicas é fundamental, seguindo o princípio dos "5R" (Silva-Afonso, 2009) — reduzir os consumos e as perdas/desperdícios, reutilizar e reciclar a água e recorrer a origens alternativas — que podem conduzir a poupanças significativas de água potável nos edifícios, estimadas entre 30% e 50% (Adene, 2024). O controlo ativo de perdas de água é essencial para melhorar a eficiência e o desempenho das redes existentes, enquanto a transição digital, com tecnologias como a telemetria em contadores e sistemas de monitorização, permite a deteção rápida de problemas e a implementação eficaz de medidas corretivas (Bona, Silva-Afonso, et al., 2024). A utilização de águas residuais tratadas oferece uma fonte alternativa de água, com tecnologias avançadas que a transformam em água regenerada para diversos usos, com exemplos de aplicação em Portugal, Singapura e Namíbia (CML, 2024; Martins et al., 2022), permitindo ainda a recuperação e valorização de subprodutos como biogás, bioplásticos e bionutrientes (Águas do Tejo Atlântico, 2023). O Plano Estratégico de Reutilização de Água de Lisboa aspira reduzir o consumo de água potável da Câmara Municipal em cerca de 75% até 2025, através da implementação de uma nova rede de água reciclada, incluindo parcerias com grandes consumidores privados (CML, 2024). No entanto, esta abordagem centralizada tem de ser complementada por soluções locais para reforçar a segurança hídrica aos níveis comunitários. A gestão integrada de recursos (água, energia e nutrientes) em áreas urbanas tem benefícios para o desenvolvimento sustentável e a segurança alimentar (Silva-Afonso & Pimentel-Rodrigues, 2024). A gestão das águas pluviais por meio de soluções baseadas na natureza realça a sua multifuncionalidade em comparação com as estruturas convencionais (Bona et al., 2022; Bona, Rodrigues, et al., 2024). Estas soluções contribuem para reter naturalmente a água, reduzir a poluição dos cursos de água, recarregar os aquíferos e melhorar a estética urbana e a biodiversidade (Bona, Rodrigues, et al., 2024).

A integração de práticas de recuperação de recursos ao longo do ciclo da água é fundamental para a sustentabilidade e emerge como uma prática promissora para as comunidades urbanas (*Urban Water Communities*: UWC) e edifícios de consumo quase zero (*Nearly Zero Water Buildings*: NZWB), a par das inovações já reconhecidas no setor energético (European Parliament, 2023). Inspirados no sucesso dos edifícios de energia quase nula, os NZWB representam uma abordagem inovadora que promove a eficiência hídrica não apenas em edifícios individuais, mas também como base para o desenvolvimento de UWC. Esta transição do conceito de NZWB para UWC (com a gestão de excedentes e défices envolvendo edifícios e sistemas públicos) não só amplifica os benefícios, como também estabelece uma abordagem coletiva crucial em contextos urbanos com elevada procura de água. Num cenário ideal, os NZWB utilizam fontes alternativas e tratam todas as águas residuais localmente, formando um grande ciclo fechado (U.S. Department of Energy, 2023). Num modelo mais convencional, os edifícios compensam o consumo de água doce com fontes alternativas e devolvem a água à fonte original por meio de infraestruturas verdes (LEED, 2020; U.S. Department of Energy, 2023). O desenvolvimento de regulamentação específica e de sistemas de certificação técnico-sanitária é essencial para garantir a qualidade e segurança das práticas de NZWB e UWC, facilitando assim a sua implementação generalizada.

No entanto, a implementação de práticas que promovam a circularidade da água no meio urbano revela importantes lacunas de conhecimento. É fundamental efetuar uma caraterização dos consumos no setor urbano, para determinar as quantidades mínimas necessárias para cada uso e para abordar

os requisitos de qualidade da água para cada uso específico, tendo em conta os hábitos de consumo. A captação de águas pluviais e a reutilização de águas cinzentas, por exemplo, são práticas promissoras para NZWB e UWC, mas em muitos países, tal como Portugal, carece-se de regulamentação, diretrizes e normas de qualidade definidas (APA, 2019; Tripathy et al., 2024). Neste contexto, este estudo visa analisar os regulamentos técnicos nacionais e internacionais sobre a gestão da água em edifícios e comunidades (micro e meso escala, segundo Bona et al., 2022), com especial atenção às fontes alternativas de água locais, em particular, a captação de águas pluviais e a utilização de águas cinzentas. O objetivo é desenvolver um modelo que equilibre as alternativas de oferta e procura de água para usos domésticos não potáveis como alternativa ou complemento ao abastecimento público de água. Esta investigação planeia contribuir para o desenvolvimento de diretrizes mais abrangentes, preencher lacunas de conhecimento e fornecer orientações para políticas públicas e práticas privadas que promovam a sustentabilidade da água em contextos urbanos, especialmente em regiões suscetíveis a secas prolongadas, como a região mediterrânica. Para o efeito, foi realizado um estudo de investigação aplicada com uma abordagem qualitativa de elementos textuais de regulamentos, normas técnicas e práticas recomendadas em vigor. Esta análise foi efetuada utilizando as técnicas de análise de conteúdo (Bardin, 2009).

2 GESTÃO INTEGRADA E DESCENTRALIZADA DA ÁGUA URBANA: UMA ABORDAGEM RESILIENTE

É fundamental direcionar o tipo adequado de água para cada uso, garantindo a qualidade necessária para os fins a que se destina (*fit-for-purpose*) (Decreto-Lei n. 119, 2019). Entre as funções que normalmente requerem água no quotidiano dos diferentes tipos de atividades consumidoras, existem variadas exigências que não requerem água com padrões de potabilidade, competindo com usos mais nobres, como o consumo humano. Por exemplo, o consumo médio diário de água por habitante em Portugal é de aproximadamente 195 litros (ERSAR, 2023), enquanto apenas 20 litros são considerados como o mínimo necessário para cumprir as diretrizes da Organização Mundial de Saúde (OMS) para água potável — essencial para a saúde e higiene humana (WHO, 2013). Este facto realça a importância da conservação e utilização eficiente dos recursos hídricos.

A gestão integrada e descentralizada da água urbana aspira dar respostas a estes desafios, promovendo uma visão holística que privilegia a resiliência. Fundamentada na otimização e reutilização dos recursos hídricos, esta abordagem tem em vista desenvolver um modelo que equilibre as alternativas de oferta e procura de água para usos não potáveis, considerando soluções integradas de eficiência hídrica, economia circular e processos naturais. Estão disponíveis várias soluções e tecnologias sustentáveis, como NbS, que apoia o tratamento e a reutilização descentralizados da água; sistemas compactos de tratamento ou regeneração de águas cinzas para uso residencial, que permitem poupanças significativas de água potável; e, no limite, a dessalinização da água, eficaz em regiões próximas do mar com acesso limitado à água doce. A metodologia proposta para esta gestão é apresentada na Figura 1, a qual promove a circularidade e a eficiência em diferentes escalas, desde edifícios individuais até às comunidades urbanas, gerindo a água de forma sustentável desde a captação até à sua reintrodução no ciclo hidrológico. A gestão da procura inclui estratégias para promover a eficiência hídrica no ambiente construído, como a redução dos consumos, o controlo das perdas, a utilização de dispositivos eficientes e a sensibilização dos utilizadores. Além disto, a segmentação do consumo consoante a sua finalidade contribui para uma gestão mais eficaz do recurso, como destacado no Quadro 1. A gestão da oferta de água é também uma parte importante do processo, envolvendo o recurso a fontes alternativas, como as águas pluviais e freáticas, e a utilização de águas residuais tratadas. Estas origens alternativas ajudam a reduzir a dependência da água potável e promovem a sustentabilidade do abastecimento de água. Esta abordagem visa otimizar o ciclo da

água, maximizar a utilização dos recursos e minimizar o impacto ambiental, protegendo simultaneamente a saúde pública. Em suma, a abordagem resiliente proposta não é apenas uma resposta aos desafios atuais, mas também uma visão para o futuro, garantindo a adaptação e a sustentabilidade das infraestruturas urbanas de água.

Figura 1 – Modelo de Gestão Integrada e Descentralizada da Água Urbana

O modelo da Figura 1 otimiza o uso de recursos hídricos ao integrar princípios circulares e resilientes. A utilização de fontes alternativas, com tecnologias descentralizadas, reduz a demanda por água potável e mitiga os impactos ambientais do tratamento de águas residuais. Essa abordagem fortalece a sustentabilidade das infraestruturas urbanas e capacita as comunidades a enfrentarem desafios futuros de escassez hídrica e mudanças climáticas, alinhando-se aos ODS.

O Quadro 1 oferece uma análise sucinta das possíveis opções de utilização dos diferentes tipos de água segregados. A separação dos fluxos, como urina, fezes, águas cinzentas e águas pluviais, oferece oportunidades para uma recuperação eficiente e económica dos recursos, evitando investimentos desnecessários no tratamento. Esta abordagem é particularmente atraente para soluções descentralizadas, uma vez que estão próximas da fonte do efluente (WWAP, 2017). Deve-se considerar esta abordagem sempre que possível, especialmente para águas pluviais e águas cinzentas, as quais proporcionam opções de tratamento menos complexas e onerosas, alcançando níveis mais elevados de eficiência sem comprometer a saúde pública ou causar um impacto ambiental inaceitável.

Quadro 1 – Alternativas de Uso para Efluentes de Águas Residuais e Pluviais (WWAP, 2017)

Substâncias	Águas Negras: Urina	Águas Negras: Fezes	Águas Cinzentas	Águas Pluviais
Tratamento	Higienização por armazenagem ou secagem	Digestão anaeróbia, secagem, compostagem	Zonas húmidas construídas, lagoas de estabilização, tratamento biológico, tecnologia de membranas	Filtração, tratamento biológico
Utilização	Fertilizante líquido ou seco	Biogás, melhoria dos solos	Irrigação, recarga de águas subterrâneas ou reutilização direta	Abastecimento alternativo de água, recarga de águas subterrâneas

2.1 BALANÇO HÍDRICO DO EDIFÍCIO

O balanço hídrico parte da caracterização hídrica do edifício que aborda os consumos de água e geração de efluentes das diversas atividades consumidoras. A sua elaboração é específica para cada caso, considerando tipologia, população, ocupação, comportamento dos utilizadores, localização e equipamentos que consomem água. O objetivo é identificar a oferta e procura na edificação, auxiliando em estudos de viabilidade técnica e económica que visam sugerir ações eficientes para a gestão hídrica (ABNT NBR 16782, 2019; ABNT NBR 16783, 2019; BS 8595, 2013).

Antes de avaliar o equilíbrio entre oferta e procura, é crucial identificar as fontes de água disponíveis para utilização e reutilização, bem como os potenciais usos finais da água tratada e/ou regenerada (BS 8595, 2013). Isto permite a diversificação da matriz de abastecimento do edifício e a redução do consumo de água potável em usos onde a potabilidade não é essencial (ABNT NBR 16782, 2019; ABNT NBR 16783, 2019).

Em casos envolvendo edifícios ou comunidades urbanas com populações representativas, estimativas médias podem ser adotadas para o dimensionamento (BS 8595, 2013). Se medidas de eficiência hídrica estiverem a ser implementadas em conjunto com a utilização e reutilização da água, como torneiras de baixo fluxo e autoclismos de descarga reduzida ou dupla, o balanço hídrico deve considerar as taxas de consumo mais baixas destes equipamentos e acessórios eficientes em termos de água. Isto pode ser calculado utilizando uma calculadora de eficiência hídrica (BS 8595, 2013), conforme manuais disponíveis (HM Government, 2016; Silva-Afonso & Pimentel-Rodrigues, 2017).

2.2 ÁGUAS CINZENTAS

Águas cinzentas são águas residuais domésticas que não contêm matéria fecal, ou seja, são as águas que constituem a componente não sanitária das águas residuais. Elas provêm, geralmente, de banheiras, duches, lavatórios, lavagem de roupa e cozinhas (ANQIP ETA 0905, 2023; BS EN 16941-2, 2021; PUB, 2014). As suas características variam conforme as fontes e requerem diferentes níveis de tratamento, consoante o uso pretendido. Portanto, os sistemas de águas cinzentas podem ser bastante diversificados em termos de complexidade e escala. As águas residuais domésticas com baixa concentração de poluentes, como aquelas originadas por banheiras, duches e lavatórios, podem ser consideradas para utilização (ANQIP ETA 0905, 2023; BS EN 16941-2, 2021). No entanto, aquelas provenientes de lava-louças e máquinas de lavar louça, por norma, são excluídas devido aos altos níveis de matéria orgânica, gorduras, óleos e detergentes, que requerem um tratamento mais complexo e oneroso.

A norma britânica BS EN 16941-2, 2021 estabelece uma hierarquia para a oferta e procura de águas cinzentas, priorizando o uso e captação preferencial destas águas. Por exemplo, a descarga de autoclismos é a utilização prioritária, seguida pelo uso externo sem pulverizador, lavandaria e uso externo com pulverizador. Para facilitar o tratamento, a captação é priorizada conforme as fontes, começando por banheiras e duches, seguidos por lavatórios, máquinas de lavar roupa e, por último, lava-louças de cozinha e/ou máquinas de lavar louça (BS EN 16941-2, 2021).

Como método de cálculo existem duas abordagens principais para a estimativa da oferta e procura de águas cinzentas: a abordagem simplificada e a abordagem pormenorizada. A abordagem simplificada (Quadro 2) é aplicável a edifícios residenciais e baseia-se num equilíbrio de pressupostos como a procura diária relativamente constante por pessoa para descarga de autoclismos e lavagem de roupas, e a produção diária constante de águas cinzentas por pessoa (BS EN 16941-2, 2021).

Quadro 2 – Oferta e Procura Média Diária — Águas Cinzentas: Abordagem Simplificada (BS EN 16941-2, 2021)

Ocupação	**Oferta** (1)	**Procura**		
		Casa de Banho	**Lavandaria** (2)	**Outras utilizações não potáveis** (3)
1 pessoa	60	35	15	10
(1) Produção de duches, banheiras e/ou lavatórios. *(2) Estes valores baseiam-se na procura média diária. Note-se que uma máquina de lavar roupa utiliza normalmente 30 L a 60 L por ciclo.* *(3) Por exemplo, rega de jardim.*				

No contexto de Singapura, as águas cinzentas das casas de banho (banheira, lavatório e duche) representam cerca de 40% do volume total de águas cinzentas utilizáveis, enquanto as da lavandaria contribuem com cerca de 20% (PUB, 2014). Em Portugal, segundo a ANQIP ETA 0905, 2023, na ausência de estudos específicos, em edifícios novos ou reabilitados que dispõem de dispositivos eficientes do ponto de vista hídrico (ex.: classificação “A” do rótulo ANQIP ou verde do rótulo unificado europeu), o consumo médio de água pode ser estimado em cerca de 110 litros diários por habitante, com uma produção de águas cinzentas de aproximadamente 70 litros diários por habitante (Quadro 5).

Quadro 3 – Balanço Hídrico em Edifícios Residenciais com Dispositivos Eficientes (valores médios em litros por habitante e por dia) (ANQIP ETA 0905, 2023)

Natureza da Água Utilizada	Usos de Água	Águas Residuais Produzidas	Destino da Água
52 litros de água de qualidade alimentar	40 litros para duche, banheira e lavatórios	70 litros de águas cinzentas	40 (a 58) litros de águas cinzentas regeneradas
	12 litros para cozinha		12 (a 22) litros de águas cinzentas descarregadas
40 (a 58) litros de água regenerada	5 litros para limpezas		
	13 litros para máquina de lavar roupa		
	35 litros para descarga de autoclismos	35 litros de águas negras	35 litros de águas negras descarregadas
	5 litros para regas	—	Infiltração no solo

Ao analisar as diferentes normas, observa-se uma coerência e similaridades tanto na oferta como na procura de águas cinzentas domésticas. Por exemplo, no contexto português (Quadro 5), cerca de 57% do volume total de águas cinzentas produzidas provêm das águas das casas de banho, enquanto 19% são da máquina de lavar roupa. Estes valores podem ser comparados com os padrões de Singapura, mostrando uma certa diferença nos consumos das casas de banho, o que pode ser atribuído aos hábitos de consumo locais. Destaca-se que a quantidade e origem das águas cinzentas podem variar consideravelmente consoante a natureza e atividade dos edifícios, bem como com os hábitos de consumo dos ocupantes (ANQIP ETA 0905, 2023; PUB, 2014). Estes fatores influenciam diretamente os padrões de produção e utilização das águas cinzentas em instalações residenciais e comerciais.

Outra análise a ser feita é em relação aos 60 litros de águas cinzentas oferecidas (Quadro 2), as quais são comparadas aos valores médios de 40 a 58 litros de água regenerada, especificados no Quadro 5. Para os usos específicos, é possível comparar que 35 litros são destinados a casas de banho, confirmando a especificação portuguesa de 35 litros para descarga de autoclismos, enquanto 15 litros são para lavandaria, muito similar aos 13 litros para máquinas de lavar roupa. Por fim, os demais consumos referem 10 litros para outras utilizações não potáveis, muito similar ao considerar 5 litros para limpezas e 5 litros para rega. Ao comparar os valores atribuídos a diferentes fontes de águas cinzentas e os seus usos, é possível identificar padrões e tendências que podem orientar políticas e práticas de gestão sustentável de água em comunidades urbanas.

A abordagem pormenorizada parte do princípio de que a oferta e a procura são constantes, excluindo picos de utilização. Esta abordagem pode ser utilizada para instalações residenciais, comerciais, industriais ou públicas (BS EN 16941-2, 2021). A abordagem pormenorizada considera variações específicas no comportamento de consumo de água, oferecendo uma análise mais precisa para a gestão de águas em diferentes tipos de instalações.

Oferta Águas Cinzentas: para calcular a produção, utiliza-se a expressão (1) (BS EN 16941-2, 2021):

$$Y_G = n \times (Q_S \times t_S \times u_S + V_{BT} \times u_{BT} + Q_{HWB} \times t_{HWB} \times u_{HWB} + V_{WM} \times u_{WM} + Q_{KS} \times t_{KS} \times u_{KS} + V_{DW} \times u_{DW}) \quad (1)$$

onde:

Y_G	oferta de águas cinzentas por dia (L/d)
n	número de pessoas (p)
Q_S	caudal volumétrico do duche/chuveiro (L/min)
t_S	duração por utilização do duche/chuveiro (min)
u_S	taxa de utilização do duche/chuveiro (1/(p · d))
V_{BT}	volume de água por utilização da banheira (L) - não é o volume máximo de enchimento
u_{BT}	taxa de utilização da banheira (1/(p · d))
Q_{HWB}	caudal volumétrico do lavatório (L/min)
t_{HWB}	duração por utilização do lavatório (min)
u_{HWB}	taxa de utilização de lavagens de mãos (1/(p · d))
V_{WM}	volume de água da máquina de lavar roupa por ciclo de funcionamento (L)
u_{WM}	número de ciclos de operação da máquina de lavar roupa (1/(p · d))
Q_{KS}	caudal volumétrico das torneiras (água quente e fria) do lava-louça (L/min)
t_{KS}	duração da utilização do lava-louça (min)
u_{KS}	taxa de utilização da torneira do lava-louça (1/(p · d))

V_{DW} volume de água da máquina de lavar louça por ciclo de funcionamento (L)
u_{DW} número de ciclos de operação da máquina de lavar louça (1/(p · d))

Procura Águas Cinzentas: para calcular a necessidade, utiliza-se a expressão (2) (BS EN 16941-2, 2021):

$$D_G = n \times (V_T \times u_T + V_U \times u_U + V_{WM} \times u_{WM}) + V_{misc} \quad (2)$$

onde:

D_G procura de águas cinzentas por dia (L/d)
n número de pessoas (p)
V_T volume de água para a descarga de autoclismo por utilização (L)
u_T taxa de utilização do autoclismo (1/(p · d))
V_U volume de água para a descarga de urinol por utilização (L)
u_U taxa de utilização do urinol (1/(p · d))
V_{WM} volume de água da máquina de lavar roupa por ciclo de funcionamento (L)
u_{WM} número de ciclos de operação da máquina de lavar roupa (1/(p · d))
V_{misc} volume de água para outros fins (ex.: rega de jardins, limpeza) (L/d)

2.3 ÁGUAS PLUVIAIS

Opções alternativas à drenagem convencional, como a coleta e infiltração da água da chuva, com a detenção descentralizada, não apenas reduzem a procura por água potável e a descarga de água, mas também mantêm o ciclo natural da água (BS EN 16941-1, 2018). A utilização da água pluvial abrange uma variedade de aplicações, desde descargas sanitárias e lavagem em máquinas de lavar roupa até limpeza geral e rega de áreas verdes, bem como outros usos que não requerem água potável (ex.: torres de arrefecimento, redes de incêndio, climatização de edifícios) (ANQIP ETA 0701, 2022), em comunidades urbanas e espaços públicos, como ruas, parques, campos de golfe e parques de estacionamento (BS EN 16941-1, 2018).

No entanto, é crucial considerar diversos fatores que afetam tanto a qualidade quanto a quantidade da água recolhida. Estes incluem o padrão de precipitação local, área de captação, materiais e características de drenagem da superfície, o dimensionamento e material dos sistemas de tubagem, os níveis de poluição na área de captação e o risco de contaminação do sistema (BS EN 16941-1, 2018).

Para prevenir a deterioração da qualidade da água no reservatório de armazenamento, recomenda-se instalar dispositivos, como grades e telas, para remoção de sólidos indesejados, que devem ser retidos e/ou desviados. Recomenda-se também que as primeiras águas não sejam aproveitadas, sendo preferível instalar no sistema um dispositivo para desvio do escoamento inicial (*first flush*), de preferência automático (ABNT NBR 15527, 2019; ANQIP ETA 0701, 2022). Caso não seja suficiente para atender aos padrões mínimos de qualidade, pode ser necessário um tratamento adicional utilizando soluções físicas e químicas (ABNT NBR 15527, 2019).

Oferta Águas Pluviais: para determinar o volume de água da chuva a aproveitar, utiliza-se a expressão (3) (ABNT NBR 15527, 2019; ANQIP ETA 0701, 2022; BS EN 16941-1, 2018):

$$Y_R = A \times P \times C \times \eta \quad (3)$$

onde:

Y_R oferta de água da chuva por intervalo de tempo (L)
A projeção horizontal da superfície de captação (m²) — não considerar superfícies que estejam em contacto com fontes poluidoras
P altura de precipitação total para um determinado intervalo de tempo (mm) — considerar estudos de pluviosidade com séries históricas de precipitação correspondentes a períodos não inferiores a 10 anos
C coeficiente de escoamento superficial (relação entre o volume captado e o volume total de precipitação)
η coeficiente de eficiência hidráulica da filtragem — em filtros com manutenção e limpeza regulares pode ser admitido η de 0,9, a menos que suas características ou o fabricante recomendem a adoção de outro valor

Procura Águas Pluviais: o Quadro 5 apresenta valores de consumo indicativos por tipo de dispositivo ou utilização, que podem ser considerados no dimensionamento dos sistemas. Estes valores foram estimados com base em dispositivos classificados como eficientes (ANQIP ETA 0701, 2022).

Quadro 4 – Consumos Unitários e Anuais por Dispositivo ou Utilização (ANQIP ETA 0701, 2022)

Dispositivo ou Utilização			Consumo Unitário	Consumo Mensal ou Anual Estimado
Autoclismos (categoria "A")(1) em residências			24 litros/(pessoa.dia)	720 litros/(pessoa.mês) 8800 litros/(pessoa.ano)
Autoclismos (categoria "A")(1) em edifícios de serviços (escritórios, etc.)			12 litros/(pessoa.dia)	360 litros/(pessoa.mês) 4400 litros/(pessoa.ano)
Lavagem de roupa (máquina da categoria "A")(2)			10 litros/(pessoa.dia)	300 litros/(pessoa.mês) 3600 litros/(pessoa.ano)
Limpezas Gerais (3)		Lavagem de pavimentos	5 litros/m²	100 litros/(pessoa.mês) 1000 litros/(pessoa.ano)
		Lavagem de automóveis (*self-service*)	50 litros/automóvel	
Rega de zonas verdes (valores para anos médios) (4)	Valores totais: abril a setembro	Relvados (5)	—	450 a 800 litros/m²
		Jardins (6)	—	60 a 400 litros/m²
	Valores máximos (por dia): Verão	Relvados (5)	5 a 7 litros/m²	—
		Jardins (6)	1,5 a 5 litros/m²	—

(1) Autoclismo de 6 litros com dupla descarga.
(2) Máquina com consumo de 9 a 12 litros por kg.
(3) Trata-se de uma estimativa grosseira para residências, pois o global pode variar de forma muito significativa.
(4) Considera-se que, em Portugal Continental, a rega de espaços verdes deve ser considerada uma utilização temporalmente limitada nos Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais, dado que as maiores necessidades de rega surgem nos períodos de estiagem mais prolongados. Por este motivo, entende-se não haver interesse em considerar valores totais superiores aos indicados como estimativas médias semestrais. Deve ainda se salientar a tendência atual para a realização de jardins sem necessidade de rega. Nas Regiões Autónomas estas necessidades podem ser inferiores (ou mesmo inexistentes).
(5) Função do tipo de relva, do tipo de solo e da zona do país.
(6) Função do tipo de culturas, do tipo de solo e da zona do país (considerando um misto de relvados e zonas arbustivas).

2.4 QUALIDADE E TRATAMENTO DAS ÁGUAS PARA REUTILIZAÇÃO NÃO POTÁVEL

A reutilização de águas tem evoluído globalmente, abrangendo uma variedade de usos, desde agrícolas, industriais, urbanos e até potáveis. As águas residuais tratadas são vistas como uma fonte alternativa de água para diversos fins. No entanto, é essencial garantir que os possíveis efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente sejam minimizados, requerendo definição rigorosa de normas de qualidade (APA, 2019). Segundo o Decreto-Lei n.º 119, 2019, que estabelece o regime jurídico da produção e utilização de água regenerada a partir de águas residuais tratadas em contexto urbano, a sua reutilização inclui aplicações recreativas, paisagísticas, lavagem de ruas, combate a incêndios, arrefecimento, descargas de autoclismos e lavagem de veículos. Por outro lado, ANQIP ETA 0905, 2023, define critérios técnicos para sistemas construtivos que utilizam águas cinzentas, permitindo a sua utilização em descargas de autoclismos, lavagem de roupas, rega de jardins e limpezas, após tratamento adequado.

A qualidade da água e o tratamento necessário são determinados pela utilização final, a probabilidade de contacto humano e o nível de risco envolvido. A gestão dos riscos deve incluir tratamento da água recuperada, manutenção dos sistemas, amostragem para monitorização, controle do estado do sistema e identificação das condutas que fornecem água para reutilização (BS 8595, 2013). Os sistemas de tratamento de águas cinzentas variam em complexidade e tamanho, dependendo das características das águas recolhidas e dos requisitos de qualidade para a aplicação pretendida. Podem incluir uma ou mais das seguintes etapas (BS EN 16941-2, 2021): a) sedimentação/flotação: utilização de tanques de decantação para remover partículas sólidas; b) triagem: filtragem de partículas grandes; c) filtração mecânica fina: filtração por membrana para remoção de partículas finas; d) tratamento biológico: aeração para promover a decomposição biológica de matéria orgânica; e) tratamento químico: uso de agentes químicos, como cloro, para precipitação e desinfeção; e f) desinfeção por radiação ultravioleta: eliminação de microorganismos patogénicos. Um sistema de tratamento de águas cinzentas eficaz deve incluir etapas biológicas e de filtração e processos de desinfeção para garantir uma qualidade final estável. A instalação de dosagem de cloro no tanque de armazenamento é recomendada para assegurar que a água tratada está livre de microorganismos patogénicos e que o cloro residual é mantido durante todo o período de armazenamento (PUB, 2014), garantindo assim a qualidade e segurança da água tratada. Os sistemas de tratamento, que podem ser diretos, de retenção curta, físico-químicos básicos, biológicos ou biomecânicos, são selecionados com base nas necessidades específicas de cada aplicação e nas considerações de sustentabilidade e impacto ambiental (BS EN 16941-2, 2021).

Além do tratamento das águas cinzentas, é crucial direcionar atenção aos sistemas de aproveitamento das águas pluviais, considerando a sua depuração e tratamento. Segundo a especificação técnica ANQIP ETA 0701, 2022, em Portugal, estes tratamentos incluem: a) tratamentos básicos por filtragem (no filtro de montante) e por sedimentação e flutuação (na cisterna), proporcionando uma purificação inicial; b) para atividades como rega de zonas verdes, lavagem de pavimentos e descargas de autoclismos, a água da chuva pode não carecer de qualquer tratamento adicional; c) em casos de suspeita ou deteção de contaminação microbiológica, é recomendada a desinfeção com o tratamento apropriado; e d) quando a área de captação integra zonas poluídas, como áreas de trânsito de veículos, devem ser considerados tratamentos suplementares adequados, como floculação e/ou desinfeção.

Os quadros seguintes apresentam as normas de qualidade da água para diferentes usos urbanos e paisagísticos e os níveis de tratamento adequados (Quadro 5 e Quadro 6). Ao implementar sistemas de tratamento adequados, é possível assegurar a reutilização segura e eficiente das águas cinzentas e pluviais para fins não potáveis, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Quadro 5 - Normas de qualidade da água não potável: Comparação de diferentes aplicações (ANQIP ETA 0905, 2023; Decreto-Lei n.º 119, 2019)

Usos/Aplicações / Parâmetros	Combate a incêndios	Arrefecimento	Autoclismos		Usos recreativos e paisagísticos (rega de jardins privados)		Rega	Lavagem de veículos		Lavagem de ruas	Lavagem de roupas
Regulamentação	*DL (1)*	*DL*	*DL (1)*	*ETA*	*DL*	*ETA*	*DL (2)*	*DL (1) (3)*	*ETA*	*DL (1)*	*ETA*
pH	6,0 a 9,0	6,5 a 8,5 (4)	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0 (VMA)	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0 (VMR)		6,0 a 9,0	6,0 a 9,0 (VMA)	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0 (VMA)
Turvação (NTU)	≤5		≤5	≤5 (VMA) ≤2 (VMR)	≤5	≤5 (VMA) ≤2 (VMR)	≤5	≤5	≤5 (VMA) ≤2 (VMR)		≤5 (VMA) ≤2 (VMR)
CBO_5 (mg/L O_2)	≤25	≤25	≤25	≤25 (VMR)	≤25	≤10 (VMR)	≤10			≤25	
Azoto Amoniacal (mg NH_4+/L)		≤5 ≤1 (5)	≤10	≤10 (VMR)	≤5	≤10 (VMR)	10 (6)				
Azoto Total (mg N/L)						≤15 (VMR)	15 (6)				
P_{total}: Fósforo Total (mg/L)					≤2 (7)	≤5 (VMR)	5 (6)				
SST (mg/L)						≤10 (VMA)	≤10		≤10 (VMR)		≤10 (VMR)
Escherichia coli (ufc/100 mL)	≤10	≤200	≤10	≤250 (VMA) ≤10 (VMR)	≤10	≤200 (VMA) ≤10 (VMR)	≤10	≤10			
Coliformes Totais (ufc/100 mL)				$\leq 10^3$ (VMR)		$\leq 10^4$ (VMR)			≤10 (VMR)		≤10 (VMR)
Enterococos (ufc/100 mL)				≤100 (VMA)		≤100 (VMA)					
Pseudomonas aeruginosa (ufc/mL)									≤1 (VMR)		≤1 (VMR)
Parasitas Entéricos (ovo/10 L)						≤1 (VMR)			≤1 (VMR)		≤1 (VMR)
Cloro Residual (mg/L)				≤2(VMA)(8)		≤0,5(VMA)(8)			≤2(VMA)(8)		≤2(VMA)(8)
Legionella spp. (ufc/100 mL)						$\leq 10^3$(VMA)(9)			$\leq 10^3$(VMA)(9)		

VMA = Valor Máximo Aceitável; VMR = Valor Máximo Recomendável; DL = Decreto-Lei n.º 119/2019; ETA = ANQIP ETA 0905; CBO_5 = Carência Bioquímica de Oxigénio; SST: Sólidos Suspensos Totais
(1) Para os usos de lavagem manual a alta pressão e para quaisquer outras vias de exposição por ingestão não intencionada, a qualidade da água deve ser similar à exigida para rega (Decreto-Lei n.º 119/2019).
(2) Rega sem restrição de acesso: rega de culturas consumidas em cru na qual a parte consumível está em direto contacto com a água e rega de jardins públicos sem restrição de acesso.
(3) Em função das especificidades de aplicação das águas para reutilização poderão ser controlados alguns metais e compostos iónicos, tais como ferro, manganês, cloretos, sulfatos, alcalinidade e sílica, para minimização da ocorrência de calcificação ou corrosão dos sistemas de armazenagem e distribuição de água.
(4) Pode ocorrer crescimento microbiano a valores superiores ou inferiores a esta gama de pH.
(5) Na presença de cobre.
(6) Parâmetro facultativo. Poderá ser aplicável em alguns projetos de rega para minimização dos riscos de formação de biofilme e obstrução dos sistemas de rega.
(7) Quando utilizado em locais sujeitos à ocorrência de eutrofização (ex.: lagos urbanos, fontes).
(8) Quando usado cloro no processo de regeneração das águas cinzentas.
(9) Quando existir risco de formação de aerossóis (pulverizadores, aspersores, nebulizadores, etc.).

Quadro 6 - Níveis e tipos de tratamento adequados a cada uso urbano (APA, 2019; Decreto-Lei n.º 119, 2019)

Uso Urbano	Suporte de ecossistemas	Combate a incêndios	Arrefecimento	Autoclismos	Usos recreativos e paisagísticos	Rega	Lavagens (veículos e ruas)
Nível de Tratamento	Secundário ou mais avançado que secundário (1)	Mais avançado que secundário	Mais avançado que secundário	Mais avançado que secundário	Mais avançado que secundário	Mais avançado que secundário (desinfeção)	Mais avançado que secundário
Tipo de Tratamento	Tratamento secundário (2) e eventual desinfeção (3) e/ou remoção de N e P	Tratamento secundário (2), filtração (4) (ex.: filtração por membranas) e desinfeção (3) (sistemas avançados de tratamento)	Tratamento secundário (2), filtração (4) (ex.: filtração por membranas) e desinfeção (3) (sistemas avançados de tratamento)		Tratamento secundário (2), filtração (4) (ex.: filtração por membranas) e desinfeção (3) (sistemas avançados de tratamento)	Tratamento secundário (2), filtração (4) (ex.: filtração por membranas) e desinfeção (3) (sistemas avançados de tratamento)	

1) Depende do estado da massa de água e respetiva classificação no âmbito do Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de junho, com as alterações que lhe foram dadas pelos Decretos-Leis n.º 348/98, de 9 de novembro, n.º 149/2004, de 22 de junho n.º 198/2008, de 8 de outubro, e n.º 133/2015, de 13 de julho.
(2) Tratamento secundário convencional.
(3) Desinfeção inclui a radiação UV, ozonização, processos por membranas, cloragem (apenas admissível para manutenção de teor residual de desinfetante) ou outros processos de oxidação avançada. No caso da cloragem, a dosagem de cloro deve ser preferencialmente definida com base na carência de cloro, para minimizar a formação de subprodutos.
(4) Filtração refere-se a microfiltração, ultrafiltração, filtração por cartuchos, filtração por areia de alto rendimento, processos por membranas (incluindo reatores membranares), uso de meio filtrante duplo, uso de filtros têxteis e de disco (com ou sem adição de produtos químicos).

2.5 POTENCIAL DE RECURSOS — ÁGUAS RESIDUAIS

A recuperação de recursos ao longo do ciclo da água é crucial para a sustentabilidade, reduzindo custos, consumo de energia e emissões. Avanços tecnológicos viabilizam recuperar nutrientes, como azoto e fósforo, e a produção de biogás a partir de subprodutos do tratamento de águas residuais e resíduos sólidos orgânicos, com exemplos ao nível local (Silva-Afonso & Pimentel-Rodrigues, 2024) e em sistemas centralizados (Águas do Tejo Atlântico, 2023). No que se perspetiva ser o novo ciclo urbano, a água residual deixa de ser apenas um desperdício ou custo associado e torna-se num recurso valioso que pode ser tratado e reutilizado. A Figura 2 ilustra a transformação das águas residuais em recursos valiosos no ciclo urbano da água. Essa abordagem desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos em ambientes urbanos.

Figura 2 – Águas Residuais como Recursos no Ciclo Urbano da Água

As vantagens incluem a recuperação de energia, visto que a água residual contém energia química, térmica e hidráulica. Estima-se que a energia química na água residual doméstica, proveniente principalmente da matéria orgânica, seja de 1,5 kWh/m³, sendo a digestão anaeróbia a tecnologia mais utilizada para converter esta matéria orgânica em biogás. Em contrapartida, a energia térmica, embora menos explorada, é significativa, com potencial de extrair aproximadamente 5,8 kWh/m³ ao reduzir a temperatura da água residual em 5 °C (Raposo, 2024).

Outra vantagem do aproveitamento das águas residuais no ciclo urbano da água é a recuperação de matéria orgânica e nutrientes, como o azoto. A utilização direta do NH_4^+ das águas residuais na produção de proteína para alimentação animal pode ter um impacto significativo na redução de emissões de carbono, visto que produzir 1 kg de azoto como fertilizante requer 2 litros de combustível fóssil (Raposo, 2024). Projetos como o "Power to Protein" estão comprometidos no desenvolvimento de processos para produzir proteína a partir da amónia proveniente dos digestores anaeróbios, enquadrando-se na economia circular e centrando-se na recuperação e valorização do amónio do ciclo de águas residuais (Power to Protein, 2024). O fósforo, embora não seja um recurso renovável, pode ser recuperado de águas residuais e lamas, tornando-se uma alternativa viável para fertilização. Estima-se que 22% das necessidades globais de fósforo possam ser atendidas através da reciclagem de águas residuais domésticas (Raposo, 2024). Um adulto médio excreta cerca de 1 grama de fósforo por dia pela urina (Silva-Afonso & Pimentel-Rodrigues, 2024), destacando o potencial significativo de recuperação deste nutriente. O fósforo recuperado pode ser utilizado na agricultura urbana, na fertilização de jardins públicos e em coberturas verdes. Esta prática não só contribui para a segurança alimentar ao fornecer um fertilizante essencial, mas também reforça o elo fundamental do nexo água-nutrientes, essencial para uma economia circular sustentável e para o futuro das cidades.

A garantia de suprimentos adequados de alimentos, energia e água enfrenta desafios significativos globalmente. Em vez disto, são necessárias abordagens locais, adaptadas e específicas para cada contexto. A integração destes processos é fundamental para promover a sustentabilidade ambiental e económica, além de melhorar a qualidade de vida urbana. A relação entre água, energia e nutrientes desempenha um papel essencial no desenvolvimento sustentável do ambiente construído. Em ambientes urbanos, esta integração deve ser encarada como uma gestão local de recursos. Os sistemas urbanos, incluindo infraestruturas e edifícios, devem adotar modelos que facilitem uma gestão integrada de energia e dos recursos produzidos ou recuperados localmente.

3 CONCLUSÕES

À medida que enfrentamos os desafios emergentes relacionados com a disponibilidade hídrica, torna-se evidente a necessidade premente de repensar o ciclo urbano da água e adotar abordagens inovadoras e integradas para a sua gestão. A transição para comunidades urbanas mais sustentáveis e sensíveis à água exige uma abordagem holística que considere a eficiência hídrica, a economia circular, a resiliência das infraestruturas urbanas e a participação ativa das partes interessadas.

Este estudo contribui significativamente para essa transição ao propor um modelo de gestão que equilibra a oferta e procura de água para usos domésticos não potáveis, destacando tendências na reutilização de águas pluviais e cinzentas e a exploração de fontes alternativas. Além de preencher uma lacuna crucial ao apresentar um modelo de gestão hídrica inovador, que aborda os desafios contemporâneos de escassez hídrica e procura crescente, oferecendo soluções práticas e viáveis para a sustentabilidade das comunidades urbanas. A valorização das águas residuais como fontes de abastecimento de água, nutrientes e energia reforça a importância do nexus água-energia-alimentos.

Os esforços desta pesquisa continuarão com estudos mais avançados e a implementação de modelos de gestão adaptados a diferentes realidades, visando melhorar a compreensão e a eficácia das soluções propostas, garantindo um futuro resiliente, sustentável e equitativo.

Financiamento: Este trabalho é parcialmente financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/04450/2020 com o DOI 10.54499/UIDB/04450/2020 (RISCO), e no âmbito do projeto UIDB/00308/2020 com o DOI 10.54499/UIDB/00308/2020 (INESC). Este trabalho também foi apoiado pela Doctoral Grant 2021 MPP2030-FCT, financiada pela FCT, no âmbito do MIT Portugal Program [PRT/BD/152847/2021] (S. B.).

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15527. (2019). *Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos*. Associação Brasileira de Norma Técnicas.

ABNT NBR 16782. (2019). *Conservação de água em edificações – Requisitos, procedimentos e diretrizes*. Associação Brasileira de Norma Técnicas.

ABNT NBR 16783. (2019). *Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações*. Associação Brasileira de Norma Técnicas.

Adene. (2024). *Eficiência Hídrica - Agência para a Energia*. https://www.adene.pt/hidrica/

Águas do Tejo Atlântico. (2023). *Fábrica de Água: uma nova geração de recursos*. Grupo Águas de Portugal. https://www.aguasdotejoatlantico.adp.pt/content/fabrica-de-agua

ANQIP ETA 0701. (2022). *Especificação Técnica: Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais em Edifícios (SAAP).* (Vol. 11). Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais.

ANQIP ETA 0905. (2023). *Especificação Técnica: Sistemas Prediais de Aproveitamento de Águas Cinzentas (SPRAC).* (Vol. 3). Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais.

APA. (2019). *Guia para a Reutilização de Água – Usos Não Potáveis: Água para Reutilização (ApR).* Agência Portuguesa do Ambiente.

Bardin, L. (2009). *Análise de Conteúdo. rev. e atual.* (70th ed., Vol. 3).

Bona, S., Rodrigues, F., Gomes, R., & Silva-Afonso, A. (2024). Nature-based solutions for water resilience in thriving European urban areas. *Urban Water Journal*, 1–14. https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2359661

Bona, S., Silva-Afonso, A., Gomes, R., Matos, R., & Rodrigues, F. (2022). Nature-Based Solutions in Urban Areas: A European Analysis. *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 168*, *13*(1), 168. https://doi.org/10.3390/APP13010168

Bona, S., Silva-Afonso, A., Rodrigues, F., & Gomes, R. (2024). *Strategic Plan for Water Losses Management in Water Supply Systems*. 755–767. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9_70

BS 8595. (2013). *Code of practice for the selection of water reuse systems*. British Standards Institution.

BS EN 16941-1. (2018). *On-site non-potable water systems – Part 1: Systems for the use of rainwater*. British Standards Institution Standards Publication.

BS EN 16941-2. (2021). *On-site non-potable water systems – Part 2: Systems for the use of treated greywater*. British Standards Institution Standards Publication.

CML. (2024). *Câmara Municipal de Lisboa, Ambiente, Qualidade Ambiental, Água – Município de Lisboa*. https://www.lisboa.pt/cidade/ambiente/qualidade-ambiental/agua

Decreto-Lei n.º 119 (2019). *Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto: Estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização.* Presidência do Conselho de Ministros.

ERSAR. (2023). *ERSAR: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos – Factos e Números*. Volume 1 – Relatório Anual Dos Serviços de Águas e Resíduos Em Portugal (RASARP 2022). https://www.ersar.pt/pt/site-setor/site-factos-e-numeros

European Parliament. (2023). *Renewable energy*. Fact Sheets on the European Union. https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/70/renewable-energy

HM Government. (2016). *The Building Regulations 2010 (2015 edition with 2016 amendments) – Part G: Sanitation, hot water safety and water efficiency*. NBS, part of RIBA Enterprises Ltd.

LEED. (2020). *Leadership in Energy and Environmental Design - LEED Zero Program Guide*. https://www.usgbc.org/resources/leed-zero-program-guide

Martins, J. P., Godinho, F., & Vieira, S. (2022). *Achieving SDG 6 (Water Goals): Contribution from Engineering*. World Federation of Engineering Organizations Working Group on Water.

Power to Protein. (2024). *The Power-to-Protein principle*. https://www.powertoprotein.eu/about/

PUB. (2014). *Technical Guide for Greywater: Recycling System: Vol. 1st Edition V2*. Public Utilities Board – Singapore's National Water Agency.

Raposo, C. (2024, April 10). Água Residual como Recurso no Novo Ciclo Urbano da Água (TPF). *Academia Da Água (APRH) – Cidades Conscientes Na Gestão Da Água*.

Silva-Afonso, A. (2009). Building rainwater harvesting systems. Doubts and certainties. *35th CIB W062 - Dusseldorf-Germany*.

Silva-Afonso, A. (2024, January). Novos Paradigmas para o Ciclo Urbano da Água. *XXIII Congresso Nacional - Ordem Dos Engenheiros*.

Silva-Afonso, A., & Pimentel-Rodrigues, C. (2017). *Manual de Eficiência Hídrica em Edifícios*. ANQIP: Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais.

Silva-Afonso, A., & Pimentel-Rodrigues, C. (2024). Water–Energy–Nutrients Nexus of Urban Environments. *Water 2024, Vol. 16, Page 904*, *16*(6), 904. https://doi.org/10.3390/W16060904

Talone, D. (2023, January). Contribuição da inovação para as dinâmicas de novas fontes de água. *Indústria e Ambiente Nº138 - Água: "Novas" Fontes*, 11–13.

Tripathy, P., Prakash, O., Sharma, A., Juneja, C., Hiwrale, I., Shukla, V., & Pal, S. (2024). Facets of cost-benefit analysis of greywater recycling system in the framework of sustainable water security. *Journal of Cleaner Production*, *451*, 142048. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.142048

U.S. Department of Energy. (2023). *Net Zero Water Building Strategies*. https://www.energy.gov/femp/net-zero-water-building-strategies

WHO. (2013). *Technical Notes on Drinking-Water, Sanitation and Hygiene in Emergencies – How much water is needed in emergencies.* Water, Engineering and Development Centre – World Health Organization.

Wong, T., Ewert, J., & Cross, K. (2023, January 31). A roadmap for transforming cities. *The Source - International Water Association*, 42–45.

WWAP. (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource* (UNESCO). United Nations World Water Assessment Programme.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA

Elisabete Cordeiro[a]; Ana Beatriz Sousa[b]; António Leça Coelho[c];
João Branco Pedro[d]; Miguel Chichorro Gonçalves[e]

[a] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, eccordeiro@lnec.pt

[b] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal, up201905483@gmail.com

[c] Universidade Lusófona – Centro Universitário do Porto, R. de Augusto Rosa 24, 4000-098 Porto, Portugal, p901967@ulusofona.pt

[d] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, jpedro@lnec.pt

[e] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal, miguelcg@fe.up.pt

RESUMO

Nesta comunicação apresenta-se uma análise da relação entre a construção sustentável e a segurança contra incêndio em edifícios, destacando-se a sinergia entre estes dois requisitos essenciais de uma construção moderna.

Inicialmente, exploram-se os princípios fundamentais da construção sustentável, com ênfase na eficiência energética e na incorporação de materiais eco eficientes.

Em seguida, aborda-se a segurança contra incêndio, destacando-se a importância da escolha criteriosa de materiais com uma reação ao fogo que não contribua para o desenvolvimento do incêndio. Naturalmente, esta medida deve ser complementada com outras, com destaque para a instalação de sistemas automáticos de deteção e extinção de incêndios, bem como a implementação de estratégias eficazes de evacuação. Estas medidas são fundamentais para mitigar riscos e garantir a proteção dos ocupantes em situações de emergência.

Na parte final da comunicação explora-se a integração harmoniosa desses dois requisitos na construção. Analisa-se como as opções de construção sustentável podem ser alinhadas com as estratégias de segurança contra incêndio, promovendo a criação de edifícios que são seguros e ambientalmente sustentáveis.

Palavras-chave: Construção, Edifícios, Segurança Contra Incêndio, Construção sustentável

1 INTRODUÇÃO

A construção de edifícios é de grande importância para a sociedade atual, abrangendo diversas áreas de conhecimento. Neste contexto, a sustentabilidade ambiental e a segurança contra incêndio em edifícios (SCIE) assumem um papel fundamental na concretização do objetivo de promover a construção de edifícios seguros e ambientalmente responsáveis.

A sustentabilidade tem sido descrita como a capacidade de proporcionar uma elevada qualidade de vida para todos, tanto agora como no futuro. A sustentabilidade tem, essencialmente, o objetivo de melhorar a qualidade de vida. Argumenta-se que uma abordagem sustentável ao projeto de edifícios pode ser um meio eficaz de promover para o objetivo geral da sustentabilidade (Elnaklah *et al*. 2021).

A SCIE, por sua vez, é uma exigência incontornável no projeto de edifícios, facto que é reconhecido pelos governos da generalidade dos países, ao publicarem legislação específica sobre esta matéria. Essa legislação visa garantir que os edifícios têm caraterísticas que reduzam ao mínimo o risco de perda de vidas humanas e danos materiais resultantes de incêndios.

Acontece que a legislação nem sempre acompanha os novos desafios em matéria de segurança ao incêndio colocados pela evolução social e tecnológica. Constata-se, por vezes, que a resposta regulamentar aos novos desafios só é realizada após a ocorrência de acidentes graves.

Nesta comunicação apresenta-se uma análise dos novos desafios colocados pela construção sustentável à garantia da segurança contra incêndio. Após uma apresentação dos conceitos de construção sustentável e de segurança contra incêndio, discute-se como as opções de construção sustentável podem ser alinhadas com as estratégias de segurança contra incêndio.

2 A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

A sustentabilidade tem vindo a ganhar cada vez mais relevância na atualidade. Existe uma preocupação crescente com a crise climática, o que tem levado a um aumento progressivo nas medidas a favor da sustentabilidade. A verdadeira sustentabilidade é um sistema que não causa danos ao planeta. O principal objetivo é satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades (Robbins, 2012). Assim, a construção sustentável pode ser vista como um projeto que se foca principalmente em equilibrar os aspetos ambientais, económicos e sociais ao longo do ciclo de vida do edifício (Liu, 2022). Existem três princípios principais da sustentabilidade ambiental: reduzir o consumo de recursos não renováveis, melhorar o ambiente natural e melhorar a qualidade de vida (Liu, 2022). Cada um destes princípios deve ser considerado em todas as etapas de um projeto de construção.

Existem várias definições de “edifícios verdes”, “construção sustentável” e “edifícios sustentáveis”. De acordo com o *World Green Building Council* (WBGC), um “edifício verde” é aquele que, durante a fase de projeto, construção e utilização, reduz ou elimina os impactos negativos no ambiente, contribuindo, pelo contrário, para a sua melhoria. Os “edifícios verdes” contribuem para a preservação dos recursos naturais e melhoram a qualidade de vida dos ocupantes (McNamee e Meacham, 2023).

As certificações em edifícios verdes são concedidas para reconhecer e validar práticas de construção sustentável, que têm como objetivo reduzir o impacto ambiental e promover a conservação dos recursos naturais. Existem várias certificações de sustentabilidade, sendo algumas das mais reconhecidas o certificado *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o certificado *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM).

2.1 SUSTENTABILIDADE EM MATERIAIS

A sustentabilidade dos materiais e tecnologias utilizadas na construção é um conceito que incorpora técnicas, materiais e tecnologias avançadas para criar estruturas que sejam não apenas funcionais, mas que tenham, também, um impacto ambiental positivo (Tang *et al*., 2020).

Quando se fala sobre construção sustentável, está-se a referir a uma abordagem holística que leva em consideração cada etapa do processo de construção. Desde a fase inicial de planeamento até a demolição final, cada decisão é tomada com o objetivo de reduzir o consumo de energia e minimizar o impacto no meio ambiente (Lima *et al*., 2021). Esta abordagem tem as suas raízes na ideia de maximizar a eficiência do fluxo de energia. Ao considerar cuidadosamente fatores como a orientação do edifício, o isolamento e a ventilação, pode-se otimizar o uso de recursos naturais e reduzir a necessidade de fontes de energia artificiais (Ching, 2020). Isso não apenas economiza recursos, mas também ajuda a proteger o planeta.

A construção sustentável também visa criar estruturas projetadas para durar. Ao usar materiais duráveis e implementar estratégias adequadas de manutenção, pode-se prolongar a vida útil dos edifícios e reduzir a necessidade de manutenção. Isso não economiza apenas recursos, mas também reduz o desperdício. Além disso, a construção sustentável visa criar um ambiente interno saudável. Ao promover uma boa qualidade do ar interno, otimizar a iluminação natural e incorporar espaços verdes, pode-se melhorar o bem-estar e o conforto dos ocupantes. Isso, por sua vez, leva a um aumento da produtividade e satisfação (Elnaklah *et al*., 2021).

O conceito de construção sustentável está em constante evolução e impulsiona inovações arquitetónicas e de engenharia. À medida que a tecnologia avança e novos materiais são desenvolvidos, tem-se ainda mais oportunidades de criar edifícios que sejam tanto sustentáveis quanto esteticamente agradáveis (Umoh *et al*.2024).

Em resumo, a construção sustentável vai além de simplesmente erguer estruturas. Trata-se de mudar fundamentalmente a maneira como se pensa sobre o ambiente construído. Ao incorporar princípios de eficiência de recursos e ecologia em cada etapa do processo de construção, pode-se criar edifícios que não atendam apenas às nossas necessidades imediatas, mas também protejam e melhorem o planeta para as gerações futuras.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PROJETO DE EDIFÍCIOS

É essencial ter em consideração a energia incorporada dos materiais na abordagem abrangente do projeto sustentável de edifícios. Embora seja fundamental reduzir o consumo de energia operacional, também é muito importante ponderar a pegada de carbono dos materiais empregados na construção. Se um edifício tem uma vida útil prolongada, as economias alcançadas na energia operacional podem ser anuladas pela energia incorporada nos materiais. Portanto, uma abordagem holística, que considere tanto a energia operacional quanto a energia incorporada, é necessária para garantir a sustentabilidade de longo prazo dos edifícios (Asdrubali, *et al*., 2023).

Essa abordagem holística maximiza a eficiência geral de um edifício, minimiza seu impacto ambiental e estabelece uma base sólida para um futuro sustentável. Ao reconhecer a importância da eficiência energética, pode-se enfrentar eficazmente o problema urgente do uso de energia em edifícios (Hafez, *et al*., 2023), garantindo um ambiente construído mais sustentável e ecologicamente correto para as gerações futuras.

Para lidar com a questão do consumo de energia em edifícios, é crucial considerar a sustentabilidade de longo prazo e o impacto ambiental das escolhas. Com o crescimento da consciencialização sobre esta questão, fica evidente que a eficiência energética não é apenas uma palavra da moda, mas uma necessidade urgente para combater as mudanças climáticas.

Os ganhos decorrentes da priorização da eficiência energética ultrapassam as preocupações ambientais. Ao reduzir o consumo de energia, não apenas se mitiga a escassez energética, mas também se fortalece a segurança no fornecimento de energia. Diante dos crescentes custos dos combustíveis e da finitude dos recursos, a conceção voltada para a eficiência energética emerge como uma abordagem mais eficaz e economicamente viável (Umoh *et al*., 2024). Não se trata apenas de reduzir emissões prejudiciais, mas também de traçar um caminho para economias significativas a longo prazo.

3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Os incêndios podem ter graves consequências em termos de perda de vidas e património. Podem também ter implicações financeiras significativas para os indivíduos, as empresas e as seguradoras (Van Coile *et al*., 2023). Portanto, é imperativo garantir a SCIE no projeto, na construção e na utilização de qualquer edifício.

Os regulamentos de construção são amplamente influenciados pelas experiências do passado. Ao longo da história, alguns grandes desastres moldaram profundamente os regulamentos de construção, levando os países a promulgar, gradualmente, legislação especifica sobre a SCIE (Markel, 2021). Um desastre, que impactou drasticamente o curso dos regulamentos de construção, foi o Grande Incêndio de Londres ocorrido em 1666. Este incêndio teve consequências devastadoras que deixou uma memória indelével no território e na sociedade. Na sequência deste incêndio foi estabelecido o *London Building Act*, em 1667, que constituiu um marco na promoção da segurança na construção (Hood, 2020).

Atualmente existem regulamentos de SCIE nos diversos países. Estes regulamentos visam prevenir a ocorrência de incêndios e mitigar seu impacto quando ocorrem. No entanto, estes regulamentos são, em muitos casos, essencialmente prescritivos, centrando-se na definição de soluções mínimas, em vez de estabelecer níveis de desempenho (Hood, 2020; Markel, 2021). Como consequência, a adoção de abordagens alternativas ou inovadora é muitas vezes fortemente condicionada pelas entidades licenciadoras que impõem o cumprimento de regulamentação prescritiva.

Uma área em que os regulamentos podem limitar significativamente os projetistas é na fixação dos escalões de tempo a atribuir aos elementos estruturais, quando sujeitos à ação incêndio. Esses escalões de tempo especificam a duração durante a qual um elemento da construção, independentemente do material em que é executado (*e.g.*, betão, aço, alumínio, mista ou madeira) pode resistir ao fogo antes de ocorrer o seu colapso (Maiworm *et al*., 2023).

Embora esses requisitos sejam essenciais para garantir a segurança, podem impedir os projetistas que desejam explorar abordagens do projeto baseado na engenharia de segurança ao incêndio (Upasani *et al*.2020), as quais permitem a aplicação de conhecimentos científicos para demonstrar que as soluções alternativas cumprem, ou superam, o nível de segurança regulamentar. Esta abordagem permite a inovação, a otimização e a personalização das soluções, adotadas em cada edifício (Society of Civil Engineers, 2020).

Quanto às medidas de prevenção contra incêndio, estas são geralmente classificadas como estratégias de proteção passiva ou ativa. As medidas de proteção passiva visam garantir que o edifício e a sua organização espacial facilitam, naturalmente, a evacuação segura dos ocupantes durante um incêndio. Por exemplo, a separação dos caminhos de evacuação através do uso de corredores protegidos, tem-se mostrado uma medida de proteção passiva eficaz.

As estratégias de proteção ativa visam adotar medidas que, no caso de um incêndio, minimizam seu desenvolvimento e os danos causados. Isso pode incluir sistemas automáticos de deteção de incêndio, sistemas automáticos de extinção de incêndios, como *sprinklers*, meios mecânicos de controlo de fumo e outros.

Embora estas medidas de proteção ativa sejam cruciais para proteger as vidas e o património, também colocam desafios do ponto de vista da sustentabilidade. A instalação de materiais extra para compensar o potencial de libertação de energia durante um incêndio pode aumentar o impacto ambiental e o consumo de recursos (Ching, 2020; Van Coile *et al*., 2023).

4 INTEGRAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE E DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

A integração da sustentabilidade ambiental e da SCIE na construção de edifícios é crítica para a indústria da construção. Como vimos, a construção sustentável visa minimizar o impacto ambiental e o consumo de energia, ao mesmo tempo que emprega materiais sustentáveis. Porém, é também imperativo assegurar um adequado nível de SCIE para garantir a vida humana, preservar o património e evitar que os benefícios da sustentabilidade sejam destruídos no caso de um incêndio (Roberts *et al*., 2016; McNamee, 2023). O desafio reside em harmonizar esses objetivos sem comprometer nenhum deles.

Por um lado, é importante reconhecer que decisões de projeto em busca do aumento da SCIE podem levar a um maior impacto ambiental e, portanto, ser prejudiciais à sustentabilidade. Isso pode ser evidente em decisões simplistas de aumentar a compartimentação por meio de subdivisão, reduzindo assim o potencial para projeto em plano aberto, que tem muitos benefícios de qualidade. Da mesma forma, proteger excessivamente um edifício aumentando a instalação de medidas e sistemas de proteção contra incêndio pode contribuir para a oferta de soluções sobredimensionadas, não racionais e em que o binómio custo/benefício surge fortemente desequilibrado. As implicações que essas decisões podem ter para os bombeiros e o resgate ou evacuação de pessoas com mobilidade limitada também devem ser consideradas.

Por outro lado, a experiência empírica tem evidenciado que algumas opções de construção sustentável podem aumentar os riscos de incêndio devido ao uso de materiais e tecnologias não convencionais e que não foram testados ao longo do tempo (Roberts *et al*., 2016).

Adicionalmente, alguns materiais utilizados na construção sustentável podem ter como consequências o aumento da carga combustível e, portante, do calor de combustão, relativamente aos materiais tradicionalmente usados. Num espaço interior em que sejam utilizados materiais sintéticos a inflamação generalizada [1] pode ocorrer num intervalo de 2 a 4 minutos, quando no caso de materiais não sintéticos esse intervalo está compreendido entre 14 a 20 minutos [2]. Este novo perigo coloca a

[1] A inflamação generalizada ocorre quando a temperatura dentro de uma sala ou estrutura atinge um ponto crítico, fazendo com que todo o combustível disponível (como móveis, tapetes e outros materiais) se incendeie quase instantaneamente.
[2] Os valores dos intervalos anteriormente referidos são meramente indicativos, servindo somente para ilustrar a diferença que existe entre materiais.

seguinte questão: *quais as implicações para a segurança destes novos materiais e como os podemos utilizar sem comprometer SCIE?* (Gollner *et al*., 2012).

Algumas recomendações para integrar esses SCIE e construção sustentável são (Roberts *et al*., 2016; McNamee, 2020; McNamee, 2023):

- Utilizar materiais menos combustíveis;
- Incorporar de sistemas de SCIE na automação de edifícios;
- Desenvolver modelos de avaliação de desempenho que considerem uma ampla gama de características.

A *Fire Protection Research Foundation* publicou o segundo volume de um relatório com o título *"Fire Safety Challenges of Green Buildings"* (Meacham e McNamee, 2020), que apresenta uma análise do risco potencial de incêndio de vários elementos considerados sustentáveis. Os materiais utilizados na construção sustentável podem ter como consequência um aumento dos riscos/perigos. É necessário fazer uma análise como estes materiais poderão influenciar a propagação do incêndio pelo exterior, a propagação pelo interior, prejudicar na evacuação, condicionar os meios de intervenção, condicionar os meios de socorro e afetar a própria estrutura.

No Quadro 1 são apresentados alguns dos materiais analisados no relatório, verificando-se que são vários os materiais de construção sustentável que apresentam risco elevado. As estratégias de mitigação de risco que encontramos neste relatório são muitas vezes o uso de materiais aprovados (*i.e.*, marcação CE), uso de *sprinklers* e assegurar um mecanismo de ventilação apropriado.

Quando os materiais utilizados na construção sustentável aumentam os riscos/perigos, pode ser uma melhor opção investir mais recursos na instalação de dispositivos de SCIE como, por exemplo, os *sprinklers*. Os *sprinklers* controlam o incêndio, ajudam a reduzir os custos de reparação e eliminam a necessidade de reconstruir estruturas na sua integridade. O seu uso pode potenciar a eliminação, não apenas a quantidade de material desperdiçado que é depositado em aterros, mas também elimina a necessidade de novos materiais para a reconstrução do edificado.

Quadro 1 – Tabela de risco de incêndio adaptada (Meacham e McNamee, 2020)

Construção Sustentável	Perigos/Riscos:	Mitigação do Risco	Risco
Madeira lamelada colada cruzada/Cross Laminated Timber (CLT)	Pode delaminar Aumenta a carga de incêndio do edifício Problemas de estabilidade	Criar barreiras para evitar propagação Instalar sistema de *sprinklers* Utilizar materiais aprovados	Elevado
Painéis Estruturais Isolados	Se não resistir, o isolamento pode contribuir para propagação do incêndio Aumento da carga de incêndio	Assegurar a selagem adequada dos painéis Durante a instalação, ter especial cuidado com os possíveis negativos junto a fontes de ignição Utilizar materiais aprovados	Elevado
Painéis Fotovoltaicos em edifícios	Pode apresentar risco de ignição Aumenta a carga de incêndio do edifício Impacto nas operações dos meios de socorro Risco de quebra de vidros	Criar barreiras entre os PV e outros materiais combustíveis Prever um sistema de interrupção de energia sinalizado Utilizar materiais aprovados	Elevado

Construção Sustentável	Perigos/Riscos:	Mitigação do Risco	Risco
Fachadas Verdes	Pode contribuir para o aumento da carga de incêndio, propagação de incêndio Impacto nas operações dos meios de socorro Impacto na desenfumagem e calor	Manter adequadamente a vegetação Criar acessos para os meios de socorro Prever mecanismos de desenfumagem Utilizar materiais aprovados	Moderado
Ventilação Natural	Pode afetar a capacidade de controlar o fumo Pode influenciar o movimento do fumo que depende das condições ambientais	Prever sistemas dedicados de desenfumagem Instalar sistema de *sprinklers*	Moderado
Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS)	Se não resistir, o isolamento pode contribuir para a propagação do incêndio Aumenta a carga de incêndio do edifício	Criar barreiras para evitar propagação. Utilização de materiais aprovados	Elevado
Construção Modular	Disseminação do incêndio pelo interior das paredes Produtos tóxicos	Criar barreiras para evitar propagação Durante a instalação especial cuidado com os possíveis negativos junto a fontes de ignição Utilização de materiais aprovados	Elevado
Materiais e Acabamentos Interiores	Pode contribuir para a propagação do incêndio Produção de fumo Aumento da carga de incêndio	Instalar sistema de *sprinklers* Utilizar retardantes Utilizar materiais aprovados	Elevado

5 CONCLUSÃO

Equilibrar os imperativos de segurança, responsabilidade ambiental e inovação tecnológica é uma exigência da sociedade atual. A procura desse equilíbrio encerra um desafio multifacetado e para a indústria da construção moderna.

As regulamentações prescritivas, embora tenha contribuído para melhorias significativas na SCIE, não permitem dar uma resposta eficaz às exigências da construção sustentável. Portanto, a transição para regulamentações com análise de desempenho emerge como um processo de alteração que deve ser rapidamente, mas cuidadosamente, implementado de modo a permitir a conceção e construção de soluções inovadoras e sustentáveis.

No entanto, essa mudança não é isenta de desafios. O conflito potencial entre SCIE e construção sustentável requer uma abordagem equilibrada e criteriosa. As decisões de projeto devem ser cuidadosamente avaliadas, considerando não apenas os benefícios imediatos, mas também os potenciais riscos e impactos ambientais a longo prazo. Além disso, a complexidade crescente dos materiais e tecnologias sustentáveis cria novos desafios na SCIE. A integração de elementos como coberturas verdes e painéis fotovoltaicos requer uma análise cuidadosa dos perigos específicos associados a essas inovações.

Há várias alternativas sustentáveis que, sem uma análise profunda de segurança contra incêndios, podem contribuir para o aumento do risco de incêndio. É importante avaliar os perigos de incêndio destes materiais de construção sustentável face à construção tradicional.

Este potencial conflito entre SCIE e sustentabilidade evidencia a complexidade de assegurar a SCIE dentro no contexto de um projeto sustentável. Os projetistas e as partes interessadas devem avaliar cuidadosamente e equilibrar os riscos, benefícios e implicações ambientais das várias estratégias de SCIE. O objetivo final é encontrar soluções que garantam a SCIE, sem comprometer a sustentabilidade ambiental a longo prazo.

A adoção de regulamentos com análise de desempenho permite uma abordagem mais flexível e adaptável à SCIE. Em vez de assentar exclusivamente em medidas prescritivas rígidas, que nem sempre são adequadas, as regulamentações com análise de desempenho permitem a exploração de métodos e materiais alternativos que cumpram os objetivos de segurança desejados. Isso pode levar ao desenvolvimento de estratégias inovadoras de SCIE que são eficientes e sustentáveis.

Portanto, a integração bem-sucedida da sustentabilidade e SCIE requer uma abordagem holística e colaborativa. É essencial que a indústria da construção trabalhe em conjunto para desenvolver soluções que atendam aos objetivos sustentabilidade ambiental a longo prazo sem comprometer a SCIE.

6 REFERÊNCIAS

Asdrubali, F.; Grazieschi, G.; Roncone, M.; Thiebat, F.; Carbonaro, C. (2023). Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry. Energies, 16, no. 4: 1846. https://doi.org/10.3390/en16041846

Ching, F. D. K. (2020). Building construction illustrated.

Elnaklah, R., Walker, I., & Natarajan, S. (2021). Moving to a green building: Indoor environment quality, thermal comfort and health. Building and Environment.

Gollner, M., Kimball, A., Vecchiarelli, T. (2012). Fire Safety Design and Sustainable Buildings: Challenges and Opportunities. Report of a National Symposium.

Hafez, F. S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y.H., Alrifaey, M., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Horan, B., Mekhilef, S., (2023). Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research. Energy Strategy Reviews, Volume 45. 101013. ISSN 2211-467X, https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101013.

Hood, D. W. T. (2020). The Fire Problem: Social Responsibility for Fire in the British Empire, 1817-1919.

Liu, T., Chen, L., Yang, M., Sandanayake, M., Miao, P., Shi, Y., Yap, P.-S. (2022). Sustainability Considerations of Green Buildings: A Detailed Overview on Current Advancements and Future Considerations. Sustainability, 14, 14393. https://doi.org/10.3390/su142114393

Maiworm, B., Hammann, C., & Schleich, M. (2023). Prescriptive Building Regulations, Safety Objectives, and Residual Risk in Germany. Fire Technology.

Markel, Dr. Howard. (2021). How the Triangle Shirtwaist Factory Fire Transformed Labor Laws and Protected Workers' Health. PBS, Public Broadcasting Service, 1 Apr. 2021.

McNamee, M., Meacham, B. J. (2023). "Conceptual Basis for a Sustainable and Fire Resilient Built Environment," Fire Technology, 2023/09/20 2023, doi: 10.1007/s10694-023-01490-9.

Meacham, B. & McNamee, M. (2020). Fire safety challenges of 'green'buildings and attributes. Research Foundation Report.

Robbins, A.P. (2012). Building Sustainability and Fire-Safety Design Interactions. Branz Study Report, 269. ISSN: 1179-6197.

Roberts, B., Webber, M., Ezekoye O. (2016). Why and How the Sustainable Building Community Should Embrace Fire Safety. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, vol. 3, 12/01 2016, doi: 10.1007/s40518-016-0060-2.

Society of Civil Engineers, A. (2020). Performance-Based Structural Fire Design: Exemplar Designs of Four Regionally Diverse Buildings using ASCE 7-16, Appendix E. ascelibrary.org

Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., & Xue, C. (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. Resources. sciencedirect.com

Umoh, A. A., Adefemi, A., Ibewe, K. I., Etukudoh, E. A., Ilojianya, V. I., & Nwokediegwu, Z. Q. S. (2024). Green architecture and energy efficiency: a review of innovative design and construction techniques. Engineering Science & Technology Journal, 5(1), 185-200.

Upasani, N., Bansal, M., Satapathy, A., Rawat, S., & Muthukumar, G. (2020). Design and Performance Criteria for Fire-Resistant Design of Structures – An Overview. Advances in Structural Technologies: Select Proceedings of CoAST 2019, 277-294.

Van Coile, R., Lucherini, A., Chaudhary, R. K., Ni, S., Unobe, D., & Gernay, T. (2023). Economic impact of fire: cost and impact of fire protection in buildings.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A UTILIZAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS COMO ESTRATÉGIA DE ARREFECIMENTO EM EDIFÍCIOS: REVISÃO DA LITERATURA

A.V. Francisco[a]; Daniel Aelenei[a,b,c]

[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal, av.francisco@campus.fct.unl.pt

[b]Centre of Technology and Systems/UNINOVA, Faculty of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal, aelenei@fct.unl.pt

[c]Laboratório Associado de Sistemas Inteligentes, LASI, 4800-058 Guimarães, Portugal

RESUMO

O consumo excessivo de energia em edifícios tem impactos ambientais significativos, contribuindo para a emissão de gases com efeito de estufa e o aquecimento global. Neste contexto, a adoção de estratégias eficientes de gestão de energia e de tecnologias sustentáveis é essencial. A utilização de tintas seletivas nas envolventes dos edifícios tem se mostrado uma tecnologia promissora no que respeita a redução da utilização de energia para climatização e melhorar o conforto interior dos edifícios devido à sua capacidade de limitar a absorção de energia solar e emitir radiação de onda longa na gama de comprimentos de onda dos infravermelhos, entre 8 – 13 □□, denominada "janela atmosférica". Este artigo apresenta uma revisão dos recentes avanços na aplicação de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento passivo em edifícios, com particular atenção aos casos de estudo que demonstram a eficácia das tintas seletivas na redução significativa da temperatura superficial da envolvente dos edifícios quando expostos à radiação solar direta.

PALAVRAS-CHAVE

arrefecimento radiativo; tintas seletivas; edifícios; revisão da literatura

1. INTRODUÇÃO

O consumo excessivo de energia em edifícios tem impactos ambientais significativos, contribuindo para as emissões de gases com efeito de estufa e para o aquecimento global. A adoção de tecnologias sustentáveis é essencial para promover uma utilização mais eficiente da energia e dos recursos naturais. Entre as estratégias inovadoras de arrefecimento, o arrefecimento passivo destaca-se como uma abordagem que não depende de sistemas ativos para arrefecer um edifício.

Uma das estratégias de arrefecimento passivo baseia-se no uso de materiais e tintas com propriedades radiativas seletivas que refletem uma grande porção da radiação solar e emitem radiação infravermelha dentro de um intervalo de comprimento de onda específico, permitindo que as superfícies permaneçam mais frescas do que o habitual. De facto, acredita-se que o arrefecimento radiativo é uma das técnicas mais promissoras para alcançar o arrefecimento sem aumentar as emissões de gases com efeito de estufa (Yu *et al.*, 2022).

Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão dos avanços recentes na aplicação de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento passivo em edifícios. Serão abordados os princípios fundamentais do arrefecimento radiativo, os materiais utilizados e os casos de estudo que evidenciam a eficácia dessas tintas na redução da temperatura superficial e no aumento da eficiência energética dos edifícios.

2. INTRODUÇÃO AOS PRINCÍPIOS DO ARREFECIMENTO RADIATIVO

O planeta terra recebe radiação solar, sendo a maior parte dessa energia absorvida e transformada em calor. Sem a perda desse calor, a temperatura do planeta aumentava rapidamente. A Terra dissipa esse calor através da emissão de ondas eletromagnéticas para o espaço, um fenômeno designado de arrefecimento radiativo. Esse mecanismo é crucial para manter a temperatura habitável do planeta.

Qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emite radiação eletromagnética, cuja intensidade e comprimento de onda estão diretamente relacionados à sua temperatura. A atmosfera terrestre, composta por várias camadas e gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, etc.) e vapor de água, absorve radiação eletromagnética em comprimentos de onda específicos. A combinação do espectro de absorção dos gases resulta na criação de janelas transparentes, denominadas janelas atmosféricas, através das quais as ondas eletromagnéticas podem passar livremente, atuando a atmosfera como um meio semitransparente que pode absorver, emitir e dispersar radiação (Tso, Chan and Chao, 2017).

Existem janelas de transparência na atmosfera, incluindo uma na faixa do infravermelho de 8-13 µm, onde a atmosfera é altamente transparente, particularmente quando a humidade é baixa, conforme ilustra a Figura 1. Esta faixa coincide com o pico de radiação térmica de um corpo negro à temperatura ambiente (cerca de 300 K, 27 °C), permitindo que a radiação emitida por um objeto à temperatura ambiente possa atravessar livremente a janela atmosférica para o espaço.

Para que o arrefecimento seja eficaz e as superfícies permaneçam a temperaturas baixas, deve haver uma forte reflexão da energia incidente (radiação solar) e uma forte emissão de energia eletromagnética nos comprimentos de onda entre 8 μm e 13 μm.

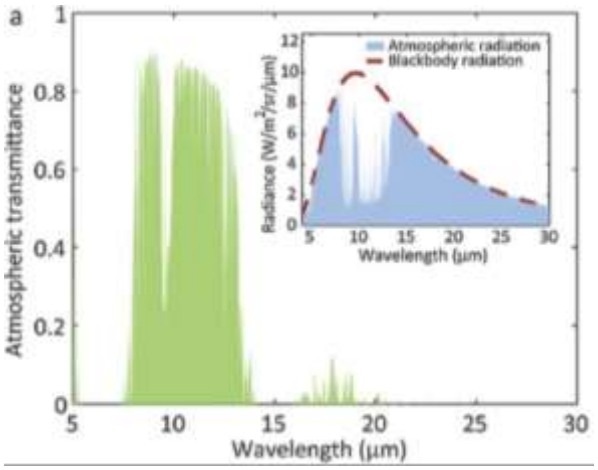


Figura 1 - Perfil de transmitância e absorção da atmosfera nos comprimentos de onda 5 μm - 30 μm (adaptado de (Hossain and Gu, 2016)

Portanto, se as propriedades térmicas radiativas das superfícies forem apropriadas (refletindo a luz solar (λ ∼ 0,3–2,5 μm) para minimizar o ganho de calor solar e irradiar calor através da janela de transparência atmosférica (λ ∼ 8–13 μm) e sob condições atmosféricas adequadas, é possível dissipar o calor de uma estrutura terrestre para o espaço extraterrestre por radiação. Dessa forma é possível obter uma temperatura do material inferior à temperatura ambiente, mesmo sob radiação solar direta e sem utilização de qualquer tipo de energia externa.

3. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO ARREFECIMENTO RADIATIVO

Os revestimentos das envolventes exteriores dos edifícios estão sujeitos à irradiação solar e à radiação térmica atmosférica. O potencial de arrefecimento radiativo dos materiais q_{cool} pode ser estimado com recurso ao balanço energético de um radiador conforme ilustra a Figura 2.

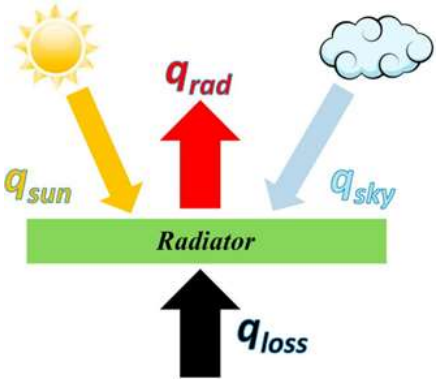


Figura 2- Balanço energético de um radiador (retirado de (Zhao et al., 2019))

O balanço energético do radiador será dado pela diferença entre a radiação emitida e absorvida:

$$q_{cool} = q_{rad}(T_r) - q_{sky}(T_{amb}) - q_{sun} - q_{loss}$$

em que q_{sun} é a energia solar absorvida, q_{rad} é a energia irradiada, q_{sky} é a energia radiativa atmosférica absorvida e q_{loss} é a energia intrínseca perdida por arrefecimento.

3.1. ENERGIA IRRADIADA

Considerando um radiador de área A_r à temperatura T_r, cuja emissividade espectral é $\varepsilon(\lambda, \theta)$:

$$q_{rad}(T_r) = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} \varepsilon(\lambda, \theta)\, I_b(\lambda, T_r)\, sin(2\theta) d\theta d\,\lambda$$

Onde $I_b(\lambda, T_r)$ é a intensidade da radiação espectral de um corpo negro à temperatura T_r, calculada pela Lei de Planck:

$$I_b(\lambda, T_r) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T_r)} - 1}$$

em que *h* é a constante de Planck (6,626 x 10^{-34} J.s), k_B é a constante de Boltzman (1,38 x 10^{-23} J/K), *c* é a velocidade de luz (3 x 10^8 m/s) e λ é o comprimento de onda.

3.2. ENERGIA RADIATIVA ATMOSFÉRICA ABSORVIDA

A energia atmosférica absorvida pelo radiador radiativo da radiação atmosférica incidente é dada pela:

$$q_{sky} = A_r \pi \int_0^{+\infty} \int_0^{\pi/2} a_r(\lambda, \theta)\, I_s(\lambda, \theta, T)\, sin(2\theta) d\theta d\lambda$$

Onde $I_s(\lambda, \theta, T)$ é o poder espectral da atmosfera e $a_r(\lambda, \theta)$ é a absorção espectral do radiador, que pode ser substituída pela emissividade espectral do radiador $\varepsilon_r(\lambda, \theta)$ com base na lei de Kirchhoff.

3.3. ENERGIA SOLAR ABSORVIDA

A energia solar absorvida é dada pela:

$$q_{sun} = A_r G \frac{\int_0^{+\infty} a_r(\lambda, \theta_{sun})\, I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{+\infty} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}$$

em que *G* é a irradiância solar e A_r é a área do radiador. Assume-se que a estrutura está virada para o Sol com o qual forma um ângulo fixo θ_{sun}. $I_{AM1.5}$ é a distribuição de espectral padrão definida como a distribuição espectral da radiação solar total (direta + difusa) incidente ao nível do mar num dia de céu limpo, numa superfície perpendicular aos raios solares e inclinada relativamente à horizontal de 37º, e a que corresponde uma irradiância total de 1000 Wm^{-2}.

3.4. ENERGIA INTRÍNSECA PERDIDA POR ARREFECIMENTO

A perda de energia por convecção é dada pela:

$$q_{loss} = hA_r(T_a - T_r)$$

Se a temperatura do radiador T_r for maior que a temperatura ambiente T_a, o valor da condutância superficial exterior por convecção *h*, é frequentemente determinado por fórmulas empíricas, como (Zhao *et al.*, 2019):

$$h = 2{,}8 + 3{,}0u_a$$

onde u_a é a velocidade do vento em m/s.

4. MATERIAIS DE ARREFECIMENTO RADIATIVO

Embora a aplicação do arrefecimento radiativo para arrefecimento noturno tenha sido demonstrada há décadas, o arrefecimento radiativo sob luz solar direta foi alcançado recentemente com os avanços em nanomateriais (Hossain and Gu, 2016). Raman *et al.* (2014) foram os primeiros a demonstrar o arrefecimento radiativo diurno, mantendo um objeto 5℃ abaixo da temperatura ambiente sob luz solar direta, reavivando o interesse científico nos materiais de arrefecimento radiativo. Esta técnica tem sido investigada para várias aplicações, especialmente em edifícios (Mandal *et al.*, 2020), devido ao seu significativo consumo global de energia e emissões de dióxido de carbono (Xia *et al.*, 2023). Para aplicações diretas em edifícios existentes, as tintas "frias" são consideradas uma tecnologia de arrefecimento eficaz devido à sua facilidade de aplicação na renovação das envolventes dos edifícios (Jiang *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, as tintas passaram a desempenhar um papel importante na eficiência energética dos edifícios. De uma forma simplificada, uma tinta é composta principalmente por pigmentos, aglutinantes e solventes (ou dispersantes). Depois do revestimento ser aplicado na superfície do substrato, à medida que o solvente (ou dispersante) evapora, o adesivo solidifica gradualmente e une o pigmento (Jiang, Fan and Wang, 2023). Uma tinta branca típica contém pigmentos de TiO_2 (dióxido de titânio) dispersos em acrílico ou silicone, com cargas adicionais de dióxido de sílica (SiO_2) ou carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (YU *et al.*, 2016). No entanto, a absorção intrínseca da luz ultravioleta (λ ~ 0,3–0,4 μm), violeta (λ ~ 0,4–0,41 μm) e solar de infravermelho próximo (λ ~ 0,7–2,5 μm) pelos aglutinantes de polímeros limita a reflexão, inibindo o processo de arrefecimento radiativo diurno das tintas pigmentadas sob luz solar direta (Chen e Lu, 2020).

Neste sentido, e com o surgimento dos metamateriais, diversas equipas de investigação focaram-se na síntese de pigmentos capazes de refletir a maior parte da radiação incidente e emitir energia na janela atmosférica entre 8 e 13 μm.

(Xu *et al.*, 2018) propuseram uma tinta feita com cristais de $Mg_{11}(HPO_3)_8(OH)_6$ que atingiu uma refletividade de 88% na faixa de 0,2 a 2,5 μm e uma emissividade de 87% na faixa de 8 a 14 μm. Os resultados mostraram que ao aplicar a tinta produzida, esta mantém a temperatura no interior da célula de teste de 6 a 8 ℃ mais baixa do que a célula de teste coberta com papel alumínio e 2 a 4 ℃ mais baixa quando comparada com as células de teste das tintas de TiO_2 e $CaCO_3$.

(Li et al., 2020) fabricaram uma tinta acrílica, na qual adicionaram $CaCO_3$ (carbonato de cálcio). A tinta exibiu 95% de reflexão solar e 94% de emissividade na janela atmosférica 800 - 1300 nm, conforme ilustrado na Figura 3 que apresenta o perfil de absorção/emissividade da tinta produzida em comparação com uma tinta comercial.

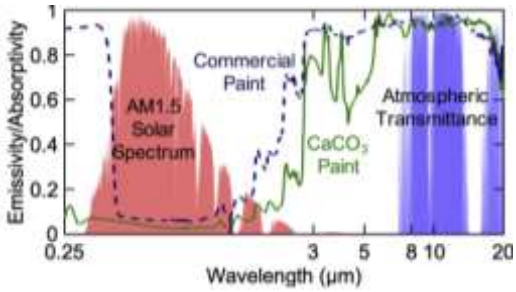


Figura 3 - Perfil de absorção/emissividade da tinta à base de $CaCO_3$ em comparação com uma tinta comercial (adaptado de (Li et al., 2020))

Os autores apresentam uma imagem térmica (Figura 4) de uma superfície pintada com a tinta desenvolvida pelos mesmos e com uma tinta branca comercial, colocada sob luz solar direta, mostrando a diferença de temperaturas superficiais entre as zonas pintadas.

Figura 4 - Superfície pintadas com as diferentes tintas, em forma de "P". A imagem do centro mostra a captura com uma câmara normal e a imagem da direita mostra uma captação com uma câmara térmica (adaptado de (Li et al., 2020))

Em testes de campo, a tinta permaneceu 10ºC abaixo da temperatura ambiente durante a noite e 1,7ºC abaixo da temperatura ambiente sob radiação solar direta, conforme ilustrado na Figura 5. Em termos de capacidade de arrefecimento, durante a noite o poder de arrefecimento médio foi de 56 W/m^2 e sob radiação solar foi de 37 W/m^2.

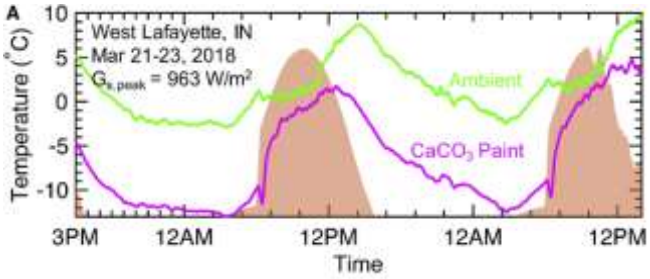


Figura 5 - Temperatura da amostra durante os testes de campo (adaptado de (Li et al., 2020))

Li et al. (2021) produziram uma tinta branca à base de $BaSO_4$ (sulfato de bário) que demonstrou uma reflexão solar de 98% e uma emissividade na janela atmosférica de 95%. Após testes de campo, a tinta permaneceu a uma temperatura inferior à temperatura ambiente, inclusive sobre radiação solar, onde atingiu uma temperatura inferior à ambiente de 6,8 °C, conforme ilustrado na Figura 6, e potenciou uma capacidade média de arrefecimento superior a 80 W/m^2.

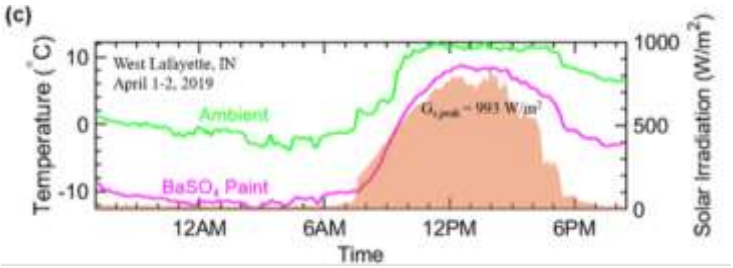


Figura 6 - Temperatura da amostra durante os testes de campo (adaptado de (Li et al., 2021))

Chae *et al.* (2021) prepararam uma tinta de arrefecimento radiativo juntando um polímero combinado com uma mistura de nanopartículas de Al_2O_3, SiO_2 e Si_3N_4 (óxido de alumínio, dióxido de silício e nitreto e silício, respetivamente), que quando aplicada num substrato refletor de prata, exibe uma absorção solar de 4% e uma emissividade 88% dentro da janela de transparência atmosférica. Em testes de campo, a amostra permaneceu a uma temperatura inferior à temperatura ambiente.

Lim *et al.* (2022) prepararam uma tinta de arrefecimento radiativo com emissividade na janela atmosférica de 92% e absorção solar de 11% utilizando $CaCO_3$ combinado com o polímero hexa acrilato de dipentaeritritol (DPHA). Quando aplicada sobre uma superfície de vidro, a amostra apresentou uma capacidade de arrefecimento de 93 W/m^2 e atingiu uma temperatura média inferior à ambiente de 6,52℃ e 3,38℃ durante o dia e durante a noite, respetivamente. Através de cálculos, os autores estimaram uma redução máxima da temperatura superficial em 10℃ durante o dia.

Em paralelo ao desenvolvimento de tintas seletivas, verifica-se também a produção de tintas refletantes. O desenvolvimento de tintas refletantes aposta na forte reflexão de energia incidente, diferenciando-se das tintas seletivas por não considerarem no estudo a componente relacionada com a emissividade na janela atmosférica. Apesar da emissividade ser intrínseca dos materiais, se esta não for focada para a janela atmosférica, a superfície dos materiais pode não atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente, no entanto, permanece abaixo da temperatura superficial de grande parte dos materiais de construção.

5. APLICAÇÃO DE TINTAS SELETIVAS EM EDIFÍCIOS

Apesar dos avanços no desenvolvimento de tintas seletivas, sua aplicação em edifícios ainda é limitada.

Lin *et al.* (2022) propuseram a aplicação de duas tintas sobrepostas, uma à base de dióxido de titânio (camada inferior) e outra à base de óxido de alumínio (camada superior). A conjugação apresentou uma reflexão de 92% e emissividade de 95% na faixa do infravermelho médio (2500nm - 25μm). Em testes de campo, com a aplicação da solução numa amostra, a temperatura superficial da amostra permaneceu a temperaturas inferiores à ambiente de 1,5ºC e 4,5ºC, durante o dia de durante a noite, respetivamente. De forma a aprofundar o estudo, os autores aplicaram em duas casas-modelo uma tinta branca comercial (referência) e a solução proposta. Em comparação com a tinta branca comercial, a solução proposta ajudou a reduzir a temperatura superficial interior da parede e do ar interior da casa modelo em 10,2 °C e 5,6 °C, respetivamente. Além disso, os autores realizaram um estudo em grande escala na cobertura de um escritório local (Hong Kong) com uma área de aplicação de 50m^2. Ao meio-dia, comparando com a zona de cobertura tradicional, a solução reduziu a temperatura superficial da cobertura em 30℃, juntamente com uma redução de temperatura máxima de 6,4℃ do ar no sótão.

Zhang *et al.* (2023) aplicaram um revestimento autolimpante em edifícios protótipos de betão armado, num edifício real de alvenaria de tijolo, em casas de contentores pré-fabricadas e em casas modulares. Os testes de campo foram efetuados em diversas províncias da China. O revestimento aplicado apresenta uma reflexão de 98%, uma emissividade global de 95% e uma emissividade na janela atmosférica de 99%. Quando aplicado em edifícios protótipo de betão armado, a cobertura e a parede oeste apresentaram temperaturas inferiores à ambiente em 11,1 °C e 4,8 ℃, respetivamente. A aplicação do revestimento numa janela orientada a oeste, no edifício real de alvenaria de tijolo, reduziu a temperatura interior de uma sala em 18,2 ℃ em comparação com uma sala em condições idênticas (parede exterior nas mesmas condições construtivas e ambientais).

Quando aplicado em casas de contentores pré-fabricadas, a redução da temperatura da cobertura foi de até 10,6 ℃ abaixo da temperatura ambiente. Quando comparadas as temperaturas máximas superficiais entre o contentor com o revestimento e o contentor de referência, verificou-se uma diferença de 33 ℃ ao nível da cobertura. No interior do contentor revestido pela solução seletiva verificaram-se temperaturas abaixo à ambiente exterior. Quando aplicado em casas modulares pré-fabricadas, a temperatura da cobertura registou valores inferiores à ambiente de pelo menos 2,6 ℃. O contentor pintado com o revestimento seletivo demonstrou temperaturas superficiais e internas mais baixas quando comparado com o contentor pintado com uma tinta refletante. No caso do edifício de alvenaria de tijolo foram obtidos resultados similares. Os autores concluíram ainda que a aplicação de revestimentos seletivos penaliza o desempenho dos edifícios na estação de aquecimento.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma revisão dos recentes avanços na aplicação de tintas seletivas como estratégia de arrefecimento passivo em edifícios, analisando as suas propriedades térmicas e radiativas, bem como o desempenho em testes de campo. As tintas desenvolvidas demonstraram capacidades significativas de refletir a radiação solar e emitir calor através da janela de transparência atmosférica, resultando em reduções substanciais na temperatura das superfícies pintadas.

Os estudos realizados por Xu et al. (2018) e Li et al. (2020, 2021) destacaram a eficácia dos pigmentos de $Mg_{11}(HPO_3)_8(OH)_6$, $CaCO_3$ e $BaSO_4$, que alcançaram altos índices de refletividade e emissividade, permitindo que as tintas mantivessem temperaturas consideravelmente mais baixas em comparação com tintas convencionais e outros materiais de referência. Em particular, a tinta à base de $BaSO_4$, com uma reflexão solar de 98% e emissividade de 95%, demonstrou a capacidade de reduzir a temperatura superficial até 6,8 ℃ abaixo da temperatura ambiente, mesmo sob radiação solar direta, e proporcionar um poder de arrefecimento médio superior a 80 W/m².

Os resultados de Chae et al. (2021) e Lim et al. (2022) reforçaram esses resulltados, evidenciando que a combinação de polímeros com nanopartículas como Al_2O_3, SiO_2, e Si_3N_4 pode otimizar ainda mais o desempenho das tintas. As amostras testadas mantiveram-se consistentemente abaixo da temperatura ambiente, demonstrando emissividades elevadas na janela atmosférica e absorções solares reduzidas, o que sublinha a versatilidade e eficácia dessas novas formulações.

Além disso, o desenvolvimento de tintas refletantes focadas na forte reflexão da energia incidente, embora não considerem a emissividade na janela atmosférica, mostra-se uma estratégia promissora para aplicações onde a redução da temperatura superficial é crítica. Mesmo sem atingir temperaturas

abaixo à ambiente, essas tintas refletem grande parte da radiação solar, diminuindo significativamente o ganho de calor em edifícios e outras estruturas.

Os dados apresentados sugerem que a aplicação dessas tintas pode contribuir substancialmente para a eficiência energética em ambientes urbanos, reduzindo a dependência de sistemas de ar condicionado e diminuindo o efeito de ilhas de calor. A implementação em larga escala dessas tecnologias pode levar a um impacto ambiental positivo, através da redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de energia para arrefecimento.

Em futuros estudos, recomenda-se a exploração de novos materiais e combinações de nanopartículas que possam melhorar ainda mais a refletividade e emissividade das tintas. Além disso, a integração dessas tintas com outras tecnologias de construção sustentável pode maximizar os benefícios, contribuindo para a criação de ambientes mais confortáveis e ecologicamente responsáveis.

Em conclusão, as tintas de arrefecimento radiativo representam uma abordagem inovadora e eficaz para enfrentar os desafios do aquecimento global e da eficiência energética nos edifícios em climas quente e temperados.

7. REFERÊNCIAS

Chae, D. et al. (2021) 'Spectrally Selective Nanoparticle Mixture Coating for Passive Daytime Radiative Cooling', ACS Applied Materials & Interfaces, 13(18), pp. 21119–21126. doi: 10.1021/acsami.0c20311.

Chen, J. and Lu, L. (2020) 'Development of radiative cooling and its integration with buildings: A comprehensive review', Solar Energy, 212, pp. 125–151. doi: 10.1016/j.solener.2020.10.013.

Hossain, M. M. and Gu, M. (2016) 'Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials', Advanced Science, 3(7). doi: 10.1002/advs.201500360.

Jiang, K. et al. (2023) 'Experimental and numerical study on the potential of a new radiative cooling paint boosted by SiO2 microparticles for energy saving', Energy, 283, p. 128473. doi: 10.1016/j.energy.2023.128473.

Jiang, T., Fan, W. and Wang, F. (2023) 'Long-lasting self-cleaning daytime radiative cooling paint for building', Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 666, p. 131296. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.131296.

Li, X. et al. (2020) 'Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit', Cell Reports Physical Science, 1(10), p. 100221. doi: 10.1016/j.xcrp.2020.100221.

Li, X. et al. (2021) 'Ultrawhite BaSO 4 Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling', ACS Applied Materials & Interfaces, 13(18), pp. 21733–21739. doi: 10.1021/acsami.1c02368.

Lim, H. et al. (2022) 'CaCO3 micro particle-based radiative cooling device without metal reflector for entire day', Materials Today Communications, 32, p. 103990. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103990.

Lim, Y.-F. (2020) 'Novel materials and concepts for regulating infra-red radiation: radiative cooling and cool paint', in Energy Saving Coating Materials. Elsevier, pp. 113–131. doi: 10.1016/B978-0-12-822103-7.00005-4.

Lin, K. et al. (2022) 'Nanoparticle-polymer hybrid dual-layer coating with broadband solar reflection for high-performance daytime passive radiative cooling', Energy and Buildings, 276, p. 112507. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112507.

Mandal, J. et al. (2020) 'Paints as a Scalable and Effective Radiative Cooling Technology for Buildings', Joule, 4(7), pp. 1350–1356. doi: 10.1016/j.joule.2020.04.010.

Raman, A. P. et al. (2014) 'Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight', Nature, 515(7528), pp. 540–544. doi: 10.1038/nature13883.

Tso, C. Y., Chan, K. C. and Chao, C. Y. H. (2017) 'A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate', Renewable Energy, 106, pp. 52–61. doi: 10.1016/j.renene.2017.01.018.

Xia, S. et al. (2023) 'Water-based kaolin/polyacrylate cooling paint for exterior walls', Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 677, p. 132401. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132401.

Xu, Z. et al. (2018) 'A new crystal Mg11(HPO3)8(OH)6 for daytime radiative cooling', Solar Energy Materials and Solar Cells, 185, pp. 536–541. doi: 10.1016/j.solmat.2018.06.012.

YU, N. et al. (2016) 'WO2016205717 - SYSTEMS AND METHODS FOR RADIATIVE COOLING AND HEATING'. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2016205717.

Yu, X. et al. (2022) 'Enhanced radiative cooling paint with broken glass bubbles', Renewable Energy, 194, pp. 129–136. doi: 10.1016/j.renene.2022.05.094.

Zhang, Y. et al. (2023) 'Sub-ambient cooling effect and net energy efficiency of a super-amphiphobic self-cleaning passive sub-ambient daytime radiative cooling coating applied to various buildings', Energy and Buildings, 284, p. 112702. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112702.

Zhao, B. et al. (2019) 'Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects', Applied Energy, 236, pp. 489–513. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.018.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A OTIMIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E TERMOFÍSICAS DA FACHADA DE UM EDIFICIO DE ESCRITÓRIOS

João Monteiro[a,b]; Daniel Aelenei[a,c,d]; António Santos[e]

[a]Department of Civil Engineering, Nova School of Science and Technology, 2829-516 Caparica, Portugal, jcs.monteiro@alumni.fct.unl.pt

[b]Broadway Malyan Arquitectos e Designers, 1200-160 Lisboa, Portugal

[c]Centre of Technology and Systems/UNINOVA, Faculty of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal, aelenei@fct.unl.pt

[d]Laboratório Associado de Sistemas Inteligentes, LASI, 4800-058 Guimarães, Portugal

[e]Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1700-066 Lisboa, Portugal, asantos@lnec.pt

RESUMO

A fachada de um edifício de escritórios desempenha um papel crucial no seu desempenho energético e no conforto dos seus ocupantes. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos de um estudo numérico realizado para otimizar a fachada do projeto de um edifício de escritórios a ser construido na cidade do Porto.

Através de simulações numéricas realizadas com recurso às ferramentas OpenStudio, EnergyPlus e Radiance, foram analisadas várias soluções de fachada para identificar as características geométricas e termofísicas capazes de proporcionar as melhores condições de conforto interior (térmico e visual) e eficiência energética a serem implementadas em fase de projeto.

Foram identificadas as estratégias de sombreamento mais eficazes, adaptadas para cada orientação solar, que são mais propensas a diminuir o desconforto interior (térmico e visual) do edifício em estudo. Também se identificou a percentagem de área envidraçada adequada para cada orientação solar, com menor área nas fachadas mais expostas à radiação solar, equilibrando o desempenho do edifício entre as várias orientações de fachadas.

Em suma, as melhorias identificadas apontam para uma redução de 27% do consumo energético total, em consequência de uma diminuição de 39% da energia necessária para o arrefecimento, e uma melhoria do conforto visual, com uma diminuição de 78% do número total de horas anuais de iluminação excessiva.

Palavras-chave: simulação numérica, conforto térmico e visual, edifícios de escritórios, fachadas

1 INTRODUÇÃO

Os edifícios de hoje, são mais do que um mero abrigo; são uma expressão de fatores sociais e culturais, e as fachadas assumem-se como a nossa "terceira pele" definindo o espaço que habitamos. São as fachadas que determinam, em larga medida o conforto interior e a eficiência energética do edifício. Os edifícios, ao serem responsáveis por 36% das emissões totais de gases de efeito de estufa e por 40% dos consumos energéticos da União Europeia, têm consequentemente um potencial imenso de contribuição para a redução dos consumos e emissões, enquanto aumentam os padrões de segurança e conforto dos seus utilizadores. A correta adaptação da fachada ao clima deverá proporcionar níveis de conforto adequados e, consequentemente, um menor consumo energético (Gonçalves & Graça, 2004). A fachada influencia diretamente o conforto térmico, controlando os fluxos de calor e a radiação solar, e o conforto visual, através do correto posicionamento e orientação das zonas envidraçadas e dos sistemas de sombreamento (Santos, 2009).

Este estudo pretende otimizar o desempenho da fachada de um edifício de serviços, tendo por base 3 critérios: garantia do conforto térmico, conforto visual e eficiência energética do edifício. Através de uma análise de sensibilidade incidindo sobre os vários componentes da fachada do edifício, foram estudadas variantes à fachada-base, de forma a determinar aquelas que proporcionam uma melhoria do conforto interior e da eficiência energética do edifício, com o objetivo de definir a melhor solução otimizada de fachada para o caso de estudo.

2 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo é constituído por um edifício de escritórios a construir na cidade do Porto, desenvolvido por Broadway Malyan entre 2019 e 2020 (Broadway Malyan, 2022), sob a coordenação do 1º autor. O edifício implanta-se perpendicular à Rua Ferreira Dias, ficando com uma orientação de -46º a norte – que lhe confere exposição solar em todas as fachadas, conforme a Figura 1.

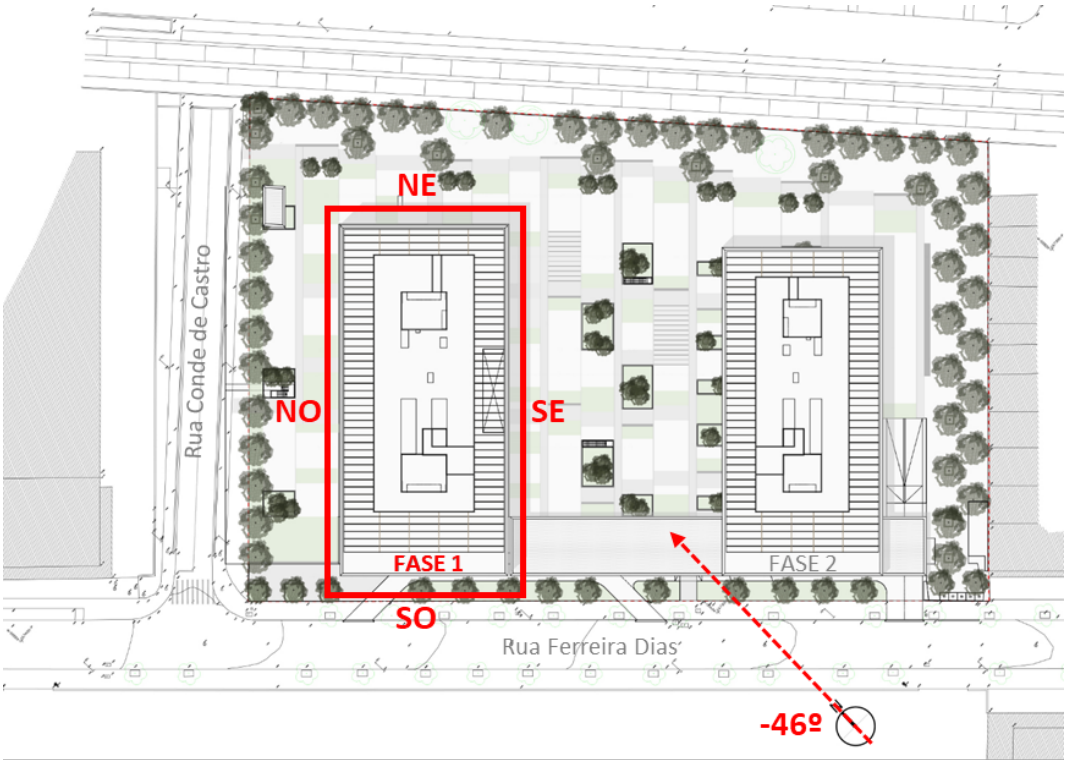


Figura 1 – Planta de implantação do edifício em estudo

O edifício é composto por 9 pisos e apresenta uma planta retangular de 66 × 33m, com os espaços de trabalho ao redor das 4 fachadas. As fachadas são maioritariamente em vidro, com uma composição de elementos opacos que difere entre a fachada SO, que tem varandas continuas de duplo piso, e a fachada SE com terraços recuados em posições variadas. O edifício organiza-se em módulos de fachada de 2 em 2 pisos compostos por: elementos opacos verticais de dupla altura e horizontais de 2 em 2 pisos, lâminas de sombreamento verticais de dupla altura e horizontais nos pisos intermédios, conforme mostra a Figura 2.

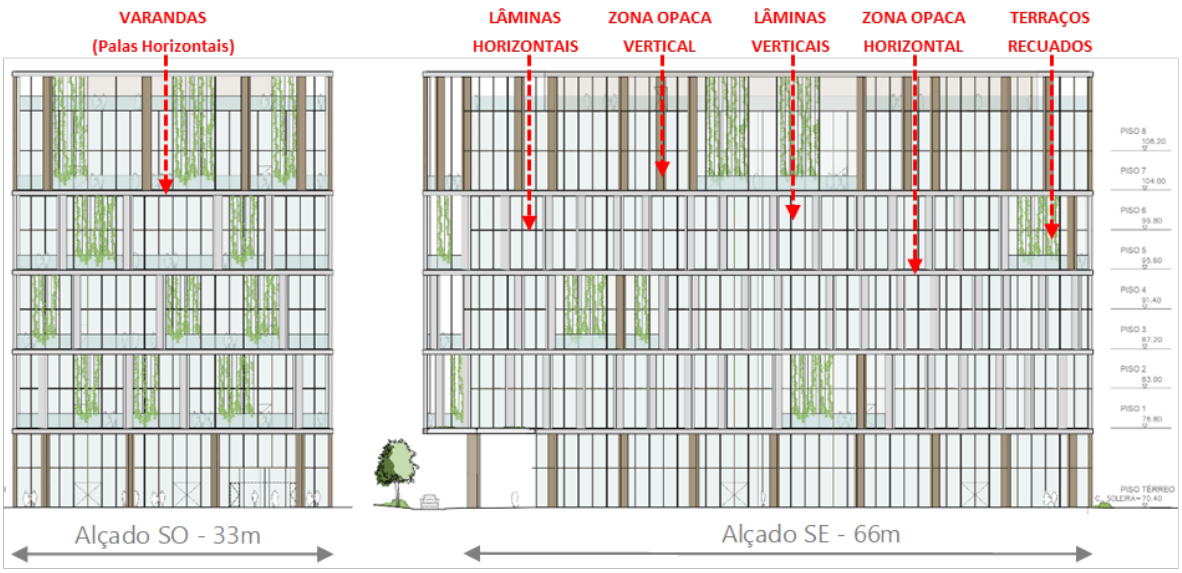


Figura 2 – Alçados SO e SE do edifício em estudo

3 METODOLOGIA

O desempenho térmico de um edifício é determinado pelo equilíbrio das trocas térmicas entre a sua envolvente e os espaços adjacentes, assim como pelos ganhos internos. As transferências de calor ocorrem devido à diferença de temperatura e manifestam-se por condução, convecção e radiação (Henriques, 2023). Para assegurar o conforto térmico é essencial gerir eficazmente as transferências de calor ao longo do dia e em diferentes estações do ano. O sol, contribuindo com energia solar (radiação) e luz natural, desempenha um papel crucial no conforto térmico e visual dos edifícios.

Para garantir o conforto visual, é necessário considerar aspetos quantitativos e qualitativos da iluminação. A quantidade de luz deve ser adequada para a realização das tarefas visuais (exigência quantitativa), enquanto a luz natural deve ser bem distribuída para evitar o encandeamento (aspeto qualitativo) (Santos, 2014).

Dada a complexidade do edifício em estudo e a repetição de pisos que o mesmo contempla, as simulações foram otimizadas focando-se num conjunto de 2 pisos consecutivos. Esta abordagem permitiu acelerar o processo de modelação e simulação do edifício em estudo e das suas alternativas. Com a modelação e a simulação do caso de estudo concluídas, foram simuladas variantes de cada elemento de fachada (aumentando e diminuindo a sua proporção na fachada), de modo a identificar as melhorias potenciais proporcionadas por cada um, estudando assim a influência de cada componente da fachada. As melhorias identificadas, considerando o equilíbrio entre o conforto térmico, visual e o desempenho energético, foram sucessivamente integradas no caso de estudo. Desta forma foi possível registar o benefício de cada melhoria ao longo do processo de otimização,

proporcionando uma análise detalhada de como cada alteração contribui para o desempenho global de edifício.

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 MODELO DE SIMULAÇÃO

De acordo com a legislação vigente em Portugal, o desempenho energético dos edifícios é regulamentado pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro (Presidência do Conselho de Ministros, 2020), juntamente com portarias e despachos subsequentes. Estes documentos estabelecem os requisitos aplicáveis aos edifícios para a melhoria do seu desempenho energético, incluindo limites específicos para vários componentes: envolvente opaca e envidraçada; sistemas de ventilação; sistemas de climatização; equipamentos elétricos e iluminação artificial; sistemas de preparação de água quente; sistemas de produção de energia elétrica.

Para a análise do edifício em estudo, foram considerados 2 pisos tipo consecutivos (piso 5 e 6), representativos do desempenho das fachadas do edifício. Cada piso foi subdividido em 4 zonas térmicas distintas, correspondendo a cada uma das orientações das fachadas, conforme ilustrado na Figura 3. O núcleo de circulações central foi excluído das simulações, sendo que as superfícies em contacto com os espaços não modelados foram definidas como adiabáticas.

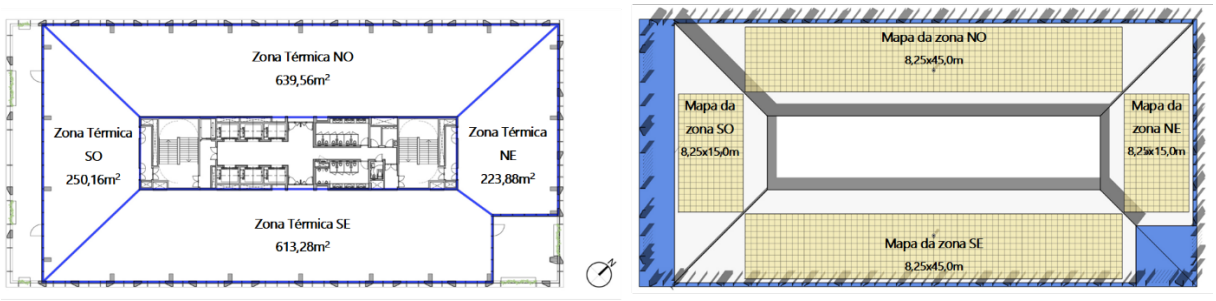


Figura 3 – Planta tipo com as 4 zonas térmicas e Planta com os mapas de iluminâncias

Foram incorporados mapas de iluminâncias para avaliar os níveis de iluminação, colocados a 0,50m da fachada, com uma profundidade de 8,25m e a uma altura de 0,75m (semelhante à altura de referência de um plano de trabalho), conforme a Figura 3. Para a simulação da probabilidade de encandeamento, adicionaram-se 2 sensores em cada zona térmica, posicionados a 2m e 6m da fachada, respetivamente, ambos a uma altura de 1,2m (equivalente à altura do olho humano em posição sentada no posto de trabalho).

Em cada zona térmica foram aplicados os perfis de ocupação (1 pessoa por cada 8 m^2), iluminação (6,5W/m^2) e equipamentos elétricos (15W/m^2), com os horários definidos pelo Manual de SCE (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021). As características físicas das superfícies de cada zona foram definidas de seguinte forma: envidraçados (U=1,91W/m^2ºC, g=0,33, αsol=0,30), paredes exteriores (U=0,20W/m^2ºC, αsol=0,30), paredes interiores (U=2,63W/m^2ºC, αsol=0,15), pavimentos (U=0,94W/m^2ºC, αsol=0,55) e tetos (U=3,60W/m^2ºC, αsol=0,30).

Para a climatização utilizou-se o método de Cargas Ideais de Ar do EnergyPlus, definindo-se as temperaturas de controlo: arrefecimento, 24ºC com ocupação, e 26ºC sem ocupação; aquecimento, 20º com ocupação, e 18º sem ocupação. O caudal de ar novo mínimo considerado foi 24m^3/(h.ocupante).

A Figura 4 ilustra o modelo tridimensional de simulação do caso de estudo.

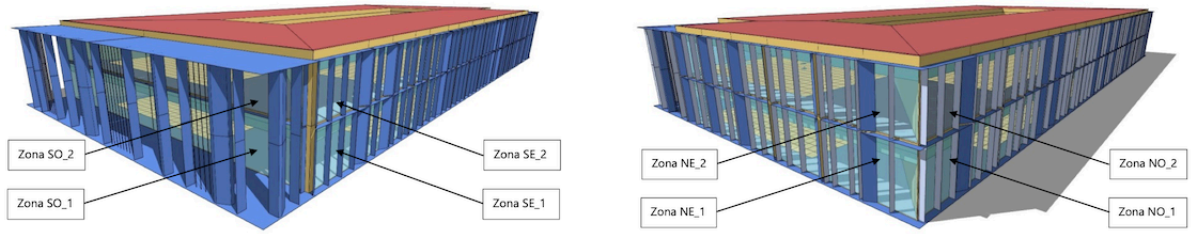


Figura 4 – Modelo tridimensional de simulação – vista sul e vista norte

As simulações foram configuradas de forma a obter em cada zona térmica, os seguintes resultados:

- Desempenho térmico anual (ganhos e perdas da envolvente opaca e envidraçados, e os ganhos internos provenientes da ocupação, iluminação e equipamentos elétricos);

- Consumo energético anual (climatização, ventilação, iluminação e equipamentos elétricos);

- Iluminâncias no plano de trabalho para cada hora do ano, em cada ponto, as métricas $UDI_{(100\text{-}3000\ lux,\ Daylit\ and\ Occupied\ Hours)}$, e $sDA_{(300\ lux,\ 8h\text{-}18h)}$;

- Probabilidades de encandeamento nos 2 pontos (DGPs).

4.2 Estudo de Otimização das Fachadas

De forma a equilibrar e otimizar o desempenho energético e o conforto do edifício, foi realizado um estudo detalhado das soluções de melhoria da envolvente construtiva. Este estudo visou analisar de forma individual cada elemento das fachadas, determinando a melhor solução para cada orientação.

- Vidros: Para o fator solar dos vidros, foram consideradas duas opções: Vidro menos transparente (fator solar menor) com valores de g=0,276 e Tv=0,600; Vidro mais transparente (fator solar maior) com valores de g=0,431 e Tv=0,652

- Elementos opacos verticais: A largura dos elementos opacos verticais foi variada de 1,0m para 1,25m e 1,5m, analisando o impacto dessas variações no desempenho térmico e visual.

- Elementos Opacos Horizontais: Foram adicionadas faixas opacas horizontais com 0,5m de altura, com e sem lâmina de sombreamento, e a profundidade desses elementos foi variada de 400mm para 300mm e 500mm.

- Lâminas de Sombreamento: As lâminas de sombreamento foram estudadas com variações no afastamento vertical de 1,5m para 0,75m e 0,5m, e no afastamento horizontal, reduzindo de 4,2m para 2,1m e 1,4m.

- Varandas: Foram adicionadas varandas nas fachadas NE, NO e SE, replicando a solução da fachada SO, com profundidades de 1m e 2m, mantendo a varanda na fachada SO com 4m.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O caso de estudo revelou, através das simulações numéricas, assimetrias significativas de desempenho entre as várias fachadas, tanto ao nível da orientação solar como entre os dois pisos analisados. Os principais pontos de melhoria identificados foram: ganhos térmicos excessivos através dos vãos

envidraçados; elevado consumo energético para o arrefecimento; iluminação natural excessiva nas fachadas sul; probabilidades de encandeamento próximos às janelas.

As simulações de otimização da envolvente construtiva identificaram a melhor configuração para cada elemento das fachadas. Para os vidros, a opção selecionada foi um vidro com fator solar menor (menos transparente), com valores de g=0,267 e Tv=0,584. Nos elementos opacos da fachada, os elementos verticais foram alargados para 1,25m nas fachadas NE, NO e SE, e para 1,5m na fachada SO, onde também se duplicou a quantidades destes elementos. Nos elementos horizontais, foi adicionada uma faixa opaca entre os dois pisos e aumentada a altura das zonas opacas para 0,6m. A profundidade dos elementos da fachada foi aumentada para 0,5m. Para as lâminas de sombreamento verticais o afastamento foi reduzido para 1m nas fachadas NE e NO, mantendo 1,5m nas fachadas SE e SO. Já no caso das lâminas de sombreamento horizontais, apenas no piso inferior das fachadas SE e SO, o afastamento foi reduzido para 1,2m.

A implementação de varandas foi identificada como a solução mais eficaz, sendo adicionadas nas fachadas NE (2m de profundidade), NO (1,2m de profundidade) e SE (2,5m de profundidade), mantendo-se a varanda com 4m de profundidade na fachada SO. A Figura 5 ilustra o modelo tridimensional de simulação com as medidas de otimização implementadas. As otimizações foram introduzidas sequencialmente, permitindo avaliar o impacto de cada medida.

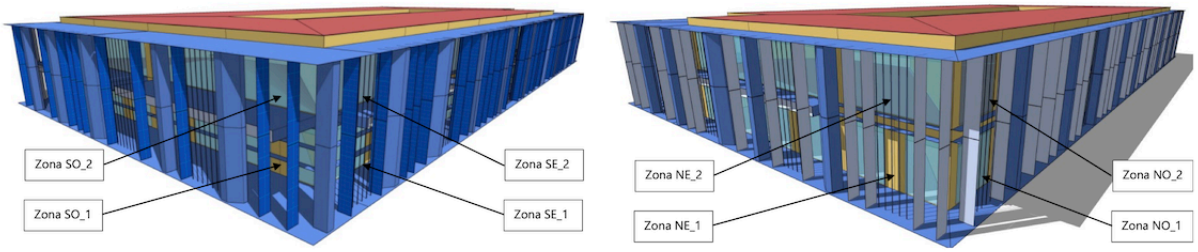


Figura 5 – Modelo tridimensional otimizado – vista sul e vista norte

5.1 DESEMPENHO TÉRMICO

Conforme mostra a Figura 6, as medidas de otimização reduziram os ganhos térmicos anuais de 38,06 kWh/m2.ano para 20,54 kWh/m2.ano, proporcionando um maior equilíbrio entre as diferentes zonas térmicas.

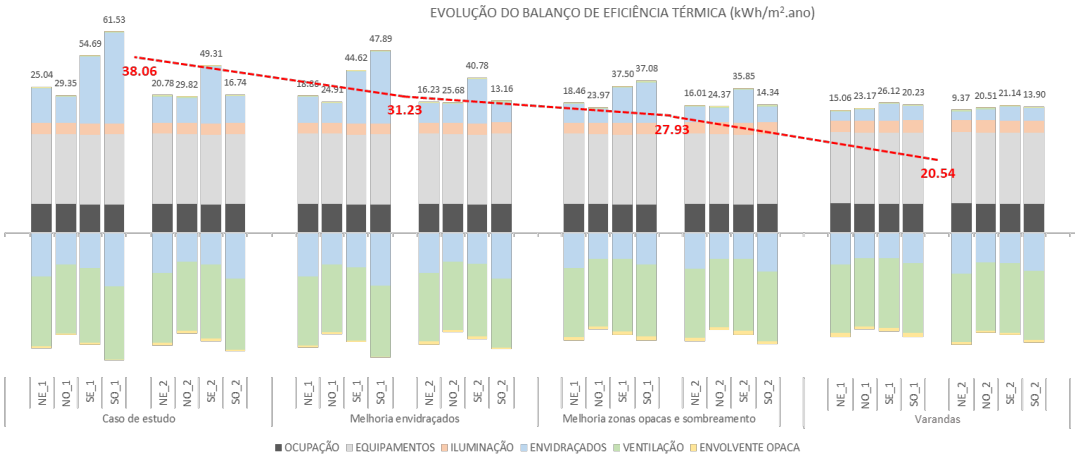


Figura 6 – Gráfico de evolução do Balanço Térmico

A alteração para vidros com um menor fator solar, resultou numa redução de 18% nos ganhos térmicos, especialmente no verão. O aumento das áreas opacas proporcionou uma redução adicional de 11%, com maior impacto nas fachadas a sul. A adição de varandas nas 4 fachadas resultou numa das maiores reduções, com 19%, equilibrando o desempenho entre as zonas térmicas, graças à profundidade adaptada a cada orientação solar. No global, a otimização permitiu uma redução de 46% de ganhos térmicos anuais, diminuindo a energia útil térmica total de 131 458,63kWh/ano, para 70 924,85kWh/ano, principalmente devido à significativa redução dos ganhos solares através dos vãos envidraçados (redução de 294%), conforme identificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo da Energia útil térmica anual: caso de estudo e otimização (kWh/ano)

	Ocupação	Iluminação Artificial	Equipamentos	Envidraçados	Ventilação	Envolvente Opaca	TOTAL
Caso de Estudo	82 237,11	31 484,39	202 231,50	24 580,39	-203 468,95	-5 605,80	131 428,63
Otimização	83 187,75	34 372,25	202 231,50	-47 752,47	-194 029,89	-7 084,29	70 924,85
Diferença	1,16%	9,17%	0,00%	-294,27%	-4,64%	26,37%	-46,05%

5.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO

A otimização aumentou a eficiência energética do edifício, conforme ilustrado na Figura 7, com uma redução do consumo energético anual de 53,21 kWh/m^2.ano para 39,10 kWh/m^2.ano, equilibrando o consumo energético de cada zona térmica, através de uma redução do consumo em arrefecimento.

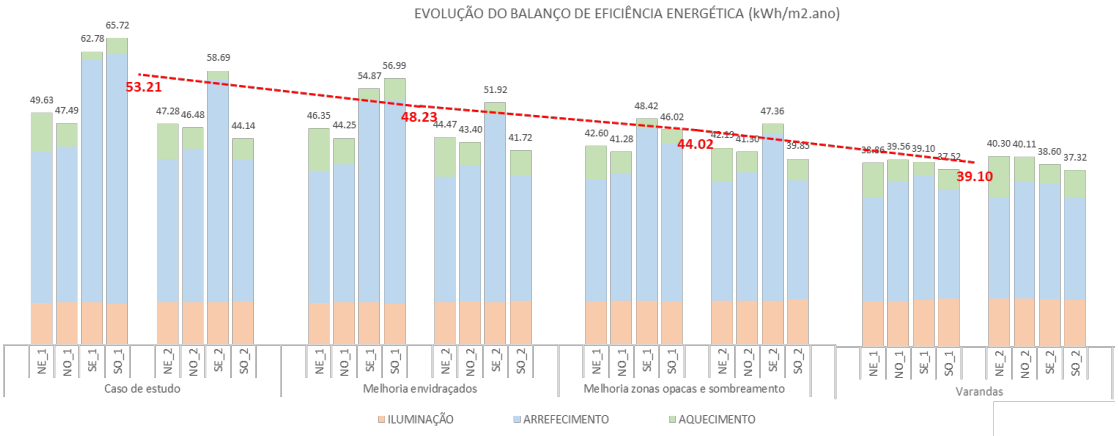


Figura 7 – Gráfico de evolução do Balanço Energético

A introdução de vidros com menor fator solar permitiu uma redução de 9% do consumo energético. O aumento das áreas opacas resultou numa redução adicional de 8%, por redução da área envidraçada, diminuindo as necessidades de arrefecimento e aquecimento. A adição de varandas nas 4 fachadas permitiu uma redução adicional de 9%, equilibrando o consumo entre as diferentes zonas térmicas.

No global a otimização permitiu uma redução de 27% nos consumos anuais do tipo S, diminuindo o consumo de energia útil de 133 772,50kWh/ano, para 135 046,91kWh/ano, pela redução de energia para arrefecimento, que teve uma redução de 39%. Apesar de existir um ligeiro aumento dos restantes consumos de energia (iluminação e aquecimento), este é substancialmente inferior à redução em arrefecimento, resultando em um desempenho energético mais eficiente, conforme identificado no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo do consumo de Energia útil anual: caso de estudo e otimização (kWh/ano)

	Iluminação Artificial	Arrefecimento	Aquecimento	TOTAL Consumos Tipo S	Equipamentos	TOTAL Consumos Tipo T
Caso de Estudo	31 484,39	138 382,11	13 905,99	183 772,50	202 231,50	386 004,00
Otimização	34 372,25	84 033,86	16 640,80	135 046,91	202 231,50	337 278,41
Diferença	9,17%	-39,27%	19,67%	-26,51%	0,00%	-12,62%

5.3 CONFORTO VISUAL

As soluções de otimização tiveram um impacto muito positivo na disponibilidade e qualidade da iluminação natural (Quadro 3), reduzindo a iluminação excessiva (denotada pelo aumento do UDI) e mantendo os níveis de iluminação necessários para a iluminação natural ser "preferida" pelos ocupantes (sDA igual ou superior a 0,75).

Quadro 3 – Conforto Visual $UDI_{(100\text{-}300)}$ e $sDA_{(300)}$: caso de estudo e otimização

	NE_1	NO_1	SE_1	SO_1	NE_2	NO_2	SE_2	SO_2
	$UDI_{(100\text{-}300)}$ | $sDA_{(300)}$							
Caso de Estudo	0,76 | 0,90	0,79 | 0,87	0,64 | 0,89	0,59 | 0,91	0,79 | 0,88	0,79 | 0,86	0,66 | 0,88	0,74 | 0,85
Otimização	0,81 | 0,77	0,80 | 0,75	0,74 | 0,76	0,77 | 0,75	0,82 | 0,75	0,81 | 0,75	0,75 | 0,75	0,77 |0,76

Comparando as iluminâncias no plano de trabalho da solução otimizada com as do caso de estudo (Figura 8), em termos de média anual em cada hora, observou-se que o caso de estudo apresentava variações muito acentuadas nas zonas do quadrante sul (fachadas SE e SO) com picos de iluminação excessiva muito elevados, chegando a quase 7000 lux nas zonas SE e 5000 lux nas zonas SO. A otimização, suavizou essas variações ao longo do dia, mantendo valores abaixo dos 3000 lux.

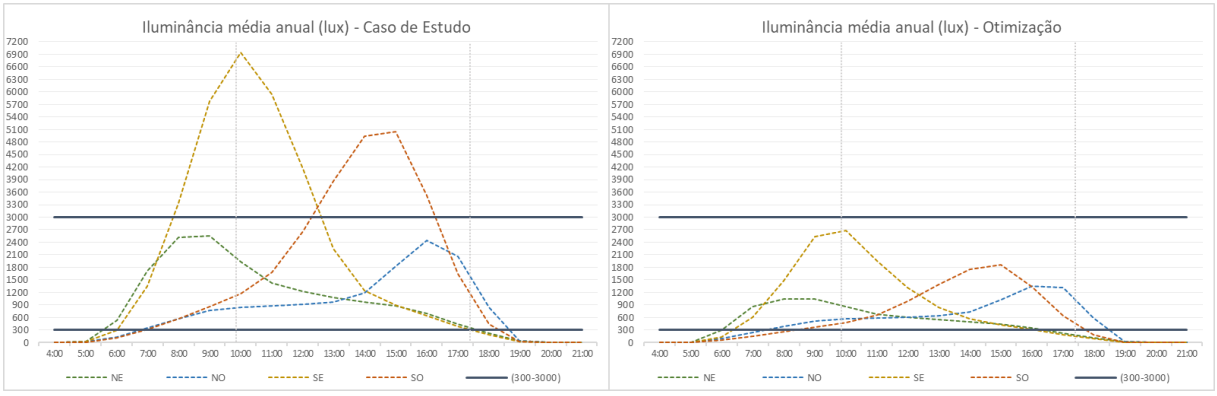


Figura 8 – Iluminâncias médias anuais a cada hora no plano de trabalho: caso de estudo e otimização

A Figura 9 mostra que a otimização reduziu significativamente o número de horas anuais de iluminação excessiva (acima de 3000 lux) e aumentou as horas dentro dos intervalos de conforto visual (100-3000 lux). As zonas do quadrante sul, que inicialmente apresentavam um elevado número de horas de iluminação excessiva, mostraram uma grande melhoria, com poucas horas de iluminação excessiva nas zonas SE. A solução otimizada também foi mais homogénea entre as várias orientações, proporcionando maior equidade no número de horas dentro dos intervalos de conforto, em comparação com o caso de estudo.

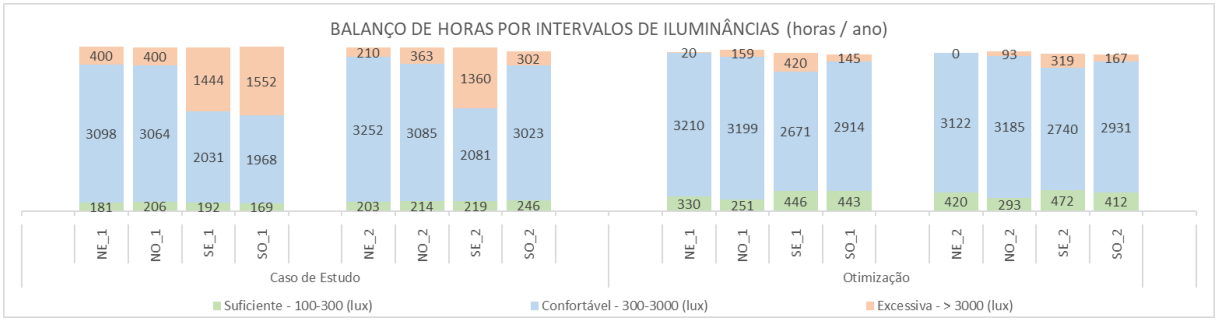


Figura 9 – Número de horas anuais por intervalo de iluminância (intervalo horário das 8h-18h): caso de estudo e otimização

5.4 ENCANDEAMENTO

A comparação entre os resultados do caso de estudo e da otimização revelou uma melhoria significativa nas probabilidades de encandeamento (Figura 10), com uma redução de cerca de 85% no número de horas com probabilidade de encandeamento intolerável. Embora ainda haja casos pontuais de encandeamento próximo à fachada (especialmente nas fachadas SE), a probabilidade de encandeamento é muito reduzida no interior, a uma distância de 6 metros da fachada. No global, os períodos com probabilidade de encandeamento desconfortável (DGPs acima dos 0,40) representam menos de 3% do total de horas de ocupação após a otimização, permitindo uma melhoria substancial no conforto visual em relação ao caso de estudo.

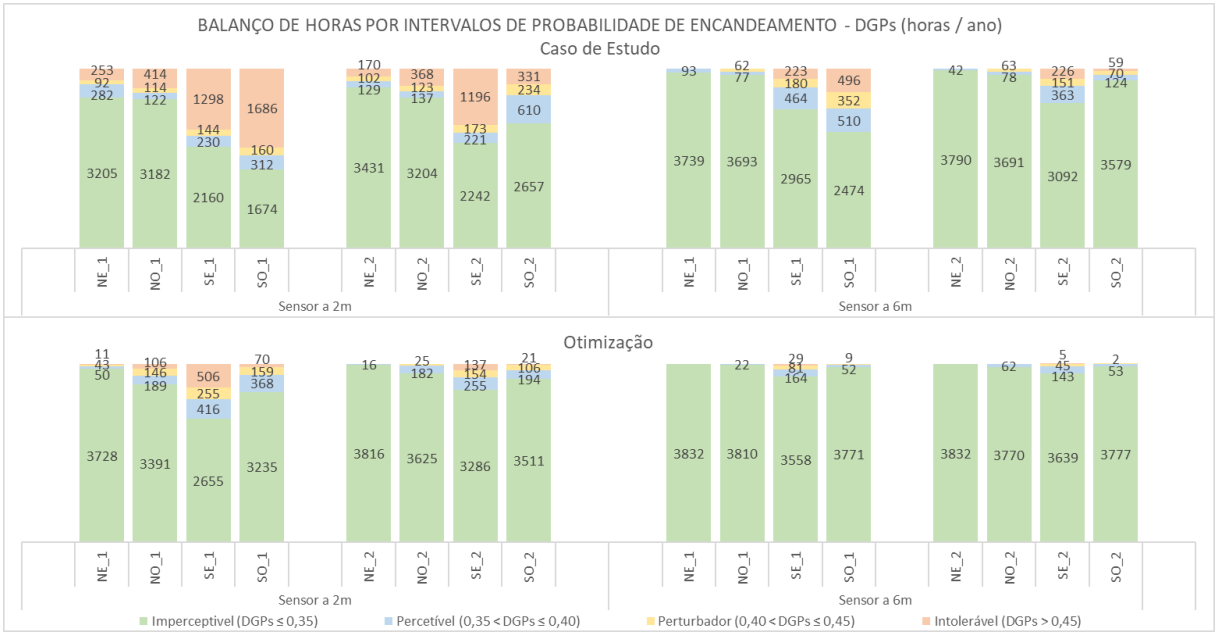


Figura 10 – Número de horas anuais por intervalo de probabilidade de encandeamento - DGPs (intervalo horário das 8h-18h): caso de estudo e otimização

5.5 ÁREA ENVIDRAÇADA

A otimização, através do aumento das áreas opacas, resultou numa redução diferenciada das áreas envidraçadas em cada piso (Quadro 4). No caso de estudo, as áreas envidraçadas representavam percentagens muito elevadas (acima de 74%), enquanto na otimização essas percentagens diminuíram para valores entre 56% e 59%, reduzindo os ganhos solares excessivos. No piso superior, a

percentagem de área envidraçada em cada fachada foi pouco alterada, sendo a proximidade às varandas mais eficaz na redução dos ganhos solares excessivos, sem a necessidade de reduzir a área envidraçada, promovendo assim um melhor conforto visual.

Quadro 4 – Comparativo das zonas envidraçadas por fachada: caso de estudo e otimização

	NE_1	NO_1	SE_1	SO_1	NE_2	NO_2	SE_2	SO_2
	m² | %							
Caso de Estudo	108 | 78%	204 | 74%	207 | 75%	131 | 95%	97 | 70%	184 | 66%	186 | 67%	118 | 85%
Otimização	77 | 56%	163 | 59%	159 | 57%	78 | 56%	99 | 71%	192 | 69%	195 | 70%	99 | 71%
Diferença	-28%	-20%	-23%	-41%	2%	4%	5%	-16%

As soluções de otimização identificadas neste trabalho foram implementadas no projeto do edifício, revendo a envolvente construtiva (fachadas) de forma a melhorar as condições de conforto interior do futuro edifício, que se encontra em construção. A imagem exterior do edifício foi atualizada para refletir as novas soluções otimizadas, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Comparação do edifício inicial e o otimizado - Vista 3D

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho analisou-se o desempenho de um edifício de escritórios, focando na otimização do conforto interior e eficiência energética através de simulações numéricas usando o EnergyPlus e o Radiance, com base em dados climáticos locais. O caso inicial revelou desequilíbrios significativos de desempenho entre as fachadas, resultando em ganhos térmicos excessivos pelos envidraçados, elevado consumo de energia para arrefecimento, iluminação natural excessiva no quadrante sul e elevados períodos de probabilidade de desconforto visual (encandeamento).

Através de simulações numéricas detalhadas, foram testadas diferentes variantes de fachada (vidro, zonas opacas e sombreamentos) para identificar as melhores soluções. A solução otimizada implementa uma nova estratégia de sombreamento, com elementos horizontais projetados das fachadas (varandas de 2 em 2 pisos) com profundidades diferentes para cada orientação solar (maiores

no quadrante sul e menores no quadrante norte), e reduz a área envidraçada nas zonas térmicas mais expostas à radiação solar, equilibrando o desempenho do edifício entre as várias fachadas.

As otimizações resultaram numa melhoria significativa no balanço térmico anual, com uma redução de 27% no consumo energético anual (consumos do tipo S), principalmente devido à diminuição da energia necessária para o arrefecimento, que teve uma redução total de 39%. O estudo também permitiu uma melhoria significativa do conforto visual nos espaços interiores, tendo-se verificado uma diminuição do número total de horas anuais de iluminação excessiva (iluminâncias acima dos 3000 lux) de 78%, e uma diminuição do número de horas anuais de probabilidade de encandeamento intolerável (DGPs>0,45) de 85%. As simulações de conforto visual indicam que a solução otimizada oferece uma qualidade de iluminação natural superior em comparação com o caso de estudo.

Em resumo, a solução otimizada de fachada resultou num edifício mais eficiente energeticamente e mais confortável para os ocupantes, adaptando-se corretamente ao clima local e melhorando o desempenho geral do edifício.

Como desenvolvimentos futuros ao trabalho realizado, identificam-se os seguintes:

- Após a construção da solução otimizada, realizar estudos de medição “in situ” dos parâmetros estudados neste trabalho para comparação com os resultados obtidos pelas simulações numéricas, e validação da metodologia aqui aplicada.

- Aplicar esta metodologia de otimização a outros edifícios de escritórios em localizações climáticas diferentes e/ou com geometrias opostas ao caso de estudo (edifício mais horizontal, com maior área por piso, e edifício mais vertical, com mais pisos), de forma a avaliar a eficácia desta metodologia em condições diversas, e identificar as suas limitações.

REFERÊNCIAS

Broadway Malyan. (2022, February 17). *Work set to start on green office project in Porto*. https://www.broadwaymalyan.com/news/work-set-to-start-on-green-office-project-in-porto/

Direção-Geral de Energia e Geologia. (2021). Despacho n.º 6476-H/2021 de 1 de julho - Manual SCE. In *D.R. n.º 126, 2º Sup. 2ª Série* (6476-H/2021; Vol. 126, pp. 330(66)-330(316)). D.R. n.º 126, Serie II de 2021-07-01. https://files.dre.pt/2s/2021/07/126000002/0006600316.pdf

Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. DGGE / IP-3E.

Henriques, F. M. A. (2023). *Comportamento Higrotérmico de Edifícios* (Versão 11.8). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Nova de Lisboa.

Presidência do Conselho de Ministros. (2020). Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 07 de dezembro. In *D.R. n.º 237, 1º Supl. 1ª Série* (101-D; Vol. 237, pp. 7(21)-7(45)). https://files.dre.pt/1s/2020/12/23701/0002100045.pdf

Santos, A. J. (2009). *A iluminação nos edifícios. Uma abordagem no contexto da sustentabilidade e eficiência energética: Vol. COM 133* (2nd ed.). LNEC.

Santos, A. J. (2014). *A iluminação natural nos edifícios. Uma perspetiva no âmbito do conforto ambiental e da eficiência energética: Vol. ITE 57*. LNEC.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DE UM ENVIDRAÇADO ELECTROCRÓMICO NO CONFORTO TÉRMICO E VISUAL EM PORTUGAL

Henriqueta Teixeira[a]; M. Glória Gomes[a]; A. Moret Rodrigues[a]; Daniel Aelenei[b,c]

[a]CERIS, DECivil, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt, maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt, moret.rodrigues@tecnico.ulisboa.pt

[b]UNINOVA-CTS, DEC, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal, aelenei@fct.unl.pt

[c]LASI, 4800-058 Guimarães, Portugal

RESUMO

Os envidraçados electrocrómicos alteram as suas propriedades óticas na presença/ausência de um estímulo elétrico, aumentando/diminuindo o escurecimento do envidraçado para controlar os ganhos solares e promover condições de conforto.

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto de um envidraçado electrocrómico (com controlo: I – encadeamento; II – temperatura interior) no conforto de um escritório, comparativamente a um envidraçado incolor. Utilizou-se um modelo de simulação dinâmica calibrado. As percentagens de horas laborais anuais com conforto térmico (legislação portuguesa, modelo adaptativo do ASHRAE 55, PMV) e conforto visual (UDI, DGI) foram determinadas para Lisboa, Bragança e Faro, correspondentes a diferentes zonas climáticas de Portugal.

O envidraçado electrocrómico diminuiu os níveis de temperatura excessiva em todas as cidades, mas aumentou (+ 5-15%) a ocorrência de temperaturas baixas em Bragança. O controlo II promoveu condições de conforto térmico (15-30%) considerando um regime livre, mas o controlo I teve um melhor desempenho (70-97%) com ar-condicionado.

O controlo I foi mais eficiente a gerir a transmissão de radiação visível, aumentando (+ 8-11%) os níveis de iluminância útil nas três cidades. No entanto, o controlo II foi mais eficaz na redução de encadeamento, atingindo percentagens elevadas 84-94% com encadeamento impercetível nas três cidades.

Palavras-chave: Envidraçado electrocrómico; Conforto térmico; Conforto visual; Simulação dinâmica

1 INTRODUÇÃO

Os envidraçados convencionais de edifícios são frequentemente responsáveis por trocas de calor significativas que resultam em desconforto térmico (Ashrafian & Moazzen, 2019) e, consequentemente, em necessidades de climatização elevadas devido a ganhos térmicos excessivos durante os meses quentes e perdas térmicas expressivas durante os meses frios. Além do forte impacto no conforto térmico de edifícios, principalmente no caso de fachadas com grandes áreas de envidraçado, o conforto visual também é influenciado devido à transmitância visível elevada dos envidraçados convencionais que pode resultar na transmissão excessiva de iluminação natural e causar problemas de encadeamento (J. Li et al., 2019).

A utilização de sistemas de sombreamento, interiores ou exteriores, como cortinas, estores, palas e portadas, permite melhorar o desempenho de envidraçados (Gomes et al., 2014; Karlsen et al., 2016). No entanto, estes sistemas podem bloquear a vista para o exterior, parcial ou totalmente, o que pode ser considerado desvantajoso pelos ocupantes. Também é possível melhorar o desempenho do vidro incolor através da incorporação de revestimentos ou películas, do tipo neutras, baixo-emissivas, refletoras, duplamente refletoras ou espectralmente seletivas, que alteram as propriedades do vidro utilizado como substrato e têm como objetivo reduzir as necessidades de climatização e problemas de encadeamento (Pereira et al., 2019; Teixeira et al., 2020). No entanto, estes revestimentos e películas apresentam um comportamento estático que pode limitar o seu desempenho. Com a ambição de promover edifícios de balanço energético nulo (Jaysawal et al., 2022), e tendo em conta a tendência arquitetónica de edifícios com grandes áreas de envidraçado, a investigação de tecnologias inovadoras de envidraçados tem crescido nos últimos anos, resultando em envidraçados inteligentes capazes de reagir a estímulos e de se adaptarem às condições do ambiente em que se encontram, contrabalançando múltiplos requisitos de desempenho (Rezaei et al., 2017).

Os envidraçados electrocrómicos (Casini, 2018), enquanto envidraçados inteligentes, alteram de forma reversível as suas propriedades óticas, aumentando/diminuindo o seu nível de escurecimento em resposta à presença/ausência de um estímulo elétrico. Este comportamento dinâmico é possível devido à incorporação de um sistema electrocrómico no envidraçado constituído por: camada de armazenamento de iões, condutor iónico (eletrólito), elétrodo e duas camadas de condutor transparente. Na presença de uma tensão elétrica, a transferência de iões, desde a camada de armazenamento até ao elétrodo, altera o nível de escurecimento do vidro, sendo possível alcançar níveis intermédios. O consumo de energia para alterar o nível de escurecimento é baixo, sendo ainda de menor dimensão para se manter um nível específico. Na ausência de uma tensão elétrica o envidraçado reverte a alteração cromática, possuindo uma aparência transparente.

Estudos científicos (DeForest et al., 2017; Dussault & Gosselin, 2017; Park et al., 2019) sobre o desempenho energético de envidraçados electrocrómicos concluem que estes reduzem as necessidades energéticas de arrefecimento, comparados com os envidraçados tradicionais, principalmente em climas quentes com níveis de radiação elevados. No entanto, o consumo energético de iluminação artificial aumenta, devido à baixa transmitância visível destes envidraçados quando escurecem.

No que diz respeito à investigação do impacto de envidraçados electrocrómicos no conforto térmico dos ocupantes, os estudos (Dussault & Gosselin, 2017; Jain et al., 2022; Y. Li et al., 2023) são escassos, e em geral concluem que o conforto térmico aumenta na presença deste tipo de envidraçados, comparativamente aos envidraçados incolores. O impacto no conforto visual é usualmente avaliado através dos índices DGI e UDI, com os estudos existentes (Ajaji & André, 2015; Cannavale et al., 2018;

Fathi & Kavoosi, 2021) a concluírem que este tipo de envidraçado possibilita a redução de encadeamento sem prejudicar a iluminação natural dos espaços.

Os estudos anteriores sobre o desempenho de envidraçados electrocrómicos tendem a focar-se no aspeto energético, ou investigam as condições de conforto térmico e visual de forma isolada através da utilização de métricas específicas. No entanto, dado que as pessoas passam grande parte do tempo no interior de edifícios (European Commission, 2003), torna-se extremamente importante analisar o impacto desta tecnologia de envidraçado no conforto quer térmico quer visual dos ocupantes. Assim, com vista a complementar a investigação existente, o presente estudo tem como objetivo analisar o impacto de um envidraçado electrocrómico no conforto de um espaço de trabalho (escritório) sob diferentes zonas climáticas de Portugal

2 MÉTODOS

A Figura 1 apresenta uma esquematização da metodologia adotada no presente estudo. Como caso de estudo foi adotado um espaço de trabalho individual, orientado a Sudeste, para investigar o impacto de um envidraçado electrocrómico no conforto térmico e visual, comparativamente a um envidraçado duplo incolor. O modelo 3D do escritório foi construído no programa SketchUp (*SketchUp*, n.d.) com o plug-in OpenStudio (*OpenStudio*, n.d.). Os programas Optics (*Optics | Windows and Daylighting*, n.d.) e Window (Curcija et al., 2018) foram utilizados para determinar as propriedades térmicas e óticas dos envidraçados. O modelo de simulação dinâmica foi desenvolvido no software EnergyPlus (*EnergyPlus*, n.d.), tendo sido calibrado anteriormente com dados experimentais (Teixeira et al., 2021). As percentagens de horas laborais anuais com conforto térmico (legislação portuguesa, modelo adaptativo do ASHRAE 55, índice PMV) e conforto visual (índices UDI e DGI) foram estimadas através da simulação na presença das duas soluções de envidraçado. Foram considerados os ficheiros climáticos (*Weather Data by Location | EnergyPlus*, n.d.) das cidades de Bragança (zona I3 e V2), Lisboa (zona I1 e V2), e Faro (zona I1 e V3), considerados representativos de diferentes zonas climáticas de Portugal para analisar a influência do clima no desempenho dos envidraçados.

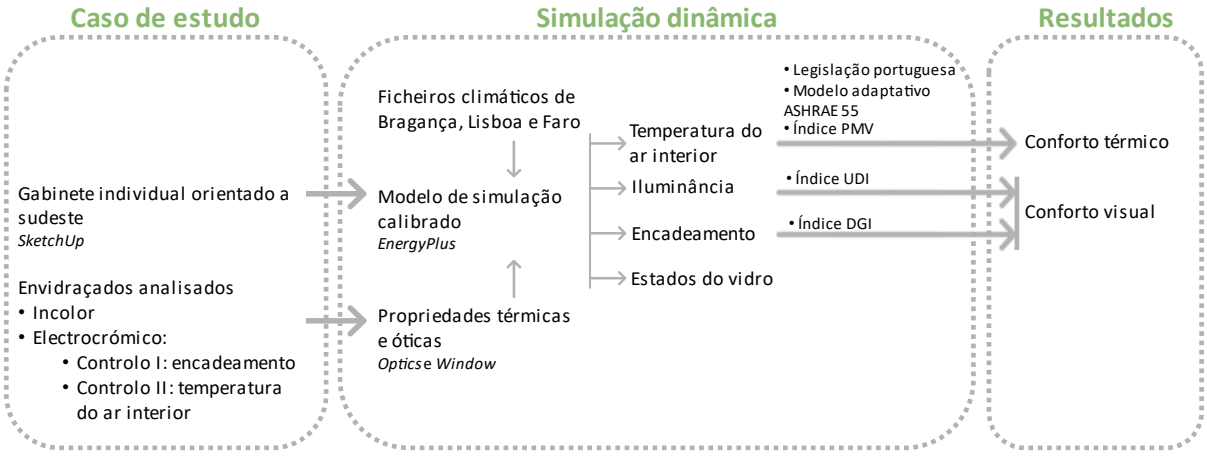


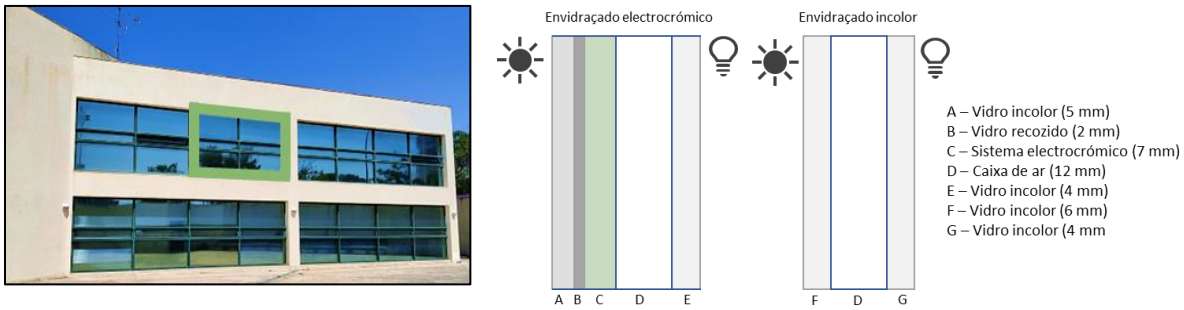
Figura 1 – Metodologia adotada neste estudo

2.1 CASO DE ESTUDO

O espaço de trabalho individual adotado como caso de estudo situa-se no último piso de um pavilhão universitário (Figura 2a) do Instituto Superior Técnico no *campus* Alameda, em Lisboa, apresentando áreas de pavimento e envidraçado de 19m^2 e 10.4m^2, respetivamente. A fachada é orientada a

Sudeste, com um rácio de envidraçado ($A_{envidraçado}/A_{fachada}$) de 81%. São utilizados estores venezianos interiores com lâminas metálicas horizontais como sombreamento, não tendo sido considerados na simulação dinâmica deste estudo conforme é justificado na subsecção 2.2. O ocupante pode controlar a temperatura interior através de um sistema de ar-condicionado (relação de eficiência energética sazonal em arrefecimento (SEER): 7.98; coeficiente de performance sazonal em aquecimento (SCOP): 4.43) com um set-point de temperatura pré-definido (22±2°C).

As configurações dos envidraçados analisados neste estudo (duplo incolor e duplo electrocrómico) são apresentadas na Figura 2b. O envidraçado electrocrómico é constituído por um pano de vidro laminado pelo exterior que integra o sistema electrocrómico, uma caixa de ar e um pano de vidro incolor interior. O envidraçado convencional é constituído por dois panos de vidro incolor separados por uma caixa de ar.



a. b.

Figura 2 –a. Localização do envidraçado do escritório na fachada do pavilhão; b. envidraçados analisados

2.2 SIMULAÇÃO DINÂMICA

O modelo geométrico do escritório foi construído no programa SketchUp (*SketchUp*, n.d.) com o plug-in do OpenStudio (*OpenStudio*, n.d.) instalado. Com exceção da fachada opaca (U=2.6W/m^{2}K) e da cobertura (U=0.77W/m^{2}K), todas as superfícies foram consideradas adiabáticas. Recorrendo aos programas Optics (*Optics | Windows and Daylighting*, n.d.) e Window (Curcija et al., 2018), as propriedades térmicas e óticas do envidraçado original (duplo incolor) foram determinadas e utilizadas na calibração do modelo em EnergyPlus (*EnergyPlus*, n.d.), juntamente com o modelo 3D e o ficheiro climático de Lisboa editado com dados meteorológicos recolhidos durante uma campanha experimental (Teixeira et al., 2021). Os parâmetros estatísticos NMBE e Cv(RMSE), largamente aplicados na validação de modelos energéticos calibrados, foram utilizados neste estudo para avaliar o erro entre os valores simulados e obtidos experimentalmente das seguintes variáveis de calibração: temperatura do ar interior; temperatura superficial interior do envidraçado; temperatura superficial exterior do envidraçado. Os valores de NMBE e Cv(RMSE) obtidos (NMBE: –11.15 - 0.49%, Cv(RMSE): 4.41 - 22.60%) (Teixeira et al., 2022) encontram-se abaixo dos valores de referência indicados no ASHRAE Guideline 14 (ANSI/ASHRAE, 2002), sendo então correto afirmar que o modelo criado se encontra calibrado.

Após calibração, o modelo foi utilizado para simular o conforto térmico e visual na presença do envidraçado original (duplo incolor) e do envidraçado electrocrómico. O conforto térmico foi avaliado através da percentagem de horas laborais anuais com conforto e desconforto de acordo com a legislação portuguesa, do modelo adaptativo do ASHRAE 55 e do índice PMV. A legislação portuguesa ("Despacho 6476-H/2021," 2021) considera condições de conforto quando a temperatura interior se encontra entre 20-25°C em edifícios comerciais, não considerando outros parâmetros como taxa

metabólica, roupa, velocidade do ar e humidade relativa. O modelo adaptativo do ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) define condições de conforto para espaços naturalmente ventilados, relacionando intervalos de temperatura operativa aceitável com temperatura exterior (entre 10-33.5°C nos últimos 7 dias senão não é aplicável). O limite de 80% de aceitabilidade foi considerado neste estudo. O índice PMV determina o valor médio de votos num grupo de ocupantes através de uma escala de sensação térmica em espaços com sistemas de ar-condicionado, considerando que o equilíbrio térmico é alcançado quando a produção interna de calor do ocupante é igual à perda de calor para o ambiente. O intervalo -0.7≤PMV≤0.7, correspondente à categoria III do EN 16798 (BS EN 16798, 2019) foi adotado neste estudo. O conforto visual foi avaliado através da percentagem de horas laborais anuais com níveis de conforto e desconforto de iluminância, de acordo com o índice UDI, e com níveis de conforto e desconforto de encadeamento, de acordo com o índice DGI. O índice UDI (Mardaljevic et al., 2012; Mardaljevic & Nabil, 2005) expressa a percentagem de horas laborais com valores de iluminância horizontal no plano de trabalho dentro do intervalo 0.1-3.0klx, considerados como iluminância útil. Valores inferiores a 0.1klx são considerados insuficientes e valores superiores a 3.0klx são considerados como excessivos, estando normalmente associados a problemas de encadeamento. O índice DGI (Hopkinson, 1972) expressa valores de encadeamento causados por iluminação natural segundo os seguintes intervalos/categorias: DGI ≤ 16 – impercetível; 16 < DGI < 20 – percetível; 20 ≤ DGI < 24 – aceitável; 24 ≤ DGI < 28 – desconfortável; DGI ≥ 28 – intolerável.

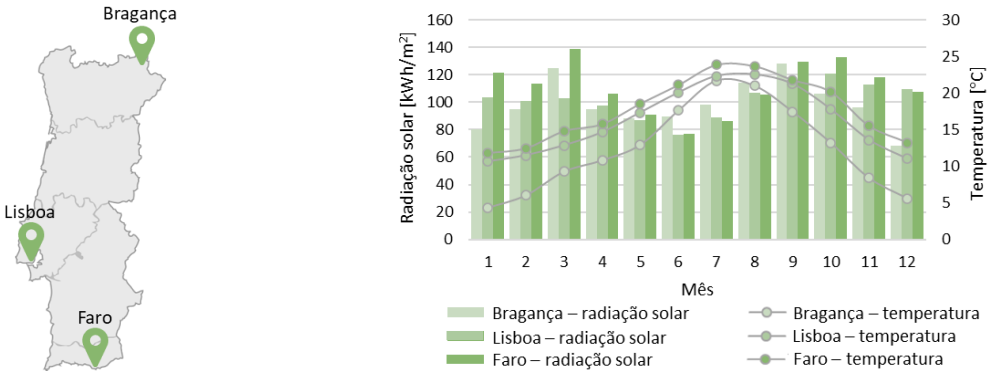
As principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados são apresentadas no Quadro 1. Como esperado, o envidraçado electrocrómico apresenta valores inferiores em todas as propriedades, comparativamente ao envidraçado incolor. O fator solar é significativamente reduzido com o escurecimento do envidraçado electrocrómico. O mesmo pode ser observado para as transmitâncias solar e visível que atingem valores significativamente baixos. O envidraçado electrocrómico reduz quase totalmente a transmissão de radiação ultravioleta pelo envidraçado, o que pode ter efeitos positivos na saúde do ocupante e na durabilidade dos materiais no interior do escritório. Foram atribuídos dois tipos de controlo distintos ao envidraçado electrocrómico: nível de encadeamento na secretária (controlo I) e nível de temperatura do ar interior (controlo II). Com o controlo I, o envidraçado aumenta o seu nível de escurecimento quando o índice DGI é superior a 22 durante o horário laboral, diminui o nível de escurecimento quando o índice DGI é inferior a 22 durante o horário laboral, mantém o nível transparente fora do horário laboral. Com o controlo II, o envidraçado aumenta o seu nível de escurecimento quando a temperatura interior é superior a 24°C durante o horário laboral, mantém o nível de escurecimento quando a temperatura interior está entre 20-24°C durante o horário laboral, diminui o nível de escurecimento quando a temperatura é inferior a 20°C durante o horário laboral, e é mantido no estado transparente fora do horário laboral.

Os estores venezianos não foram incluídos no modelo de simulação para se isolar o impacto dos envidraçados do impacto do sistema de sombreamento. A iluminação artificial foi considerada nas simulações do conforto térmico uma vez que contribui para os ganhos internos do escritório, tendo sido atribuído o controlo “continuous off” com o set-point de 500lx no centro da secretária. As simulações do conforto térmico com os intervalos de conforto da legislação portuguesa e do modelo adaptativo do ASHRAE 55 foram executadas em regime livre (sem ar-condicionado). O sistema de ar-condicionado foi assumido como estando em funcionamento durante as horas laborais (9h às 18h) com um intervalo de temperatura de conforto entre 20-24°C, nas simulações do conforto térmico com o índice PMV.

Quadro 1 – Principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados incolor e electrocrómico: coeficiente de transmissão térmica, U; fator solar, g; transmitância solar, τ_{sol}; transmitância visível, τ_{vis}; transmitância ultravioleta, τ_{UV}

Envidraçado	Estado	U [W/m²K]	g [-]	τ_{sol} [%]	τ_{vis} [%]	τ_{UV} [%]
Incolor		2.7	0.8	70	81	51
Electrocrómico		1.9				
	Transparente		0.5	38	66	3
	Intermédio 1		0.2	7	18	1
	Intermédio 2		0.1	4	11	1
	Intermédio 3		0.1	2	6	1
	Escurecido		0.1	0	1	0

De forma a se compreender melhor a influência do clima no desempenho dos envidraçados, consideraram-se os ficheiros climáticos (*EnergyPlus*, n.d.) de três cidades em Portugal, representativas de diferentes zonas climáticas: Bragança (zona I3 e V2), Lisboa (zona I1 e V2) e Faro (zona I1 e V3). A Figura 3 apresenta os valores de temperatura mensal média exterior e de radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a Sul das três cidades. Bragança apresenta os níveis de temperatura mais baixos, principalmente nos meses mais frios. Lisboa e Faro têm temperaturas semelhantes, com Lisboa a apresentar valores ligeiramente inferiores. Os níveis de radiação solar no verão são superiores na cidade de Bragança. No entanto, Faro apresenta os níveis de radiação solar mais elevados nos restantes meses, seguido por Lisboa.



a. b.

Figura 3 –a. Localização das cidades de Bragança, Lisboa e Faro em Portugal; b. Temperatura mensal média exterior, em °C, e radiação solar mensal acumulada (orientação Sul), em kWh/m², em cada cidade

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação do conforto térmico e visual, na presença de cada envidraçado nas três cidades, são apresentados e discutidos na presente secção.

O comportamento dinâmico do envidraçado electrocrómico depende dos níveis de encadeamento e temperatura no interior do escritório, ou seja, depende das condições climáticas da localidade e será diferente em cada cidade. A Figura 4 contém a percentagem de horas laborais com níveis específicos de escurecimento do envidraçado electrocrómico nas três cidades. O comportamento dinâmico com

o controlo I é praticamente igual nas três cidades, com o envidraçado no estado transparente durante a quase totalidade (97-99%) das horas laborais. Tendo em conta que foram realizadas simulações com e sem a operação do ar-condicionado, e que este influencia o comportamento dinâmico do envidraçado electrocrómico controlado através do nível de temperatura do ar interior (controlo II), ambos os cenários (HVAC desligado/ligado) são ilustrados para este controlo. A operação do ar-condicionado reduz ligeiramente as horas laborais com o envidraçado escurecido. Dado apresentar níveis de temperatura e radiação inferiores, a cidade de Bragança apresenta as percentagens de horas laborais com o envidraçado transparente mais elevadas (34% sem HVAC e 36% com HVAC). Em contrapartida, as menores percentagens (3% sem HVAC e 5% com HVAC) de horas laborais com o envidraçado incolor são obtidas em Faro.

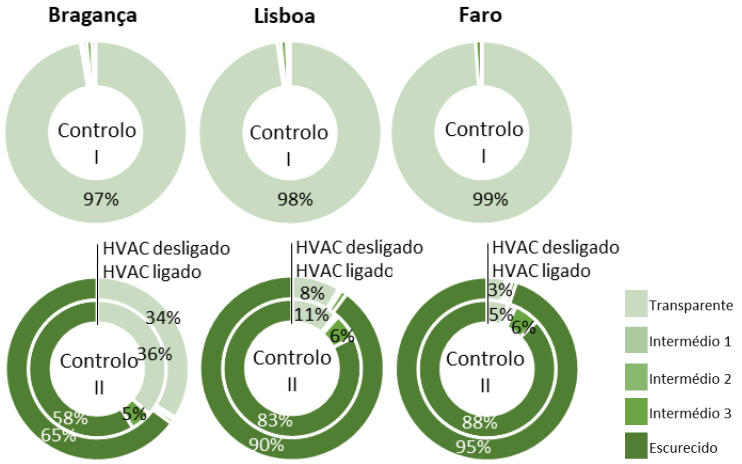


Figura 4 – Percentagem de horas laborais com níveis específicos de escurecimento do envidraçado electrocrómico com o controlo I (encadeamento) e o controlo II (temperatura do ar interior) em cada cidade

3.1 CONFORTO TÉRMICO

Os resultados do conforto térmico nas três cidades na presença de cada envidraçado encontram-se na Figura 5.

Os resultados do conforto térmico analisado através dos intervalos de conforto da legislação portuguesa encontram-se na Figura 5a. Todas as cidades apresentam percentagens elevadas de horas laborais com níveis excessivos de temperatura na presença de cada envidraçado, particularmente Faro e Lisboa, que têm temperaturas exteriores mais altas e níveis de radiação mais elevados ao longo do ano. Nas três cidades, o envidraçado incolor está associado às menores percentagens de horas laborais com conforto térmico, particularmente em Faro (0%) e Lisboa (1%). O envidraçado electrocrómico promoveu condições de conforto térmico, na presença de ambos os controlos, mas aumentou a ocorrência de níveis de temperatura baixos. O controlo II apresentou um melhor desempenho, aumentando a percentagem de horas laborais com conforto térmico até 23% (Bragança), 24% (Lisboa) e 15% (Faro). A maior diferença de percentagens de horas laborais com conforto, entre o envidraçado incolor e o envidraçado electrocrómico com o controlo II, foi obtida em Lisboa (+23%).

A Figura 5b apresenta os resultados do conforto térmico analisado através do modelo adaptativo do ASHRAE 55. Considerando este standard, a ocorrência de temperaturas baixas é insignificante. Nas três cidades, a presença do envidraçado incolor resultou na quase totalidade (99-100%) de horas laborais com níveis de temperatura excessivos. O melhor desempenho foi novamente obtido com o envidraçado electrocrómico com o controlo II, que permitiu atingir 17% (Bragança), 30% (Lisboa) e 23%

(Faro) de horas laborais com conforto térmico. A maior discrepância entre o desempenho do envidraçado incolor e do envidraçado electrocrómico foi observado na cidade de Lisboa, onde foi obtido um aumento de 29% de horas laborais com conforto com o controlo II.

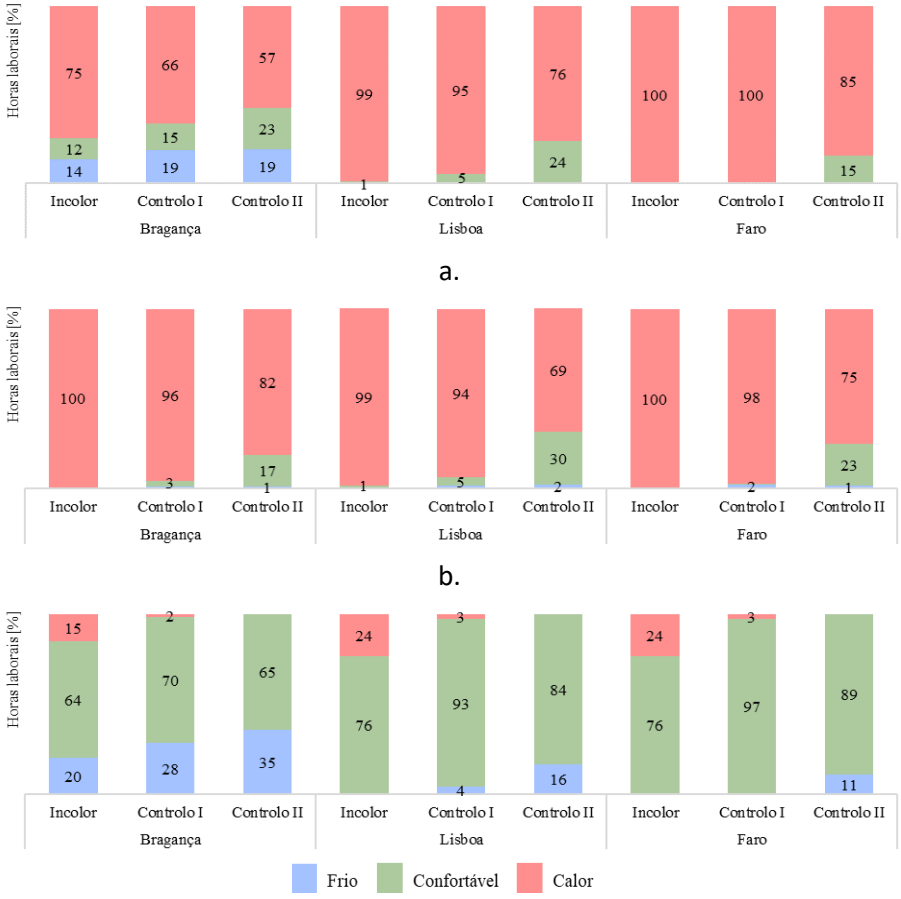


Figura 5 – Percentagem de horas laborais anuais com condições de conforto e desconforto de acordo com a legislação portuguesa (a.), o modelo adaptativo do ASHRAE 55 (b.) e o índice PMV

Os resultados obtidos para a análise do conforto térmico utilizando o índice PMV encontram-se na Figura 5c. Considerando este índice, a distribuição de percentagens de horas laborais entre os vários intervalos (conforto e desconforto) é significativamente diferente da obtida pelas métricas anteriores, com os vários envidraçados a apresentarem percentagens significativas de horas laborais com conforto térmico nas três cidades. Esta discrepância entre resultados deve-se à operação do sistema de ar-condicionado quando se considera o índice PMV, aumentando assim significativamente a ocorrência de níveis de temperatura confortáveis. A percentagem de horas laborais com níveis excessivos de temperatura é superior com o envidraçado incolor. Em contrapartida, a ocorrência de horas laborais com temperaturas baixas é maior com o envidraçado electrocrómico, particularmente com o controlo II. Foram obtidas horas laborais com conforto térmico em maior percentagem com o envidraçado electrocrómico com o controlo I (Bragança – 70%, Lisboa – 93%, Faro – 97%), seguido pelo mesmo envidraçado com controlo II (Bragança – 65%, Lisboa – 84%, Faro – 89%). A maior discrepância entre percentagens de horais laborais com conforto foi obtida para Faro com o envidraçado electrocrómico com o controlo I, que permitiu um aumento de 21%, comparativamente ao envidraçado incolor.

3.2 CONFORTO VISUAL

Os resultados de conforto visual nas três cidades na presença de cada envidraçado encontram-se na Figura 6.

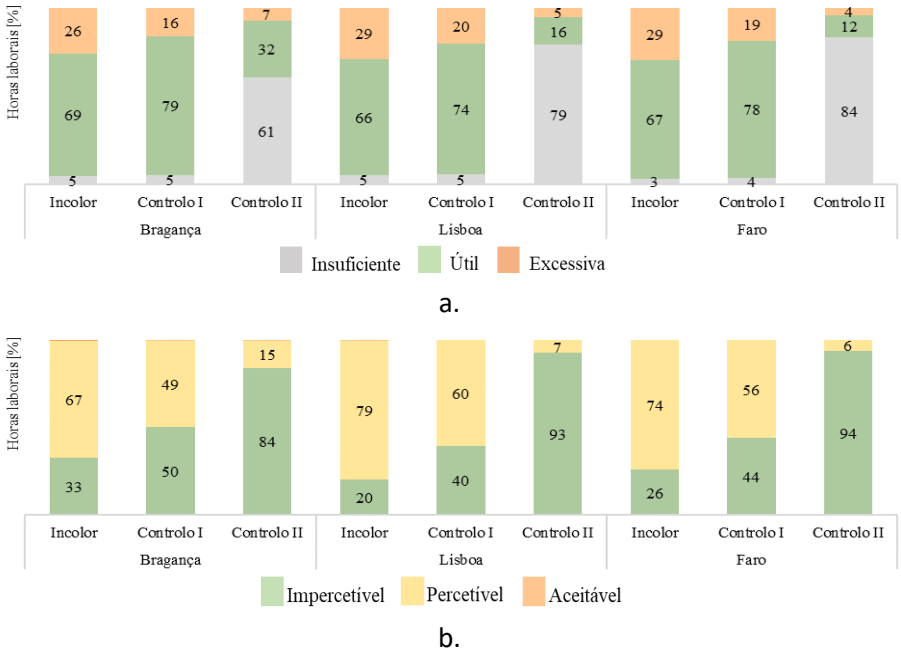


Figura 6 – Percentagem de horas laborais anuais com níveis específicos de iluminância de acordo com o índice UDI (a.) e com níveis específicos de encadeamento de acordo com o índice DGI (b.)

A Figura 6a apresenta os resultados das condições de conforto visual analisadas através da percentagem de horas laborais anuais com iluminância insuficiente, útil e excessiva, de acordo com o índice UDI. O envidraçado incolor fornece níveis de iluminância úteis durante grande parte do horário laboral (66-69%) nas três cidades. O comportamento dinâmico do envidraçado electrocrómico com o controlo I possibilitou aumentar a ocorrência de níveis de iluminância útil, atingindo 79%, 74% e 78% nas cidades de Bragança, Lisboa e Faro, respetivamente. O facto do envidraçado electrocrómico com o controlo II se encontrar mais tempo nos estados escurecidos do que com o controlo I resultou numa diminuição significativa da percentagem de horas laborais com iluminância útil (12-36%) e aumento da percentagem de horas laborais com iluminância insuficiente (61-84%). Este aumento da ocorrência de níveis de iluminância insuficiente é mais significativo em Bragança. O aumento mais significativo de horas laborais com iluminância útil foi obtido com o envidraçado electrocrómico com o controlo I (78%), comparativamente ao envidraçado incolor (67%), em Faro.

A percentagem de horas laborais anuais com níveis de encadeamento impercetível, percetível e aceitável, de acordo com o índice DGI, encontram-se na Figura 6b. A percentagem de horas laborais com níveis aceitáveis de encadeamento, nas três cidades, é desprezável. Não foram obtidos níveis desconfortáveis nem intoleráveis na presença de qualquer envidraçado. O envidraçado incolor está associado a percentagens elevadas (67-79%) de encadeamento percetível em todas as cidades. O envidraçado electrocrómico possibilitou a redução da ocorrência de encadeamento percetível em toda as cidades, particularmente com o controlo II (6-15%). Esta redução foi menos significativa com o controlo I porque o envidraçado electrocrómico encontra-se no estado transparente durante mais tempo. Os níveis de encadeamento obtidos na cidade de Bragança são mais baixos do que os obtidos em Lisboa e Faro, exceto quando se considera o envidraçado electrocrómico com o controlo II, que possibilitou uma redução mais significativa nas cidades de Faro e Lisboa.

4 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser retiradas acerca do impacto do envidraçado electrocrómico (controlo I – encadeamento, controlo II – temperatura do ar interior) no conforto térmico e visual do escritório do caso de estudo em diferentes zonas climáticas de Portugal:

- Os níveis de temperatura excessiva foram reduzidos na presença do envidraçado electrocrómico em todas as cidades, mas a ocorrência de temperaturas baixas aumentou (entre 5% e 15%) em Bragança. O controlo II foi mais eficaz a promover condições de conforto térmico considerando um regime livre, atingindo percentagens de horas laborais com conforto de 30% na cidade de Lisboa e de 23% nas cidades de Bragança e Porto. Em contrapartida, o controlo I apresentou um melhor desempenho na presença do ar-condicionado, possibilitando alcançar 97%, 93% e 70% de horas laborais com conforto térmico em Faro, Lisboa e Bragança, respetivamente.
- Foi obtida uma maior eficiência com o controlo I na gestão da transmissão de radiação visível através do envidraçado, originando um aumento entre 8% e 11% das horas laborais com níveis de iluminância útil nas três cidades. No entanto, a redução de encadeamento foi mais eficaz com o controlo II, fornecendo níveis de encadeamento impercetível durante 84-94% das horas laborais, nas três cidades.

Apesar do envidraçado electrocrómico ter promovido condições de conforto, comparativamente ao envidraçado incolor, é importante ter em conta outros fatores na instalação deste envidraçado inteligente, tais como a componente económica, dado o preço médio de envidraçados electrocrómicos (613€/m^2 sem caixilho (Aburas et al., 2019)) ser significativamente superior ao de envidraçados estáticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento da bolsa de doutoramento da primeira autora PD/BD/150576/2020 (DOI: 10.5449/PD/BD/150576/2020) e pelo financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020). Os autores estendem o seu agradecimento à empresa IMPERSOL e à European Window Film Association pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Wu, Y. (2019). Thermochromic smart window technologies for building application: A review. *Applied Energy*, *255*, 113522. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522

Ajaji, Y., & André, P. (2015). Thermal comfort and visual comfort in an office building equipped with smart electrochromic glazing: An experimental study. *Energy Procedia*, *78*. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.230

ANSI/ASHRAE. (2002). ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings. *Ashrae*.

ASHRAE. (2017). *ASHRAE Standard 55-2017: Thremal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Am. Soc Heating Refrig. Air-Conditioning Eng.

Ashrafian, T., & Moazzen, N. (2019). The impact of glazing ratio and window configuration on occupants' comfort and energy demand: The case study of a school building in Eskisehir, Turkey. *Sustainable Cities and Society*, *47*(January), 101483. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101483

BS EN 16798. (2019). *BS EN 16798 - Energy performance of buildings. Ventilation for buildings*.

Cannavale, A., Martellotta, F., Cossari, P., Gigli, G., & Ayr, U. (2018). Energy savings due to building integration of innovative solid-state electrochromic devices. *Applied Energy*, *225*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.034

Casini, M. (2018). Active dynamic windows for buildings: A review. In *Renewable Energy* (Vol. 119). https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049

Curcija, C., Vidanovic, S., Hart, R., Jonsson, J., & Mitchell, R. (2018). *WINDOW Technical Documentation* (Wind. Envel. Mater. Group, Ed.). Lawrence Berkeley Natl. Lab.

DeForest, N., Shehabi, A., Selkowitz, S., & Milliron, D. J. (2017). A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. *Applied Energy*, *192*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.007

Dussault, J. M., & Gosselin, L. (2017). Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. *Energy and Buildings*, *153*, 50–62. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.046

EnergyPlus. (n.d.). Retrieved April 23, 2020, from https://energyplus.net/

European Commission. (2003). *Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_03_1278

Fathi, S., & Kavoosi, A. (2021). Effect of electrochromic windows on energy consumption of high-rise office buildings in different climate regions of Iran. *Solar Energy*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.021

Gomes, M. G., Santos, A. J., & Rodrigues, A. M. (2014). Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study. *Building and Environment*, *71*, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.003

Hopkinson, R. G. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, *3*(4). https://doi.org/10.1016/0003-6870(72)90102-0

Jain, S., Karmann, C., & Wienold, J. (2022). Behind electrochromic glazing: Assessing user's perception of glare from the sun in a controlled environment. *Energy and Buildings*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111738

Jaysawal, R. K., Chakraborty, S., Elangovan, D., & Padmanaban, S. (2022). Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 11). https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100582

Karlsen, L., Heiselberg, P., Bryn, I., & Johra, H. (2016). Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. *Energy and Buildings*, *118*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.014

Li, J., Ban, Q., Chen, X., & Yao, J. (2019). Glazing sizing in large atrium buildings: A perspective of balancing daylight quantity and visual comfort. *Energies*, *12*(4), 13–15. https://doi.org/10.3390/en12040701

Li, Y., Shah, K. W., Li, W., & Xiong, T. (2023). Experimental investigation on indoor thermal environment improvement and energy-saving of electrochromic window under Singapore's tropical climate. *Journal of Building Engineering*, *73*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106779

Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., & Christoffersen, J. (2012). DAYLIGHTING METRICS: IS THERE A RELATION BETWEEN USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE AND DAYLIGHT GLARE PROBABILITY? *First Building Simulation and Optimization Conference*, 189–196.

Mardaljevic, J., & Nabil, A. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, *37*, 41–59. https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa

OpenStudio. (n.d.). Retrieved March 16, 2023, from https://openstudio.net/

Optics | Windows and Daylighting. (n.d.). Retrieved January 24, 2020, from https://windows.lbl.gov/software/optics

Order 6476-H/2021. (2021). *Diário Da República*, *126*.

Park, B. R., Hong, J., Choi, E. J., Choi, Y. J., Lee, C., & Moon, J. W. (2019). Improvement in energy performance of building envelope incorporating electrochromic windows (ECWs). *Energies*, *12*(6). https://doi.org/10.3390/en12061181

Pereira, J., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Almeida, M. (2019). Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows : Use of energy performance criteria to support decision making. *Energy and Buildings*, *198*, 431–443. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003

Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *159*, 26–51. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026

SketchUp. (n.d.). Retrieved March 31, 2022, from https://www.sketchup.com/

Teixeira, H., Glória Gomes, M. da, Moret Rodrigues, A., & Pereira, J. (2021). In-Service Thermal and Luminous Performance Monitoring of a Refurbished Building with Solar Control Films on the Glazing System. *Energies*, *14*(5), 1388. https://doi.org/doi.org/10.3390/en14051388

Teixeira, H., Glória Gomes, M., Moret Rodrigues, A., & Aelenei, D. (2022). Assessment of the visual, thermal and energy performance of static vs thermochromic double-glazing under different European climates. *Building and Environment*, *217*, 109115. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109115

Teixeira, H., Gomes, M. G., Moret Rodrigues, A., & Pereira, J. (2020). Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films. *Building and Environment*, *168*, 106474. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106474

Weather Data by Location | EnergyPlus. (n.d.). Retrieved January 28, 2021, from https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA EM PORTUGAL: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA O FUTURO

Maria João Falcão Silva[a]; António Cabaço[a]; Álvaro Vale Azevedo[a]

[a]LNEC, Av. Brasil 101, Portugal, (mjoaofalcao@lnec.pt, acabaco@lnec.pt, ava@lnec.pt)

RESUMO

Nas últimas décadas, a utilização da pré-fabricação na indústria da construção, a nível global, tem testemunhado avanços muito significativos. Portugal tem vindo a acompanhar esta tendência global ao longo das últimas décadas, adotando novos métodos e tecnologias inovadoras de construção industrializada. Não obstante os avanços muito significativos, nos anos mais recentes, para impulsionar a utilização da pré-fabricação na construção nacional, a adoção generalizada tem sido mais lenta do que em outros países, tanto na Europa como fora dela.

O artigo explora o estado atual da construção industrializada, referindo a experiência do LNEC. Também prevê a identificação de soluções inovadoras que priorizem a sustentabilidade e a economia circular, sendo apresentados os desafios dessas mesmas soluções. Uma estratégia de futuro para a área pode basear-se em investigação aplicada, colaborações interdisciplinares e desenvolvimento de regulamentação que incentive a implementação de construção industrializada, minimizando impactos ambientais e tornando o setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) mais sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Economia circular, Pré-fabricação, Construção industrializada, Estratégia, Investigação científica

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a utilização da pré-fabricação na indústria da construção, a nível global, tem testemunhado avanços muito significativos. A utilização da pré-fabricação está alinhada com as diretrizes recentes estabelecidas por entidades governamentais, refletindo uma crescente preocupação com eficiência, sustentabilidade, segurança e resiliência no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), bem como com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, designadamente ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 13 (Ação climática) e ODS 15 (Proteção da vida terrestre).

Desde a sua introdução, as técnicas de pré-fabricação têm sido cada vez mais adotadas devido à sua capacidade de reduzir prazos, minimizar desperdícios e melhorar a qualidade e precisão em obra. A pré-fabricação envolve a produção de componentes de construção em um ambiente controlado, que são posteriormente transportados e montados no local da obra. Esta abordagem tem revolucionado a maneira como os edifícios são construídos, permitindo maior eficiência e sustentabilidade (Ji et. al, 2018; Gao et. al, 2020).

Não obstante as vantagens evidentes, os custos iniciais podem ser mais elevados devido à necessidade de investimento em fábricas e tecnologia especializada. Estes investimentos incluem a construção de

instalações de produção, aquisição de máquinas avançadas e treino/formação de mão de obra especializada/qualificada (Blismas & Wakefield, 2009). Além disso, a logística de transporte e montagem dos componentes pré-fabricados pode representar desafios adicionais, como a necessidade de transporte especializado e a coordenação precisa das etapas de montagem no local da obra. Todos esses fatores influenciam o custo final da solução, tornando a pré-fabricação uma opção que requer uma análise cuidadosa de viabilidade econômica e planeamento estratégico para maximizar seus benefícios (Kamali & Hewage, 2016).

Tem-se observado um aumento substancial na adoção de técnicas de pré-fabricação, impulsionado por desenvolvimentos tecnológicos, mudanças na regulamentação da construção e a crescente consciencialização sobre a sustentabilidade ambiental. As novas tecnologias têm permitido uma maior eficiência e precisão na produção de componentes pré-fabricados (Mao et. al, 2015).

Paralelamente, a regulamentação da construção mais rigorosas está a exigir práticas mais sustentáveis e eficientes, tornando a pré-fabricação uma solução viável e muito atrativa (Arif & Egbu, 2010). A consciencialização crescente sobre a necessidade de construir de forma mais sustentável está a impulsionar essa tendência, destacando os benefícios da pré-fabricação em termos de redução de resíduos, menor impacto ambiental e maior rapidez na execução dos projetos. Assim, a pré-fabricação está a estabelecer-se como uma prática padrão na construção moderna (Mao et. al, 2013).

Tecnologias avançadas, como o Building Information Modeling (BIM) e a impressão 3D, têm sido fundamentais para este avanço, permitindo maior precisão e integração no processo construtivo. O BIM, por exemplo, facilita a visualização e coordenação detalhada de todos os componentes do edifício, reduzindo erros e retrabalhos. A impressão 3D permite a fabricação rápida e precisa de componentes complexos, personalizando as necessidades de cada projeto. Além disso, regulamentos mais rigorosos que exigem práticas de construção sustentável e a crescente demanda por edifícios ecologicamente responsáveis têm incentivado a adoção da pré-fabricação. Estes métodos destacam-se por sua eficiência, qualidade superior e capacidade de reduzir significativamente os impactos ambientais, como a diminuição de resíduos de construção e a melhoria da eficiência energética (Teicholz et. al, 2018).

Portugal tem vindo a acompanhar a tendência global de evolução na área da pré-fabricação ao longo das últimas décadas, adotando novos métodos e tecnologias inovadoras de construção industrializada no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). Não obstante tenha havido avanços muito significativos, nos anos mais recentes, para impulsionar a utilização da pré-fabricação na construção nacional, a adoção generalizada tem sido mais lenta do que em outros países, tanto na Europa como fora dela (Rocha et. al, 2023).

O LNEC tem desempenhado, desde sempre, um papel muito relevante ao nível da investigação científica na área da pré-fabricação em Portugal. Através de projetos de investigação e estudos por contrato, o laboratório tem vindo a explorar com grande dinamismo, novas técnicas, novos materiais e novos métodos construtivos na área da pré-fabricação, contribuindo para o desenvolvimento e validação de normas e regulamentação na área da construção industrializada.

Apesar dos avanços, foram identificadas algumas lacunas na construção pré-fabricada em Portugal, que conduziram inevitavelmente a uma quebra, e até a um certo abandono, na procura por estas soluções desde o início da década de 2000. Estas lacunas incluem a necessidade de padronização de processos, melhorias na formação de profissionais, desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e o aprimoramento de métodos de transporte e montagem (Ribeiro, 2021).

Para impulsionar a indústria da construção pré-fabricada em Portugal, é da maior importância implementar uma estratégia abrangente que inclua investimento em investigação e desenvolvimento de soluções inovadoras ao nível dos materiais e técnicas, parcerias entre instituições académicas, entidades governamentais e o setor privado, estabelecimento de padrões de qualidade e sustentabilidade, além da criação de incentivos fiscais para promover a adoção da pré-fabricação em diferentes tipos de edifícios (Rocha et. al, 2023).

O artigo aborda o estado da arte na área da construção industrializada a nível internacional e nacional, referindo a experiência do LNEC. Prevê-se ainda a identificação de algumas soluções industrializadas recentes e inovadoras, com enfoque nomeadamente em tecnologias digitais e impressão 3D, o que permite dar prioridade à sustentabilidade e à economia circular. São apresentados os benefícios, limitações e desafios dessas novas soluções, como a otimização de recursos, redução de prazos, e redução de resíduos. É proposta uma estratégia para os próximos 20 anos que promova a inovação e o desenvolvimento sustentável. A meta para Portugal deverá ser desenvolver e aplicar métodos ainda mais eficazes de construção, minimizando os impactos ambientais no planeta com vista a tornar o setor AECO mais sustentável e eficiente.

2 ENQUADRAMENTO

2.1 PRÉ-FABRICAÇÃO NO SETOR AECO

O conceito tradicional de pré-fabricação, embora inicialmente tenha procurado atender à procura crescente no setor habitacional, evidenciou uma grande preponderância na produção em massa em detrimento de considerações fundamentais, como sustentabilidade, qualidade e eficiência de custos. A primeira abordagem focava na rápida produção de componentes fora do local de construção, negligenciando a integração harmoniosa de sistemas e materiais (Tavares et. al, 2021). Essa falta de integração resultou em problemas de montagem, durabilidade e desempenho estrutural, contribuindo para o declínio da pré-fabricação no final do século XX. Como consequência, surgiu um dilema persistente entre a busca por eficiência de produção e a qualidade do projeto final. Este fracasso inicial deixou um legado de preconceitos contra a construção pré-fabricada, manchando a sua reputação e a sua aceitação mais generalizada no setor AECO, na generalidade, e na indústria da construção, em particular. A construção pré-fabricada carrega um legado de preconceitos ao longo dos anos. Motivadas pela ideia de baixa qualidade, muitas das soluções disponíveis no mercado não foram sempre bem recebidas pela população. Nesse sentido, tornou-se necessário criar meios de reconhecimento e apoio dos governos para proporcionar a evolução do conceito e o consequente desenvolvimento da indústria de pré-fabricação (Rocha et. al, 2023). Os sistemas pré-fabricados são amplamente utilizados em todo o mundo, com diferenças e particularidades adaptadas à cultura, técnicas e tecnologias de cada país. Essas diferenças levam a variações significativas na aplicação e adoção entre as nações, influenciadas por fatores ambientais, culturais e económicos. Países que adotam esses sistemas demonstram confiança na renovação, competência, produtividade e lucratividade do setor de construção, destacando a evolução contínua da pré-fabricação no Mundo (McKinsey Global Institute, 2017).

2.2 BENEFÍCIOS DO USO DA PRÉ-FABRICAÇÃO

Os sistemas construtivos pré-fabricados oferecem uma série de benefícios amplamente reconhecidos na literatura e na prática da construção, que têm transformado a indústria da construção civil. Entre eles, destacam-se: i) Redução dos prazos de construção; ii) minimização de desperdícios; iii) melhoria da qualidade; iv) segurança no trabalho; v) impacto ambiental; vi) consistência e fiabilidade; vii)

flexibilidade; viii) inovação tecnológica; ix) melhor relação custo-benefício. A pré-fabricação na construção oferece uma alternativa muito eficiente quando comparada com os métodos tradicionais, permitindo que diferentes etapas do processo sejam realizadas em paralelo, reduzindo significativamente o tempo de construção. As peças pré-fabricadas são produzidas em ambientes controlados, resultando num menor desperdício de materiais e prazos mais curtos. Estudos mais recentes indicam reduções de até 50% no tempo final de construção. A produção controlada em fábricas melhora a gestão de materiais, contribuindo para uma construção mais sustentável e económica, com até 90% menos resíduos gerados. Além disso, a qualidade e precisão das peças são garantidas, resultando numa menor necessidade de retrabalhos. A segurança é outra vantagem, já que a existência de menos quantidade de trabalhos intensivos no local diminuem os riscos de acidentes. Do ponto de vista ambiental, a pré-fabricação reduz o impacto energético, de recursos e emissões de carbono. Menos tráfego no transporte de materiais diminui a perturbação nas áreas circundantes. Os sistemas modulares promovem a reutilização e reciclagem de componentes, contribuindo para práticas mais sustentáveis. Os sistemas modulares permitem a reutilização e a reciclagem de componentes, promovendo práticas de construção mais sustentáveis. A flexibilidade do projeto permite adaptações rápidas, enquanto novas tecnologias como a impressão 3D e BIM encontram ambiente propício em fábricas com ambientes controladas. Apesar do custo inicial um pouco mais alto, a redução no tempo de construção e desperdícios resulta em economia geral. A menor necessidade de mão de obra especializada no local também contribui para uma melhor relação custo-benefício. A pré-fabricação, assim, não apenas agiliza o processo construtivo, mas promove a sustentabilidade e eficiência na indústria da construção (Blismas et. al, 2006; Chen, 2017; Kang, 2017; Duan, 2018; Jin et. al, 2018; Li et. al 2018; Qu et. al, 2019; Zhang et. al, 2019; Li, 2021)

2.3 LIMITAÇÕES DO USO DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A utilização e disseminação da pré-fabricação no setor AECO enfrentam diversas limitações, nomeadamente: i) Custos iniciais elevados; ii) problemas relacionados com logística e transporte; iii) normalização vs flexibilidade; iv) aceitação cultural e perceção pública; v) regulamentação e normas; vi) formação e capacitação; vii) adaptação às condições locais; viii) integração com sistemas tradicionais. A necessidade de investimentos na instalação de fábricas e a aquisição de tecnologia especializada representam investimentos iniciais muito significativos. A tecnologia especializada e equipamentos para produção de componentes pré-fabricados pode ser um obstáculo financeiro significativo. Além disso, a logística de movimentação, transporte e montagem dos componentes pré-fabricados requer uma logística complexa, eficiente e custosa, o que pode aumentar os custos e complicar a gestão do projeto influenciando o custo final da solução. A pré-fabricação geralmente requer um alto nível de normalização, o que pode limitar a flexibilidade do projeto e a personalização dos projetos arquitetónicos. Em algumas regiões e em algumas culturas, existe um preconceito claro contra construções pré-fabricadas, associando-as a baixa qualidade ou estética inferior, o que pode dificultar sua aceitação e adoção. A falta de regulamentações e normas claras e padronizadas para a construção pré-fabricada pode dificultar a implementação de tais sistemas de maneira eficiente e segura. A escassez de profissionais qualificados e especializados em técnicas de pré-fabricação pode limitar a expansão do setor, necessitando investimentos em treino, educação e capacitação. A adaptação de sistemas pré-fabricados às condições climáticas, geográficas e culturais locais pode ser desafiadora, exigindo modificações nos materiais e métodos utilizados. A integração de componentes pré-fabricados com métodos de construção tradicionais pode ser complexa, exigindo um planeamento cuidadoso e técnicas específicas para garantir a compatibilidade e a qualidade final do projeto (Blismas et. al, 2006; Chen, 2017; Kang, 2017; Duan, 2018; Jin et. al, 2018; Li et. al 2018; Qu et. al, 2019; Zhang et. al, 2019; Gao et. al, 2020; Li, 2021).

2.4 DESAFIOS AO USO DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A pré-fabricação na construção enfrenta vários desafios que limitam sua adoção ampla e eficiente, designadamente: i) economia de escala; ii) logística e transporte; iii) adaptação e flexibilização de projeto; iv) aceitação cultural e mudança de mentalidade; v) qualificação da mão-de-obra; vi) regulamentação e normas técnicas; vii) integração na cadeia de fornecimento; viii) perceção de valor; ix) projetos de grande escala. Em mercados pequenos, como Portugal, a implementação da pré-fabricação enfrenta desafios. A falta de economia de escala pode gerar baixa procura, levando à subutilização de fábricas. O transporte de peças pré-fabricadas enormes é complexo e dispendioso, especialmente em áreas urbanas densas. Questões logísticas, como o armazenamento e transporte dos componentes no local da obra, podem ser desafiantes. A pré-fabricação exige planeamento detalhado e antecipado, limitando alterações posteriores no projeto, que se tornam dispendiosas. Há resistência cultural e preferência por métodos tradicionais na construção, devido a perceções de qualidade inferior e estética limitada. A falta de formação adequada em técnicas de pré-fabricação pode resultar em erros e retrabalhos. Regulamentações e normas técnicas podem não estar atualizadas para métodos pré-fabricados inovadores, o que dificulta a obtenção de aprovações. A transição para a pré-fabricação requer mudanças na cadeia de fornecimento e integração entre os envolvidos, podendo enfrentar atrasos e problemas de qualidade. A perceção de valor por parte de clientes e investidores pode ser desafiadora se não compreenderem os benefícios a longo prazo em eficiência e durabilidade. O custo inicial elevado pode ser visto como um entrave, apesar das vantagens ao longo do ciclo de vida do edifício. A falta de grandes projetos pode limitar a adoção generalizada da pré-fabricação. Superar esses desafios requer políticas governamentais, inovação tecnológica, formação profissional e sensibilização para promover a adoção eficaz da pré-fabricação na indústria da construção. (Blismas et. al, 2006; Chen, 2017; Kang, 2017; Duan, 2018; Jin et. al, 2018; Li et. al 2018; Qu et. al, 2019; Zhang et. al, 2019; Gao et. al, 2020; Li, 2021).

3 SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, o setor da construção civil é um dos mais importantes para impulsionar a economia do país, sendo a construção de edifícios a parte mais significativa de todas as atividades ligadas a este setor. No entanto, ao contrário do que ocorre no resto da Europa, a pré-fabricação ainda não é generalizada como solução de construção mais utilizada em Portugal. A indústria da construção em Portugal permanece amplamente tradicional, com uma forte dependência de métodos de construção convencionais. Embora haja um reconhecimento crescente dos benefícios da pré-fabricação, a transição para esses métodos requer mudanças significativas na cadeia de fornecimento e na cultura da construção. A pré-fabricação influencia de forma muito significativa a mão de obra, na medida em que a transição para este método exige a requalificação dos trabalhadores atuais, levando-os a adquirir novas competências tecnológicas. Esse investimento em formação tende a conduzir a salários mais elevadas, refletindo as habilidades e competências aprimoradas. Ao mesmo tempo, a eficiência aumentada da pré-fabricação geralmente reduz os custos gerais de mão de obra, devido à diminuição de tempo e desperdício. É sem dúvida fundamental adotar uma abordagem holística, considerando os impactos económicos, sociais e ambientais, garantindo uma transição equilibrada e justa para todos os trabalhadores envolvidos. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem desempenhado desde sempre um papel extremamente relevante na investigação científica na área da pré-fabricação em Portugal, especialmente entre as décadas de 60 e 90. Durante esse período, o LNEC foi pioneiro no desenvolvimento de novas técnicas, materiais e métodos, contribuindo significativamente para a evolução do setor da construção em Portugal. Os seus esforços resultaram na introdução de práticas inovadoras que melhoraram a eficiência e a qualidade da construção, tornando a pré-fabricação uma

opção viável e atrativa para muitos projetos. Mais se adianta que, apesar dos avanços notáveis alcançados, observou-se uma quebra, e até a um certo abandono, na procura por estas soluções desde o início da década de 2000. Este declínio pode ser atribuído a vários fatores, incluindo mudanças nas políticas governamentais, a crise económica global que afetou gravemente o setor da construção, e a falta de investimento contínuo em investigação e desenvolvimento. A ausência de incentivos e de um ambiente propício ao crescimento também contribuiu para o desinteresse crescente pela pré-fabricação. Ainda assim, é possível encontrar elementos estruturais pré-fabricados em algumas infraestruturas como pontes, viadutos e vias de comunicação em Portugal. Esses exemplos, muitas vezes desenvolvidos e apoiados no know-how do LNEC, tem demonstram a capacidade e o potencial dos métodos pré-fabricados de fornecer soluções robustas e eficientes em termos de tempo e custo. Contudo, na construção de edifícios, a adoção desses métodos é menos prevalente. A construção de pequenas casas pré-fabricadas com diferentes tecnologias existe em Portugal, mas muitas dessas construções enfrentam desafios em termos de estética e qualidade. Apenas uma parcela reduzida consegue atingir um alto padrão estético e funcional, o que reflete a necessidade de maior desenvolvimento e inovação nesse segmento. Acresce ao referido que o mercado português é relativamente pequeno em comparação com outros países europeus, o que pode limitar a economia de escala necessária para justificar os investimentos iniciais elevados em pré-fabricação. A falta de grandes projetos que possam beneficiar significativamente dos métodos de construção industrializada também restringe a adoção desses métodos no país. Além disso, o estabelecimento de padrões de qualidade e sustentabilidade é fundamental para assegurar que as técnicas de pré-fabricação atendam aos requisitos modernos de construção e ambientais. Padrões claros e rigorosos podem aumentar a confiança dos consumidores e investidores na viabilidade e nos benefícios da pré-fabricação, incentivando uma maior adoção dessas técnicas. Investimentos em investigação e desenvolvimento tecnológico, e campanhas de sensibilização podem ajudar a acelerar a transição para métodos de construção mais modernos e eficientes com recurso a pré-fabricação. Outro fator da maior relevância para a revitalização do setor é a criação de incentivos fiscais. Tais incentivos podem incluir reduções de impostos, subsídios ou outros benefícios financeiros para as empresas que optem por utilizar métodos de pré-fabricação nos seus projetos. Estes incentivos podem tornar a pré-fabricação uma opção mais atrativa economicamente, estimulando um aumento na demanda e, consequentemente, na inovação e no desenvolvimento contínuo do setor. Face ao exposto, Portugal poderia alinhar-se com as tendências europeias e globais, melhorando a competitividade e a sustentabilidade do setor da construção (Elliott, 2000; Colombo et. al, 2008; Batalha et. al, 2019; Rodrigues et. al, 2020a; Rodrigues et. al, 2020b; Batalha et. al, 2022; Rocha et. al, 2023).

4 PROPOSTA DE ESTRATÉGIA PARA PORTUGAL

Desenvolver uma estratégia de implementação generalizada de soluções pré-fabricadas em empreendimentos de construção em Portugal para os próximos anos requer uma abordagem holística e abrangente, é essencial estabelecer metas clara, objetivas e concretizáveis, assim como fomentar incentivos financeiros e promover a elaboração e publicação regulamentações específicas. Neste sentido pode-se pensar nas seguintes ações estruturadas e interrelacionadas sempre de forma colaborativa:

1. Definição de metas e objetivos claros alcançáveis: Estabelecer metas ambiciosas para aumentar gradualmente a proporção de edifícios construídos com métodos pré-fabricados ao longo dos próximos anos. Por exemplo, iniciar com uma meta modesta nos primeiros dois anos, seguida por incrementos anuais até alcançar uma adoção generalizada, por exemplo em 20 anos (até 2045);

2. Incentivos financeiros e benefícios fiscais: Implementar incentivos financeiros para promover a adoção de soluções pré-fabricadas, como créditos fiscais para construtoras que utilizem métodos pré-fabricados em seus projetos. Esses incentivos podem incluir redução de impostos sobre o valor acrescentado (IVA) ou benefícios fiscais para empresas que invistam em tecnologias de pré-fabricação;
3. Regulamentação e normas específicas: Desenvolver regulamentação e normas específicas para garantir a qualidade, segurança e sustentabilidade dos edifícios pré-fabricados. Isso pode incluir a criação de um código nacional de construção que aborde os requisitos técnicos e de desempenho para edifícios pré-fabricados em diferentes setores, como habitação, saúde e educação;
4. Programas de capacitação e treino: Investir em programas de capacitação e treino e capacitação para profissionais da construção civil, engenheiros e arquitetos sobre técnicas de pré-fabricação. Isso pode ser feito por meio de parcerias com instituições de ensino superior e centros de formação profissional para oferecer cursos especializados em pré-fabricação;
5. Demonstração de casos de sucesso: Realizar projetos piloto e demonstrações de casos de sucesso de edifícios pré-fabricados em diferentes setores, destacando os benefícios em termos de tempo, custo e qualidade. Essas demonstrações podem ajudar a dissipar quaisquer preocupações ou resistências em relação à adoção de métodos pré-fabricados;
6. Parcerias Público-Privadas: Estabelecer parcerias público-privadas para promover a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais de pré-fabricação. Isso pode incluir investimentos conjuntos em laboratórios de inovação e centros de pesquisa dedicados à pré-fabricação;
7. Monitorização e avaliação Contínuos: Implementar um sistema de monitoramento e avaliação contínuos para acompanhar o progresso na implementação da estratégia ao longo do tempo. Isso pode incluir indicadores-chave de desempenho, como a proporção de edifícios construídos com métodos pré-fabricados e o impacto econômico e ambiental da adoção generalizada de soluções pré-fabricadas.

A estratégia proposta poderá ser também dividida por setores de atividade para facilitar a sua implementação e operacionalização, com enfoque em determinados tipos de edifícios e infraestruturas de apoio:

1. Edifícios Habitacionais:
    a. Implementar políticas de incentivo fiscal e financeiro para promover cada vez mais a adoção de soluções pré-fabricadas em projetos habitacionais sejam particulares ou públicos (por exemplo residências de estudantes);
    b. Desenvolver programas de formação e capacitação para profissionais da construção civil sobre técnicas de pré-fabricação;
    c. Estabelecer parcerias com construtoras e promotores imobiliários para a construção de habitações pré-fabricadas em larga escala.
2. Edifícios Escolares:
    a. Promover concursos públicos para o desenvolvimento de projetos de escolas pré-fabricadas, com enfoque na sustentabilidade e eficiência energética;
    b. Estabelecer diretrizes técnicas e regulamentos específicos para a construção de escolas pré-fabricadas, garantindo segurança e conforto dos alunos e professores;
    c. Investir em investigação e desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para a construção de escolas pré-fabricadas mais eficientes e sustentáveis.

3. Edifícios Comerciais:
    a. Incentivar a adoção de soluções pré-fabricadas em projetos de edifícios comerciais por meio de benefícios fiscais e subsídios;
    b. Criar programas de certificação para edifícios comerciais pré-fabricados, garantindo padrões de qualidade e sustentabilidade;
    c. Estabelecer parcerias público-privadas para o desenvolvimento de projetos comerciais pré-fabricados inovadores e da mais alta qualidade.
4. Edifícios Hospitalares:
    a. Priorizar a construção de hospitais pré-fabricados em áreas de necessidade urgente, como regiões remotas ou com carência de infraestrutura de saúde;
    b. Desenvolver normas e regulamentos específicos para a construção de hospitais pré-fabricados, considerando os requisitos técnicos e de segurança necessários para instalações de saúde;
    c. Investir em investigação e desenvolvimento tecnológico de sistemas de pré-fabricação adaptados às necessidades específicas de hospitais, como instalações para tratamento intensivo e áreas cirúrgicas.
5. Edifícios Judiciais:
    a. Promover a adoção de soluções pré-fabricadas em projetos de tribunais e estabelecimentos prisionais por meio de parcerias com o setor público e privado;
    b. Desenvolver diretrizes técnicas e regulamentos específicos para a construção de edifícios judiciais pré-fabricados, garantindo segurança e funcionalidade;
    c. Realizar estudos de viabilidade para identificar áreas prioritárias para a construção de tribunais e prisões pré-fabricadas, considerando a procura e as infraestruturas existentes (oferta).
6. Segurança:
    a. Priorizar a construção e/ou reabilitação de edifícios com função de segurança, como esquadras de polícia e quartéis de bombeiros, utilizando soluções pré-fabricadas para agilizar o processo de construção;
    b. Desenvolver normas e regulamentos específicos para a construção de edifícios de segurança pré-fabricados, garantindo robustez e resistência a condições adversas;
    c. Estabelecer parcerias com agências governamentais e entidades de segurança para identificar necessidades específicas e requisitos para edifícios pré-fabricados.
7. Infraestruturas de Apoio:
    a. Integrar soluções pré-fabricadas na construção e/ou reabilitação de infraestruturas estruturantes, como redes viárias, aeroportos, portos e redes de distribuição e drenagem de águas, para reduzir o tempo de construção e minimizar impactos ambientais:
    b. Desenvolver políticas de planeamento urbano que incentivem a utilização de materiais pré-fabricados em grandes projetos de infraestrutura;
    c. Investir em investigação e desenvolvimento de tecnologias de pré-fabricação para infraestruturas de apoio, visando aumentar a durabilidade e eficiência dessas estruturas.

A estratégia proposta requer uma abordagem colaborativa entre o setor público e privado, bem como investimentos significativos em investigação, desenvolvimento e infraestruturas. O compromisso de longo prazo com a implementação dessas medidas é essencial para alcançar uma adoção generalizada de soluções pré-fabricadas em Portugal ao longo dos próximos 20 anos.

5 CONCLUSÕES

A pré-fabricação na construção enfrenta desafios significativos que impedem sua adoção ampla e eficiente. Essas barreiras vão desde a economia de escala até a logística, a adaptação dos projetos, a aceitação cultural, a qualificação da mão-de-obra, a regulamentação e a perceção de valor. Em Portugal, estas dificuldades são exacerbadas pelo mercado limitado, a cultura de construção tradicional e a fragmentação da cadeia de fornecimento. A superação desses desafios exige um esforço conjunto entre governo, indústria e academia, com foco em políticas públicas, inovação tecnológica, capacitação profissional, e conscientização sobre os benefícios da pré-fabricação. Em Portugal, a construção civil é essencial para o desenvolvimento da economia, no entanto a pré-fabricação ainda é subutilizada.

A adoção da pré-fabricação na indústria da construção tem impactos muito significativos ao nível da mão de obra e dos salários dos trabalhadores. A utilização generalizada para este método implica necessariamente a requalificação dos trabalhadores existentes, levando a investimentos em treino, formação e capacitação para que sejam adquiridas novas competências tecnológicas. Esta requalificação tem o potencial de elevar os salários dos trabalhadores, refletindo o valor das competências melhoradas. Por outro lado, a eficiência proporcionada pela pré-fabricação tende a resultar em menores custos de mão de obra, devido à redução do tempo e dos desperdícios envolvidos durante o processo construtivo.

O LNEC tem uma história de inovação neste campo, mas a falta de continuidade em investimento e a falta de apoio governamental consistente ao longo dos anos tem dificultado a sua consolidação no setor AECO. Embora existam exemplos de infraestruturas que utilizam elementos pré-fabricados, a sua aplicação em edifícios é ainda bastante limitada. O mercado restrito e a falta de grandes projetos limitam a evolução do setor. Para aumentar a adoção da pré-fabricação, afigura-se como sendo da maior relevância estabelecer padrões de qualidade claros e incentivar práticas cada vez mais sustentáveis.

O LNEC tem vindo a desempenhar um papel muito relevante no desenvolvimento da pré-fabricação em Portugal, mas para recuperar o impulso e assegurar um futuro promissor para este setor, é necessário um esforço coordenado e uma estratégia ambiciosa entre governo, indústria e academia para promover a pré-fabricação como uma alternativa viável e vantajosa. Para promover a pré-fabricação em Portugal, uma estratégia abrangente que inclua metas claras, incentivos financeiros, regulamentação específica, programas de capacitação, demonstrações de casos de sucesso e parcerias público-privadas é essencial. Além disso, é vital acompanhar e avaliar continuamente o progresso desta implementação.

A estratégia pode ser dividida por setores específicos (habitacional, escolar, comercial, hospitalar, judicial, segurança e infraestruturas de apoio) para facilitar a aplicação e operacionalização das ações propostas. A implementação de uma estratégia que contempla as recomendações apresentadas pode acelerar a transição para métodos de construção mais eficientes e modernos em Portugal. O compromisso contínuo de governo, indústria e academia é fundamental para alcançar uma adoção ampla e bem-sucedida da pré-fabricação, alinhando-se assim com as tendências europeias e globais e melhorando a competitividade e sustentabilidade do setor da construção em Portugal.

Naturalmente, é essencial considerar uma abordagem holística ao lidar com a generalização da pré-fabricação tanto ao nível de construções novas como ao nível da reabilitação. Além dos aspetos económicos, é importante observar os impactos sociais e ambientais deste processo. Garantir uma transição equilibrada, para a utilização de pré-fabricação, e justa, para todos os trabalhadores envolvidos, requer políticas e práticas que minimizem eventuais efeitos negativos, como desigualdades salariais ou exclusão de trabalhadores menos capacitados. Portanto, a análise dos impactos da pré-fabricação na mão de obra e nos salários deve ser realizada levando em conta a complexidade desse cenário, buscando promover melhorias tanto para os trabalhadores quanto para a indústria como um todo.

REFERÊNCIAS

Arif, M., & Egbu, C. (2010). Making a case for offsite construction in China. Engineering, Construction and Architectural Management, 17(6), 536-548. https://doi.org/10.1108/09699981011090170.

Batalha, N., Rodrigues, H., Varum, H. (2019) Seismic performance of RC precast industrial buildings—learning with the past earthquakes. Innov. Infrastruct. Solut. 4, 4. https://doi.org/10.1007/s41062-018-0191-y.

Batalha, N., Rodrigues, H., Sousa, R., Varum,H. (2022). Seismic assessment of existing precast RC industrial buildings in Portugal, Structures, Volume 41, Pages 777-786, ISSN 2352-0124, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.040.

Blismas, N., Pasquire, C., Gibb, A. (2006). Benefit evaluation for off-site production in construction, Construction Management and Economics, 24 (2)

Blismas, N., & Wakefield, R. (2009). Drivers, constraints and the future of offsite manufacture in Australia. Construction Innovation, 9(1), 72-83. https://doi.org/10.1108/14714170910931552.

Chen, H. (2017). Research on comprehensive benefit analysis method of prefabricated building, Create Living (01), pp. 164-165.

Colombo, A., Negro, P., Zhao, B., Lu, X. (2008). Recent collaborative research activities between Europe and China on the seismic behaviour of precast structures. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China.

Duan, C. (2018). Comparison of economic and social benefits between prefabricated buildings and traditional construction buildings, Low Carbon World (07), pp. 340-341.

Elliott, K. (2000). Research and development in precast concrete framed structures. Progress in structural engineering and materials, 2(4), 405-428.

Gao, S., Low, S. P., & Song, Y. (2020). Integrating pre-fabrication and built environment sustainability: A review of industry practices, implementation barriers and policy interventions. Journal of Cleaner Production, 262, 121278. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121278.

Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018, Journal of Cleaner Production, p. 202.

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1171-1183. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031.

Kang, T. (2017). Analysis model of comprehensive benefit in industrialized building with perspective of economy, Engineering Economy, 27 (02), pp. 47-52.

Li, C. (2021). Analysis of benefit sharing mechanism of prefabricated building industry chain. Engineering Economy, 31 (09), pp. 47-49.

Li, C., Zhang, J., Gao, H. (2018). Analysis of social and economic benefits of industrial buildings Construction Enterprise Management (02), pp. 82-83.

Mao, C., Shen, Q., Pan, W., & Ye, K. (2013). Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. Energy and Buildings, 66, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033.

Mao, C., Shen, Q., Pan, W., & Ye, K. (2015). Major Barriers to Off-Site Construction: The Developer's Perspective in China. Journal of Management in Engineering, 31(3), 04014043. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000246.

McKinsey Global Institute. (2017) Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. In Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity; McKinsey & Company: Brussels, Belgium.

Qu, F., Cheng, X., Li, R. (2019). Comprehensive benefit analysis of prefabricated building Housing and Real Estate (18), p. 12.

Ribeiro, A. (2021). Barriers to the Adoption of Modular Construction in Portugal: An Interpretive Structural Modelling Approach. MSc Thesis, IST, Universidade de Lisboa.

Rocha P, Ferreira N, Pimenta F, Pereira N. (2023). Impacts of Prefabrication in the Building Construction Industry. Encyclopedia. 3(1):28-45. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010003.

Rodrigues, H., Sousa, R., Vitorino, H., Batalha, N., Varum, H., & Fernandes, P. (2020a). Characterisation of Portuguese RC precast industrial building stock. Advances in Civil Engineering, 1-19.

Rodrigues, H., Sousa, R., Vitorino, H., Batalha, N., Varum, H., & Fernandes, P. (2020b). Research Article Characterisation of Portuguese RC Precast Industrial Building Stock.

Sun, Y., Yu, Z., Sheng, H. (2019). Social benefit analysis of prefabricated building structure Modern Property Management (01), pp. 22-23

Tavares, V., Soares, N., Raposo, N., Marques, P., Freire, F (2021) Prefabricated versus conventional construction: Comparing life-cycle impacts of alternative structural materials, Journal of Building Engineering, Volume 41, 102705, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102705.

Teicholz, P., Sacks, R., Lee, G., Eastman, C., (2018) BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors." John Wiley & Sons, 3rd edition.

Zhang, Y., Zheng, S., Ouyang, H., Lin, X. (2019). Literature review on the benefits of industrialized buildings. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 41 (06), pp. 633-636.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DA VENTILAÇÃO NO CONTROLO DO SOBREAQUECIMENTO EM EDIFÍCIOS DE CONSTRUÇÃO EM *LSF* E EM ALVENARIA DE TIJOLO

António Figueiredo[a]; Ricardo M.S.F. Almeida[bc]; Romeu Vicente[a]; Victor M. Ferreira[a]; Marcelo Langner[a]

[a]RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal), *Corresponding author: filiperebelo@ua.pt

[b]Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal

[c]CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

RESUMO

Uma das consequências das alterações climáticas é o aquecimento global, que, no caso dos edifícios, irá provocar alterações nas necessidades atuais de climatização, com maior impacto no arrefecimento. Desta forma, reconhecendo-se o setor dos edifícios é responsável por aproximadamente um terço do consumo de energia e um quarto das emissões de gases com efeito de estufa, é urgente estudar e desenvolver soluções construtivas e sistemas adequados que os permitam tornar este sector energeticamente mais eficientes. A ventilação natural é considerada uma estratégia sustentável e de grande potencial na mitigação do risco de sobreaquecimento nos edifícios. No entanto, se utilizada de forma desadequada e desajustada ao sistema construtivo, poderá até ter um efeito contrário, resultando eventualmente num aumento das necessidades energéticas para climatização.

Este trabalho de investigação pretende contribuir para o conhecimento nesta temática, comparando o desempenho térmico de dois sistemas construtivos quando submetidos a diferentes estratégias de ventilação. Desta forma, foram utilizadas duas células de teste, uma construída com uma solução de *Light Steel Framing* (LSF) e a outra com estrutura de betão com preenchimento com alvenaria de tijolo furado do tipo *Hollow Brick Masonry* (HBM).

Foi realizada uma campanha de monitorização experimental durante a estação de arrefecimento, com o objetivo de analisar o comportamento térmico das duas células de teste, bem como a capacidade de resposta dos dois sistemas construtivos considerando diferentes estratégias de ventilação. Em geral, a célula de teste LSF apresentou elevadas flutuações de temperatura diária com ventilação permanente, confirmando que é mais dependente das condições climáticas exteriores do que a célula HBM. No entanto, no cenário de ventilação noturna verificou-se um comportamento equivalente entre as células de teste no que respeita à amplitude térmica diária.

PALAVRAS-CHAVE

Ventilação natural; Ventilação intermitente; Inércia térmica; Sobreaquecimento; Construção leve; Construção em alvenaria.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção é reconhecido como um dos maiores contribuintes no que respeita às emissões de carbono no mundo. De acordo com Agência Internacional de Energia, este sector é responsável pelo consumo global de energia de 33% e pelas emissões de CO_2 de 40%, perspetivando-se ainda que este sector (parque imobiliário) nos países em desenvolvimento duplique até 2050 (IEA, 2021). Desta forma, é fundamental controlar e reduzir as emissões de carbono do sector da construção (Hawkins et al., 2021). Adicionalmente aos preocupantes números apresentados, sabe-se que atualmente a população permanece mais de 90% do tempo em ambientes fechados (Shi & Li, 2020), sendo a ventilação dos espaços um parâmetro de grande impacto na qualidade do ar interior dos edifícios, bem como no conforto térmico e no desempenho energético (Sundell, 2004).

A relação entre a ventilação dos edifícios e o seu desempenho térmico e energético é complexa, pois depende de um elevado número de variáveis que na maioria das vezes têm um comportamento dinâmico. Portanto, variáveis como a localização; as características da envolvente do edifício; bem como o sistema de ventilação e correspondentes níveis de renovação de ar devem ser abordadas, considerando diferentes modos de operação. Vários autores estudaram algumas destas variáveis de forma individual e também combinada, nomeadamente abordando as seguintes relações: reabilitação térmica e respetiva influência com a estanqueidade ao ar por Nabinger & Persily (Nabinger & Persily, 2011), ventilação noturna e desempenho térmico (Blondeau et al., 1997; Kolokotroni & Aronis, 1999) e o impacto de diferentes níveis de ventilação na energia necessária para climatização (Santos & Leal, 2012).

O presente trabalho foca-se na caracterização térmica de duas células de teste, construídas à escala real, uma com solução construtiva em estrutura de aço leve (LSF) e outra com alvenaria de betão e tijolo furado (HBM). Desta forma, estudou-se a influência de diferentes níveis de ventilação no comportamento térmico das duas células de teste. Adicionalmente, foi também testado e avaliado uma estratégia de ventilação com controlo por relógio, e o correspondente impacto na temperatura do ar no interior das células de teste.

Este estudo é totalmente inovador, pelo facto de não haver na literatura nenhum trabalho de caracter experimental que compare diferentes taxas e estratégias de ventilação em dois sistemas construtivos (um de inércia fraca e outro forte), usando duas células de teste à escala real.

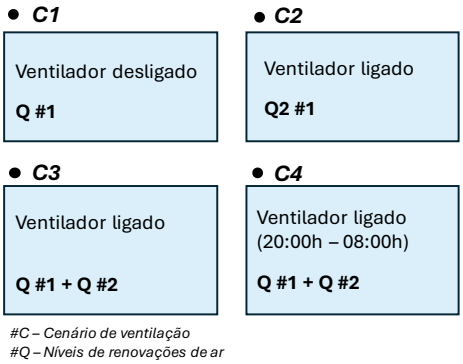
2. DADOS E MÉTODOS

Como referido na introdução, o presente trabalho pretende estudar e caracterizar o comportamento térmico (flutuação da temperatura do ar interior) de duas células de teste (Figura 1(a)) quando submetidas a diferentes taxas de ventilação. Note-se, que as células de teste, são em tudo iguais, diferindo apenas na sua inércia térmica devido aos materiais constituintes das soluções construtivas da envolvente.

Os diferentes cenários de ventilação estudados, tiveram como premissa na sua definição o estudo do aumento da taxa de ventilação bem como a utilização de ventilação noturna, beneficiando assim de temperaturas exteriores mais baixas.

Na Figura 1 observam-se as duas células de teste, bem como os diferentes cenários de ventilação que foram definidos neste estudo.

(a)



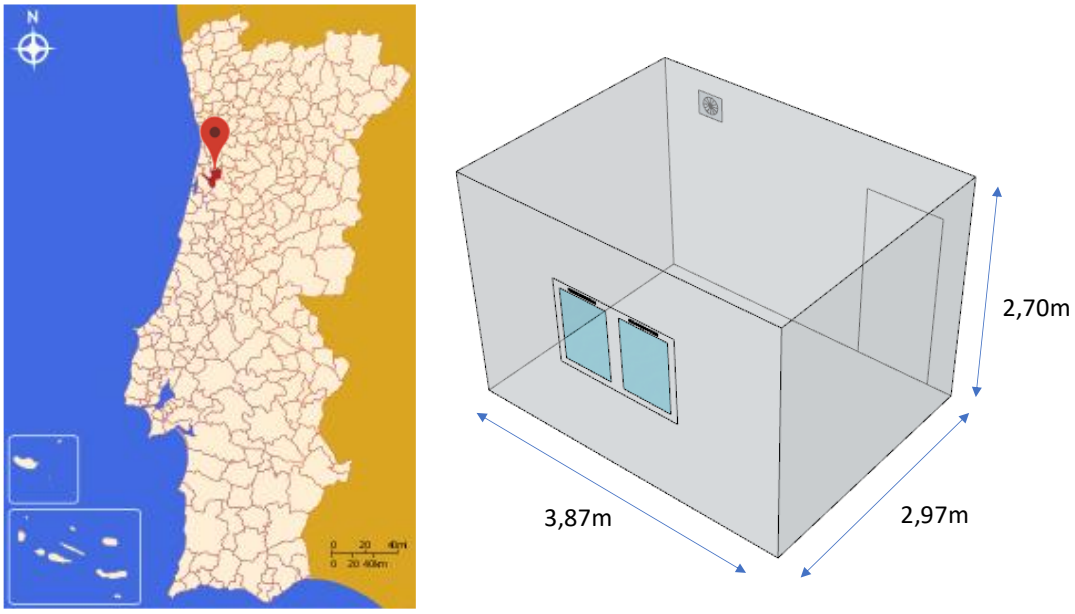
(b)

Figura 1 – Metodologia: (a) células de teste (b) esquema com os diferentes cenários de ventilação

Os diferentes níveis de renovação de ar (ventilação com diferentes caudais) utilizados neste trabalho são apresentados na secção 2.1 na caracterização das células de teste. Estes diferentes níveis de ventilação/renovação de ar foram obtidos pela abertura de uma ou de duas grelhas, instaladas na caixilharia dos perfis dos envidraçados, e pela utilização de um ventilador que era ligado ou desligado (com controlo por relógio) de acordo com o esquema presente na Figura 1(b).

2.1. LOCALIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

As células de teste estão situadas em Albergaria-a-Velha, uma região do distrito de Aveiro, perto da costa Norte de Portugal (Figura 2(a)), com uma altitude de 113 metros acima do nível do mar. Esta região é caracterizada por um clima mediterrâneo de verão quente, de acordo com o Mapa Climático Mundial de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006). As dimensões internas de ambas as células de teste são apresentadas na Figura 2(b), bem como a localização das mesmas em relação ao mapa de Portugal Continental.



(a) (b)

Figura 2 – Localização e geometria: (a) localização das células de teste (b) esquema com as dimensões internas das células de teste

Em relação as dimensões, as mesmas apresentam uma área em planta de 11.5m^2 e um volume interno de 31.30m^3.

2.2. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E GANHOS INTERNOS

Em relação às soluções construtivas da envolvente opaca, as paredes têm um coeficiente de transmissão térmica de U = 0,36 W m^{-2} °C^{-1} e o telhado de U = 0,28 W m^{-2} °C^{-1}. Relativamente à envolvente translúcida, as janelas têm um coeficiente de transmissão térmica (conjunto de caixilho e vidro) de U_w = 2,77 W m^{-2} °C^{-1} e um coeficiente solar de g = 0,75.

Em relação aos ganhos internos relativos à ocupação foi considerada a norma ISO 52016 (ISO EN 52016-1:2017, 2017), que especifica dados típicos relacionados com a ocupação para edifícios residenciais (períodos de ocupação e correspondentes ganhos térmicos). Assim, foram instaladas lâmpadas térmicas nas células de teste para sortir o calor associado aos ganhos internos em diferentes períodos do dia (23:00 h - 07:00 h; 07:00 h - 17:00 h; 17:00 h - 23:00 h). Para cada período, foram consideradas potências de 25 W, 100 W e 225 W respetivamente, em ambas as células de teste.

2.3. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS TAXAS DE RENOVAÇÃO DE AR

A taxa de renovação de ar das células de teste, foi avaliada através da execução de ensaios de decaimento da concentração de dióxido de carbono (CO_2). Para a realização dos ensaios, e por uma questão de redundância, usaram-se dois sensores de registo da concentração de CO_2 em cada célula de teste, com um intervalo de aquisição de 5 minutos. Os sensores foram posicionados a uma altura de 0,9 m acima do pavimento. O procedimento de ensaio for executado de acordo com as normas ISO 12569 e ASTM E 741, considerando o método de regressão linear. A medição das renovações de ar

foram Quadro 1 apresenta a taxa de renovação de ar (h^{-1}) correspondente aos diferentes cenários em estudo, em que o valor apresentado no quadro corresponde à média dos 3 ensaios.

Quadro 1 – Taxa de ventilação de acordo com os cenários em estudo

Cenário #	Célula de teste	h^{-1}
C1 – Q1 + Ventilador desligado	HBM	0.15
	LSF	0.14
C2 – Q1 + Ventilador ligado	HBM	1.33
	LSF	1.32
C3 e C4 – Q1 + Q2 + Ventilador ligado	HBM	1.84
	LSF	1.68

Da análise aos ensaios efetuados verificou-se que a taxa de ventilação para os diferentes cenários varia de 0,14h^{-1} e 1,68h^{-1} para a célula de teste LSF e varia entre 0,15 h^{-1} e 1,84 h^{-1} para a célula de teste HBM. Comparando a taxa de ventilação entre ambas células de teste (comparação individual por cenário) os resultados mostram uma diferença máxima de 8 %. Desta forma, é assegurado rigor na comparação do desempenho térmico entre as duas células de teste, uma vez que ambas têm condições equivalentes de ventilação.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na presente secção é apresentada a análise e a discussão dos resultados da campanha experimental realizada em ambas as células de teste durante a época de verão. Os 4 períodos de monitorização (diferentes cenários) incluem conjuntos de 11 dias consecutivos, entre junho e agosto de 2023. A temperatura interior registada representa o valor médio dos sensores posicionados ao nível do solo e do teto, tendo sido usado um total de 8 sensores de temperatura do ar por célula de teste. O esquema de monitorização, bem como informação sobre os sensores utilizados, poderá ser consultada em detalhe no trabalho realizado por Roque (Roque et al., 2021).

3.1. CENÁRIO C1

O primeiro cenário de ventilação estudado, consistiu na avaliação da temperatura do ar interior em ambas as células de teste considerando condições de funcionamento em regime livre, ou seja, sem o ventilador ligado e com uma taxa de ventilação muito baixa (0,14 h^{-1} e 0,15 h^{-1} para a célula de teste LSF e HBM, respetivamente).

O comportamento da temperatura do ar interior é apresentado na Figura 3 (monitorização correspondente a 11 dias), para o período de 27 de junho a 07 de julho.

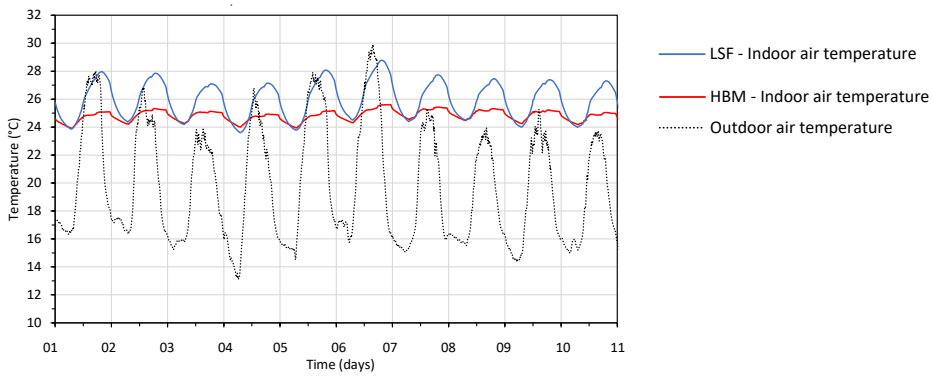


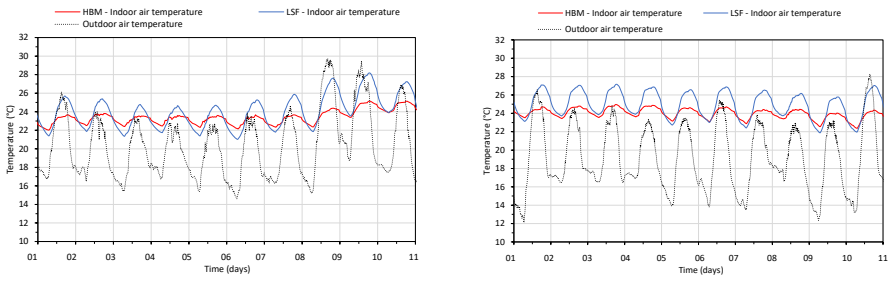
Figura 3 – Comportamento da temperatura do ar interior nas células de teste para o cenário de ventilação C1.

Da análise à Figura 3, verifica-se que a célula de teste HBM manteve consistentemente a temperatura do ar interior dentro de uma banda de amplitude baixa, flutuando entre 24,0 ºC e 25,5 ºC. Por outro lado, a célula de teste LSF apresentou maiores flutuações na temperatura do ar interior, variando entre 24,0 ºC e 29 ºC. Desta forma a amplitude térmica da célula de teste LSF foi aproximadamente 7% superior à amplitude térmica da célula de teste HBM. Este comportamento, em que a célula de teste LSF apresenta picos de temperatura do ar interior mais pronunciados (máximos e mínimos), é indicador de uma superior sensibilidade das flutuações da temperatura interior às condições climáticas externas.

Durante este período em análise, a resposta mais sensível aos estímulos externos resultou num maior risco de sobreaquecimento na célula de teste LSF.

3.2. CENÁRIO C2 E C3: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO AUMENTO DA TAXA DE VENTILAÇÃO

Nos cenários C2 e C3, foi avaliado o efeito do aumento da taxa de ventilação na temperatura do ar interior em ambas as células de teste. Foram avaliados dois níveis de taxa de ventilação, em que as renovações do ar aumentaram de 0,14h^{-1} (S1) para 1,3h^{-1} (S2), até um máximo de 1,8h^{-1} para o cenário S3. Comparando o cenário S1, com menor taxa de renovação do ar, com os cenários subsequentes (S2 e S3), verificou-se que um aumento das renovações de ar levou a menores flutuações da temperatura no interior da célula de teste LSF. No entanto, o efeito da temperatura exterior continua a ter uma maior influencia nesta célula de teste, que continuou a apresentar as maiores flutuações térmicas diárias.



(a) (b)

Figura 3 – Comportamento da temperatura interna das células de teste: (a) cenário C2 (b) cenário C3

Fazendo-se uma análise de conforto aos resultados dos cenários C2 e C3, considerou-se uma temperatura máxima de 25ºC como critério para sobreaquecimento. Desta forma, a célula de teste LSF apresentou um total de 66 % do tempo em sobreaquecimento no cenário C2, enquanto que a célula de teste HBM apresentou 35 % do tempo também em sobreaquecimento. Para o cenário C3, a célula de teste LSF esteve em situação de desconforto 50% do tempo (por sobreaquecimento), enquanto a célula de teste HBM não esteve em situação de desconforto. Estes resultados confirmam uma maior estabilidade da temperatura do ar interior na célula de teste HBM devido à sua superior inércia térmica. Esta conclusão verificou-se para as duas taxas de renovação de ar, correspondentes aos cenários C2 e C3.

Por outro lado, o maior impacto no conforto térmico da estratégia de funcionamento da ventilação no ambiente interior da célula de teste LSF realça a importância de se utilizarem soluções otimizadas que beneficiem do seu efeito positivo, isto é, quando existam condições de temperatura favoráveis para se ventilar (por exemplo, quando a temperatura exterior é menor que a temperatura interior).

3.3. CENÁRIO C4: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO AUMENTO DA TAXA DE VENTILAÇÃO DURANTE O PERÍODO NOTURNO

Neste cenário, o ventilador foi ligado apenas durante o período noturno, das 20:00 h às 8:00 h. Desta forma, as renovações de ar mantiveram-se iguais ao cenário anterior (C3) durante o período noturno, e durante o dia o ventilador foi desligado.

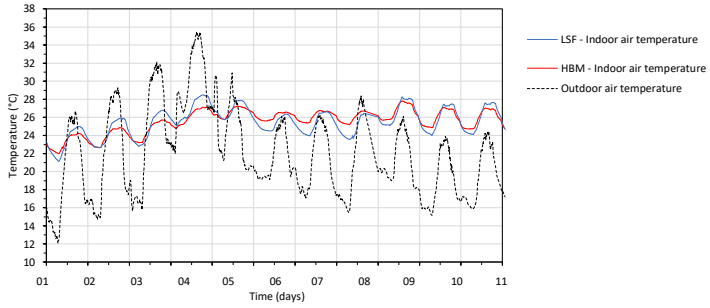


Figura 4 – Comportamento da temperatura interna das células de teste no cenário C4

Analisando os resultados em termos de quantificação da percentagem de sobreaquecimento, a célula de teste LSF apresenta um total de 61%, enquanto que a célula de teste HBM apresentou 70%. Desta forma, e da análise à Figura 4, pode-se concluir que a utilização da ventilação em períodos adequados, ou seja, quando a temperatura do ar exterior é inferior à temperatura interior (com maior ocorrência durante o período noturno), pode proporcionar um melhor desempenho em termos de conforto térmico interior (menor percentagem de sobreaquecimento) na célula de teste LSF com menor inércia térmica.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar diferentes estratégias de ventilação, com diferentes taxas de renovação de ar em dois sistemas construtivos. Um, constituído por uma estrutura leve de

aço e o outro por estrutura de betão armado com enchimento em alvenaria de tijolo. Desta forma, duas células de teste, construídas à escala real, foram monitorizadas durante 4 períodos de 11 dias cada, durante a estação de verão. Em cada período foi aplicada uma diferente estratégia de ventilação, com alterações ao nível dos horários bem como dos caudais de ventilação.

Dos resultados obtidos, destacam-se as principais conclusões seguintes:

- Maior estabilidade da temperatura do ar interior na célula de teste HBM, apresentando reduzida influência às variações diárias da temperatura exterior. A célula de teste LSF apresentou, como expectável, uma resposta térmica mais rápida aos estímulos externos o que resultou num maior risco de sobreaquecimento;

- Com uma estratégia de ventilação adequada, é possível obter um conforto térmico equivalente em soluções construtivas que diferem em termos de inércia térmica;

O aumento da taxa de ventilação, bem como a ventilação noturna, realçam a importância de soluções otimizadas de ventilação inteligente com o objetivo do aumento do conforto térmico, especialmente no caso de soluções de inércia térmica fraca. Desta forma, como trabalhos futuros sugerem-se novos estudos com diferentes cenários que sejam controlados de forma inteligente de acordo com a

REFERÊNCIAS

52016-1:2017, I. (2017). *Energy performance of buildings. Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads*.

Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (1997). Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy*, *61*(5), 327–335. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00076-5

Hawkins, W., Cooper, S., Allen, S., Roynon, J., & Ibell, T. (2021). Embodied carbon assessment using a dynamic climate model: Case-study comparison of a concrete, steel and timber building structure. *Structures*, *33*, 90–98. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.013

IEA. (2021). *Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021*. Https://Iea.Blob.Core.Windows.Net/Assets/D0031107-401d-4a2f-A48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.Pdf ((Accessed 22 April 2024).

Kolokotroni, M., & Aronis, A. (1999). Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy*, *63*(4), 241–253. https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00031-8

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, *15*(3), 259–263. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130

Nabinger, S., & Persily, A. (2011). Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home. *Energy and Buildings*, *43*(11), 3059–3067. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.027

Roque, E., Vicente, R., Almeida, R. M. S. F., & Ferreira, V. M. (2021). Energy consumption in intermittently heated residential buildings: Light Steel Framing vs hollow brick masonry

constructive system. *Journal of Building Engineering*, *43*, 103024. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103024

Santos, H. R. R., & Leal, V. M. S. (2012). Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context. *Energy and Buildings*, *54*, 111–121. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.040

Shi, Y., & Li, X. (2020). Effect of mechanical ventilation on infiltration rate under stack effect in buildings with multilayer windows. *Building and Environment*, *170*, 106594. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106594

Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air, Supplement*, *14*(SUPPL. 7), 51–58. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO CONFORTO AMBIENTAL DE UM EDIFÍCIO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO DE SUPORTE À ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Rúben Teixeira[a]; Daniel Mateus[b]; João Canto[c,d]; Maria Manso[e,f]; Elói Figueiredo[g,f] ; Vítor Antunes[h,f]

[a](Universidade Lusófona - Centro Universitário de Lisboa, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal), ruben_videmonte@hotmail.com

[b](CIAUD, Research Centre for Architecture, Urbanism and Design, Lisbon School of Architecture, Universidade de Lisboa, 1349-063 Lisboa, Portugal) dmateus@fa.ulisboa.pt

[c](Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona - Centro Universitário de Lisboa, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal), joao.canto@ulusofona.pt

[d](COPELABS, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal)

[e](Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona - Centro Universitário de Lisboa, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal), maria.manso@ulusofona.pt

[f](CERIS, Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal)

[g](Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona - Centro Universitário de Lisboa, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal), eloi.figueiredo@ulusofona.pt

[h](Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona - Centro Universitário de Lisboa, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Portugal), vitor.antunes@ulusofona.pt

RESUMO

Este trabalho surge no âmbito do projeto de investigação BuildingAdapt que tem como caso de estudo o Edifício A da Universidade Lusófona em Lisboa, com o objetivo principal de identificar as melhores estratégias de reabilitação, para garantir o conforto ambiental dos seus ocupantes, considerando as condições climáticas presentes e futuras. Primeiro, elaborou-se um modelo tridimensional do edifício em Building Information Modelling (BIM) utilizando o software Autodesk Revit, a partir de um levantamento em 3D Point Cloud. Posteriormente, integrou-se o Rhino 3D no Revit, bem como o Grasshoper, que através de plug-ins como o Ladybug e o Honeybee, permitem realizar uma análise energética do edifício, com base em dados climáticos específicos da região de Lisboa. Esta interação entre softwares permite criar diferentes simulações, nomeadamente a determinação da radiação solar incidente nas superfícies exteriores do edifício, bem como a iluminância interna em diferentes momentos do dia. Os resultados obtidos nas simulações permitiram analisar as condições de conforto do Edifício A. Estes resultados prévios serão fundamentais para posterior definição de um plano de adaptação do edifício às alterações climáticas, enquadrado num contexto de reabilitação, para melhorar as suas condições ambientais específicas, bem como minimizar as necessidades de consumo energético do mesmo.

Palavras-chave: Alterações climáticas; Reabilitação; Radiação solar incidente; Iluminância; Conforto higrotérmico

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA

Os edifícios são responsáveis por quarenta por cento da energia consumida mundialmente (Diretiva (UE) 2024/1275). Esta energia é proveniente na sua maioria de fontes poluentes, o que tem um impacto significativo nas alterações climáticas. Neste contexto surge a necessidade de analisar as condições atuais de conforto ambiental dos edifícios existentes, que permitam simultaneamente garantir os níveis de conforto dos ocupantes e minimizar o consumo energético dos edifícios.

Os edifícios com carácter histórico possuem limitações quanto à sua alteração. No entanto, no decorrer da sua utilização devem garantir as condições de conforto atuais. Para garantir uma reabilitação sustentável destes edifícios deve optar-se por soluções passivas que garantam uma boa eficiência energética, utilizar-se materiais de construção sustentáveis e ainda usar técnicas que minimizem o impacto ambiental.

Os cenários climáticos futuros apontam para uma subida de 1,5 °C da temperatura global (IPCC, 2022). As alterações climáticas representam um dos maiores desafios da atualidade, com eventos climáticos extremos a ocorrerem de forma mais frequente e intensa. Os edifícios que são planeados para o clima atual, anteveem um risco de sobreaquecimento em cenários climáticos futuros.

Estudos recentes aplicam análises do desempenho energético e métodos computacionais de geração de forma, tais como modelação paramétrica e otimização, criando soluções formais para a envolvente (cobertura e fachadas) e sistemas de sombreamentos de edifícios, visando projetar e reabilitar edifícios que sejam energeticamente eficientes e que proporcionem um adequado conforto ambiental.

Naquele âmbito salienta-se a investigação de Henriques et al. (2012), que desenvolveram uma estratégia para encontrar soluções de projeto para um sistema de clarabóias responsivo, com um desempenho adequado de iluminância. Nesse trabalho foram utilizadas regras e métodos heurísticos de modo a encontrar soluções de clarabóias com bom desempenho de iluminância, num período de projeto reduzido.

Pinto et al. (2013) desenvolveram também uma investigação em como os edifícios devem ser projetados e construídos, de modo a terem boas condições de iluminância, assegurando o conforto visual dos ocupantes e a utilização racional de energia em salas de aula de oito escolas da cidade de Viseu, Portugal. A análise desenvolvida focou-se nas características existentes do edifício, nomeadamente aquelas que interferem diretamente com os níveis de iluminância.

A investigação de Kirimtat et al. (2016) utiliza a modelação paramétrica, a análise de desempenho energético e algoritmos de otimização para encontrar soluções de projeto otimizadas para dispositivos de sombreamento. A otimização é feita relativamente aos valores de iluminância que os sombreamentos permitem obter em espaços interiores de escritórios.

Por sua vez, Vazquez et al. (2020) desenvolveram um sistema de projeto digital para projetar paredes de alvenaria vazadas, com desempenho otimizado relativamente à iluminação natural e às necessidades de energia para arrefecimento. Os autores criaram um sistema de projeto generativo baseado em gramáticas da forma e que utiliza regras de construção vernacular. Esse sistema de projeto foi transposto para um modelo paramétrico, o qual foi conectado com um software de simulação, de modo a se poder calcular os resultados da iluminação natural e as necessidades de energia de arrefecimento no espaço interior de edifícios. Os autores utilizam também algoritmos genéticos para

encontrar famílias de soluções otimizadas, nas paredes de alvenaria vazadas, relativamente à iluminação natural e às necessidades de energia de arrefecimento.

Venâncio (2020) desenvolveu e testou um modelo paramétrico para dispositivos de sombreamento em fases iniciais de projeto, aplicando a otimização multiobjectivo para encontrar soluções otimizadas para sombreamentos, que permitam bloquear a entrada de radiação solar excessiva no espaço interior dos edifícios e fornecer simultaneamente níveis adequados de iluminação natural.

Mateus et al. (2021) desenvolveram e implementaram um processo de projeto baseado em energia, aplicando processos de geração e transformação de forma à envolvente (cobertura e fachadas) de edifícios, de modo a melhorar o seu desempenho energético, visando a captação de energia solar, para que a envolvente projetada possa produzir no mínimo a energia elétrica que os edifícios necessitam de consumir.

Garcia et al. (2021) organizaram uma investigação relacionada também com a temática da análise energética em edifícios universitários, com o objetivo de perceber o seu consumo energético, visando contribuir para mitigar as alterações climáticas e aumentar o conforto dos utilizadores e a salubridade do edifício universitário em estudo.

No presente artigo apresenta-se a análise da radiação solar incidente e da iluminância do Edifício A da Universidade Lusófona – Centro Universitário de Lisboa. Pretende-se posteriormente desenvolver análises de temperatura interior e de sombreamentos, em etapas futuras da investigação.

Adicionalmente, foram instalados um conjunto de sensores, com o objetivo de se recolherem dados experimentais para validar e calibrar o modelo numérico, de forma a relacionar os dados climáticos exteriores com o desempenho energético do edifício. Numa dissertação futura irão ser incluídos, questionários preenchidos pelos utilizadores sobre o conforto térmico do edifício e realizadas medições com recurso a luxímetros.

O principal objetivo deste trabalho é compreender o conforto ambiental em edifícios universitários e ajudar a Universidade Lusófona – Centro Universitário de Lisboa a (i) tomar decisões adequadas de reabilitação que melhorem as condições ambientais específicas do edifício e (ii) minimizar as necessidades de consumo energético do edifício. Pretende-se assim obter informações para tomar uma decisão informada sobre como se adaptar o edifício universitário às alterações climáticas e como investir em estratégias de reabilitação mais sustentáveis e rentáveis.

Salienta-se com este trabalho a importância da reabilitação dos edifícios escolares, especialmente aqueles com carácter histórico cuja intervenção deve manter a imagem da estrutura edificada original.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O Edifício A da Universidade Lusófona - Centro Universitário Lisboa, situado no Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa (38.7580950839366, -9.153097231595634), é o edifício central da universidade, onde se localizam os serviços académicos centrais, a reitoria, as instalações da faculdade de direito e várias salas de aula. Na Figura 1, observa-se uma imagem do Google Maps, com a orientação solar do edifício.

Este edifício conta com um passado que vai além das suas funções académicas atuais. O Edifício A resulta de uma adaptação progressiva de um edifício construído em 1840. Foi inicialmente concebido para albergar uma fábrica têxtil – a fábrica Lusitânia. Esta fábrica funcionou até ao início do século XX. Em 1919 o edifício foi vendido ao Estado Português, e depois transformado no Quartel do Exército do Campo Grande, onde funcionavam vários regimentos militares. Em 1996 o edifício foi adquirido pela COFAC (Cooperativa de Formação e Animação Cultural), que é proprietária da Universidade Lusófona.

O edifício é constituído por paredes exteriores de alvenaria de pedra com cerca de 1,10 metros de espessura, e na parte inferior das janelas por paredes de alvenaria de tijolo com cerca de 25 centímetros de espessura. As divisões interiores são compostas por gesso cartonado e lã de rocha, com uma espessura total de 10 centímetros de espessura. Visto ser um edifício com uma grande narrativa histórica, a sua reabilitação é uma mais-valia para a engenharia e para a arquitetura da cidade de Lisboa.

Figura 1 – Orientação solar do Edifício A

2 METODOLOGIA

A modelação do Edifício A foi feita em Revit através de um levantamento em 3D Point Cloud, permitindo modelar todas as características arquitetónicas e pormenores construtivos do edifício. O modelo tridimensional foi posteriormente transposto de Revit (Autodesk, 2024) para Rhino (Robert McNeel & Associates, 2024), tendo sido analisado utilizando os plug-ins Ladybug (Ladybug Tools, 2024) e Honeybee (Ladybug Tools, 2024), dentro do Grasshopper (Davidson, 2024). A transposição do modelo tridimensional do edifício para o Rhino permitiu modelar uma geometria simplificada do edifício, para análise do desempenho do edifício quanto à radiação solar incidente sobre as superfícies da sua envolvente, bem como quanto à iluminância nos seus espaços interiores.

As análises foram feitas utilizando um ficheiro climático epw, do ano de 2005, da região de Lisboa, disponibilizado através de uma página web do software Energyplus (EnergyPlus, 2024).

A radiação solar incidente permite saber a quantidade de radiação solar em kWh/m^2 que incide ao longo do ano sobre a envolvente do Edifício A, nomeadamente sobre a cobertura e as fachadas. A radiação solar global, em kWh, foi também determinada. Esta corresponde ao valor global da radiação solar obtida por uma superfície, sendo esse valor obtido multiplicando o valor da radiação solar incidente pela área da superfície em análise. Para realizar estas análises, a geometria do edifício foi simplificada, utilizando-se apenas as superfícies exteriores de cada elemento construtivo do edifício (paredes, coberturas e janelas). Para determinar a radiação solar incidente sobre o Edifício A foram realizadas três simulações, uma simulação anual, uma simulação para o Solstício de verão (21 de junho) e outra para o Solstício de inverno (21 de dezembro). Na simulação anual, foi analisado o valor global de radiação solar incidente nas superfícies da envolvente, nomeadamente a cobertura e as três fachadas expostas (Noroeste, Sudoeste e Nordeste). A fachada Sudeste não foi analisada por possuir um edifício contíguo. Numa primeira fase analisaram-se a cobertura e as fachadas como um todo. Posteriormente, analisou-se cada elemento construtivo das fachadas com maior detalhe (por exemplo: superfícies de parede, cantarias, caixilhos e vidros das janelas). As simulações da radiação solar

incidente para os Solstícios de verão e inverno foram realizadas para as 12 horas (pico solar), efetuando-se uma análise geral do edifício e uma análise detalhada das superfícies das coberturas e das janelas de cada fachada.

No que diz respeito à iluminância, esta permite analisar o fluxo luminoso que é projetado numa unidade de área de uma superfície. Tendo em conta que se trata de um edifício escolar, optou-se por analisar a iluminância nas superfícies dos pavimentos das salas de aula dos pisos 1, 2 e 3, por de acordo com a norma europeia EN 12464-1:2021 (CEN, 2021), o valor de iluminância mínimo exigido em edifícios educacionais, como é o caso do edifício em estudo, ser de 100 lux em espaços de circulação, devendo esse valor ser assegurado ao nível do pavimento. No presente estudo, apenas são analisadas as salas de aula do edifício, pretendendo-se analisar os restantes espaços, como sejam os de circulação, em etapa posterior da investigação. De modo a viabilizar uma análise conjunta da totalidade dos espaços ao nível de cada piso do edifício, optou-se por realizar a análise da iluminância de todos os espaços, incluindo os espaços das salas de aula, tendo em conta três critérios: 1) considerar como valor mínimo aceitável de iluminância o valor de 100 lux; 2) a análise ser realizada ao nível do pavimento; 3) considerar como valor máximo aceitável de iluminância 3.000 lux. Os dois primeiros critérios foram definidos, pois constituem os requisitos mais exigentes que se verificam para espaços de edifícios educacionais, de acordo com a norma europeia acima referida. O terceiro critério foi definido de acordo com Venâncio (2020), em que valores acima de 3.000 lux são considerados excessivos. Em etapa posterior da investigação pretende-se também efetuar medições de iluminância nos espaços das salas de aula, com recurso a luxímetros, possibilitando a comparação dos valores medidos com os valores que foram simulados através de software e permitindo também verificar o nível de rigor dos resultados obtidos nas simulações. A análise da iluminância assim elaborada permite que seja possível entender quais são os espaços interiores que têm iluminação natural adequada, obtendo valores entre os 100 e os 3.000 lux. Abaixo de 100 lux considera-se que há falta de luz natural e acima de 3.000 lux considera-se que há excesso. Para esta análise modelou-se a volumetria interior de todas as salas de aulas em Rhino, distinguindo para cada sala a superfície do pavimento, do teto, das paredes e das janelas. Foram atribuídas características materiais a estas superfícies, para que a análise da iluminância pudesse ser realizada, através do próprio plug-in Honeybee. Para a análise da iluminância nas salas de aula do Edifício A foram realizadas três simulações, uma para cada Solstício (o de verão no dia 21 de junho às 12 horas e o de inverno no dia 21 de dezembro às 12 horas) e outra para o Equinócio de Primavera (21 de março às 12 horas).

A sensorização instalada no edifício em estudo é composta por sondas de temperatura superficiais DS18B20 (com ponta de aço inoxidável e precisão ±0.5°C), instaladas na superfície exterior e interior das salas, como se pode observar na Figura 2. Tem-se como objetivo medir as temperaturas superficiais exteriores e interiores em diversos pontos com o propósito de aferir o diferencial térmico das diversas superfícies opacas da parede e assim compreender a sua influência nas condições de conforto interiores. As sondas foram instaladas em duas salas de aula, de dimensões comparáveis, cujas paredes exteriores ficam em fachadas opostas, com exposições solares diametralmente opostas. Cada sala é medida numa zona de parede simples com alvenaria de tijolo e numa zona de parede de alvenaria de pedra, com muito maior espessura. Em cada zona de medida foram instaladas três sondas no interior e três sondas no exterior, de forma a introduzir redundância nas medidas (e robustez nos resultados), e estando cada sonda exterior alinhada com uma sonda interior, de forma que se possa corresponder cada ponto exterior com um ponto interior. Também são monitorizadas as temperaturas ambiente e humidade relativa no interior das duas salas, recorrendo a sensores Temtop M100 (com precisão ±1°C e ±5%) bem como, no espaço exterior, recorrendo a uma estação meteorológica Froggit HP1000SE PRO (com precisão ±1°C e ±4%). O sistema instalado permite efetuar medidas em continuidade, com intervalos de um minuto, e armazenar todas as grandezas descritas para análise.

Cada conjunto de três sondas superficiais está ligado a um microcontrolador, programado para enviar as medidas para uma folha de cálculo "Google Sheets", onde são também agregadas as medidas dos restantes sensores. O edifício encontra-se ainda em monitorização e prevê-se a divulgação desta informação em trabalhos futuros.

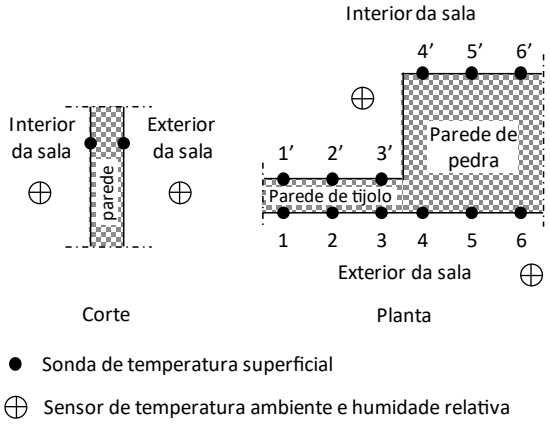


Figura 2 – Esquema de colocação dos sensores

3 RESULTADOS

3.1 RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

Na simulação anual obtiveram-se valores de radiação solar incidente expectáveis, com enorme discrepância entre as fachadas sudoeste e nordeste, como se pode verificar nas Figuras 3 e 4. O Edifício A tem uma radiação solar incidente média de 523 kWh/m^2, recebendo uma radiação solar global de 7.485.991 kWh. A fachada sudoeste é a que tem maior radiação solar incidente, com 1.265 kWh/m^2, seguida da cobertura com 879 kWh/m^2, como se pode ver na Figura 5. A cobertura recebe a maior percentagem de radiação global, com 3.367.000 kWh (45%), seguindo-se a fachada sudoeste, com 1.413.337 kWh (19%), a fachada nordeste, com 352.633 kWh (5%), sendo a fachada noroeste a que recebe o menor valor, com 116.029 kWh (2%). Verificando em detalhe a radiação solar incidente nos diferentes elementos construtivos do edifício, constatamos que a fachada sudoeste possui maior exposição à radiação solar, em que os caixilhos das janelas recebem 1.322 kWh/m^2, seguindo-se as superfícies das paredes com 1.294 kWh/m^2, as janelas com 1.266 kWh/m^2 e as cantarias com 1.264 kWh/m^2. Na fachada noroeste, as superfícies de parede recebem 467 kWh/m^2, as cantarias 443 kWh/m^2 e as janelas 433 kWh/m^2. Por sua vez na fachada nordeste, que possui menor exposição à radiação solar, verifica-se que os caixilhos das janelas recebem 430 kWh/m^2, seguindo-se as cantarias com 386 kWh/m^2, as janelas com 323 kWh/m^2, as portas com 278 kWh/m^2 e as superfícies de paredes com 266 kWh/m^2. No Quadro 1 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a análise anual.

De modo a ser possível comparar e relacionar os valores de radiação solar incidente com os valores de iluminância, recolhemos também valores para os solstícios de verão e de inverno às 12h. Nos solstícios de verão e de inverno às 12h, o Edifício A recebe uma radiação solar global de 3.275 kWh no verão e de 3.020 kWh no inverno. Embora com valores mais elevados no verão para a radiação solar global em todo o edifício, a quantidade de radiação solar incidente por metro quadrado é menor no verão, com 0,202 kWh/m^2 comparada com os 0,398 kWh/m^2 do Inverno. Nas janelas da fachada sudoeste, onde há uma maior discrepância de valores, verifica-se uma maior quantidade de radiação solar incidente

no inverno, com 0,843 kWh/m^2, comparada com os 0,381 kWh/m^2 do verão. Os valores de radiação solar incidente para os períodos dos solstícios de verão e de inverno, serão apresentados com maior detalhe em um estudo científico subsequente.

Quadro 1 – Radiação solar incidente resultante da análise anual

	Análise anual		
	Geometria	kWh	kWh/m^2
	Edifício A	7.485.991	523
	Cobertura	3.367.000	879
Fachada nordeste	Fachada	352.633	309
	Envidraçados	54.271	323
	Portas	21.083	278
	Parede	196.456	266
	Caixilharia	13.346	430
	Cantaria	64.607	386
Fachada sudoeste	Fachada	1.413.337	1.265
	Envidraçados	268.946	1.266
	Parede	719.214	1.294
	Caixilharia	53.951	1.322
	Cantaria	344.850	1.264
Fachada noroeste	Fachada	116.029	682
	Envidraçados	6.519	433
	Parede	59.318	467
	Cantaria	13.109	443

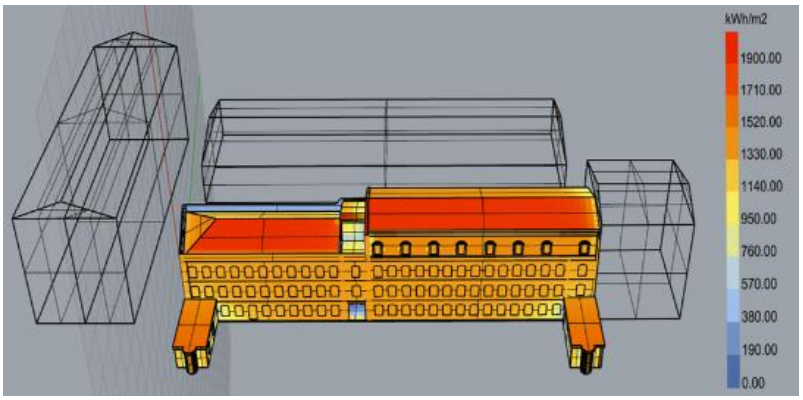


Figura 3 – Radiação solar incidente na fachada sudoeste

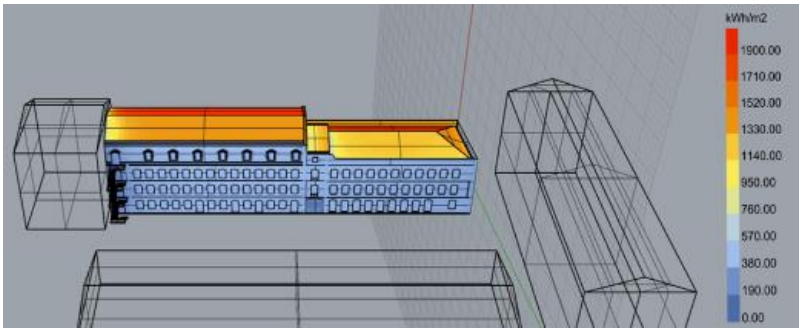


Figura 4 – Radiação solar incidente na fachada nordeste

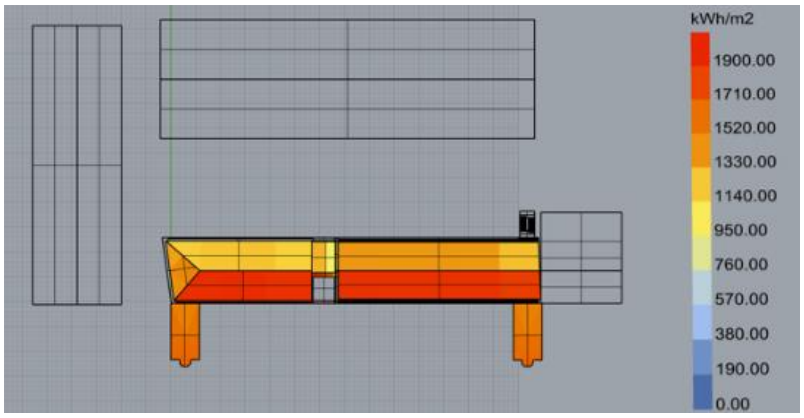


Figura 5 – Radiação solar incidente na cobertura

3.2 ILUMINÂNCIA

Para a análise da iluminância optou-se por determinar o desempenho das salas de aulas do primeiro, segundo e terceiro piso, junto das fachadas nordeste e sudoeste do edifício (ver quadro 2). Importa referir que o sistema atual de sombreamento dos vãos envidraçados das salas de aula é composto por cortinas opacas (blackout) aplicadas pelo interior. Este dispositivo de sombreamento bloqueia completamente a entrada da luz, pelo que a simulação foi realizada sem sistema de sombreamento. De seguida realizou-se uma análise gráfica da iluminância para as salas de aula do piso 2 para compreender a sua distribuição espacial em determinados períodos. Utilizou-se o piso 2 como exemplo por possuir um elevado número de salas de aula com excesso de iluminância. A iluminância foi analisada em três momentos distintos: no solstício de verão (21 dezembro às 12h), posição mais alta do sol (Figura 6); no solstício de inverno (21 junho às 12h), altura em que o sol atinge a posição mais baixa (Figura 7); e equinócio de primavera (20 de março às 12h), com o sol numa posição intermédia, relativamente à trajetória anual (Figura 8). A iluminância foi apenas analisada para estes três momentos distintos ao longo do ano, não tendo sido analisada para a totalidade do ano. Optou-se por realizar a análise para os três momentos definidos, pois consistem em duas situações extremas (solstícios) e em uma situação intermédia (equinócio de primavera) da trajetória solar ao longo do ano. Deste modo, através da leitura dos resultados da iluminância nestes períodos, é possível obter uma noção do desempenho das salas de aulas relativamente à iluminância, para a totalidade do ano.

Para o solstício de verão, a média da iluminância das salas de aulas dos pisos 1, 2 e 3 é de 1.507 lux, 2.061 lux e 730 lux, respetivamente, correspondendo um peso de 75 % destes valores às salas de aulas orientadas a sul. A média total é de 1.584 lux. Como tal, no solstício de verão, conforme representado no Quadro 2, a iluminância está dentro dos intervalos adequados, entre 100 e 3.000 lux.

Para o solstício de inverno, a média da iluminância dos pisos analisados é de 4.270 lux, o piso 1 tem uma média de 3.734 lux, o piso 2 com 5.992 lux e 1.543 lux no piso 3, tendo nestes pisos as salas voltadas a sul um peso de 93% nos valores obtidos, de acordo com o Quadro 2. Nos compartimentos junto à fachada sul do piso 2, podemos notar de acordo com a figura 7 a extensão da cor vermelha, onde a iluminância é mais elevada. Para o solstício de inverno, o valor médio excede os 3.000 lux.

A média de iluminância atinge os 170 lux no equinócio de primavera. Com o piso 3 a ter um défice de iluminância natural, com uma média de 65 lux. Apesar de a média nos pisos 1 e 2 ser respetivamente 174 e 219 lux e estar dentro dos intervalos aceitáveis (entre 100 e 3.000 lux), deve ser referido que há pontos dentro das salas destes pisos com défice de iluminação natural.

Quadro 2 - Resultados sintetizados da iluminância nas salas de aulas

	Solstício de inverno				Solstício de verão				Equinócio de primavera			
Salas	Iluminância média	100 – 3.000 lux	< 100 lux	> 3.000 lux	Iluminância média	100 – 3.000 lux	< 100 lux	> 3.000 lux	Iluminância média	100 – 3.000 lux	< 100 lux	> 3.000 lux
Piso 1												
A1.1	609	100%	0%	0%	704	100%	0%	0%	102	51%	49%	0%
A1.2	593	100%	0%	0%	684	100%	0%	0%	100	49%	51%	0%
A1.3	604	100%	0%	0%	691	100%	0%	0%	103	54%	46%	0%
A1.4	619	100%	0%	0%	719	100%	0%	0%	104	54%	46%	0%
A1.5	8775	56%	0%	44%	2828	94%	0%	6%	294	94%	7%	0%
A1.6	9374	52%	0%	48%	2992	94%	0%	6%	327	95%	5%	0%
Piso 2												
A2.1	649	100%	0%	0%	755	100%	0%	0%	108	53%	47%	0%
A2.2	673	100%	0%	0%	783	100%	0%	0%	112	57%	43%	0%
A2.3	668	100%	0%	0%	772	100%	0%	0%	111	56%	44%	0%
A2.4	711	100%	0%	0%	828	100%	0%	0%	118	66%	34%	0%
A2.5	9256	53%	0%	47%	2886	94%	0%	6%	302	93%	7%	0%
A2.6	9571	51%	0%	49%	2972	94%	0%	6%	311	94%	6%	0%
A2.7	9758	47%	0%	53%	3027	94%	0%	6%	326	94%	6%	0%
A2.8	9705	48%	0%	52%	2966	94%	0%	6%	312	93%	7%	0%
A2.11	8261	54%	0%	46%	2579	94%	0%	6%	231	54%	46%	0%
A2.12	5159	76%	0%	24%	1773	97%	0%	3%	203	61%	39%	0%
Piso 3												
A3.1	183	77%	23%	0%	213	86%	14%	0%	31	0%	100%	0%
A3.2	174	76%	24%	0%	202	84%	16%	0%	30	0%	100%	0%
A3.3	177	79%	21%	0%	772	100%	0%	0%	30	0%	100%	0%
A3.4	2620	85%	2%	13%	897	92%	6%	2%	92	24%	76%	0%
A3.5	3446	84%	0%	16%	1309	97%	0%	3%	117	33%	67%	0%
A3.6	2656	83%	5%	13%	985	89%	9%	2%	91	25%	75%	0%

Legenda: Verde: 100 – 3.000 lux. Azul: < 100 lux. Vermelho: > 3.000 lux

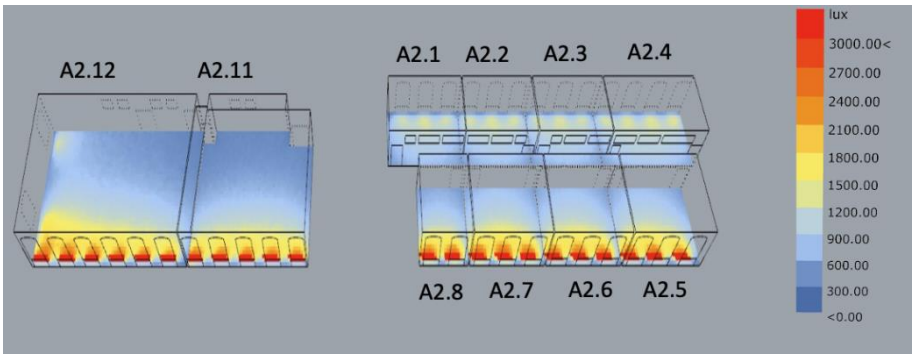


Figura 6 – Análise da iluminância no solstício de verão (salas de aula do piso 2)

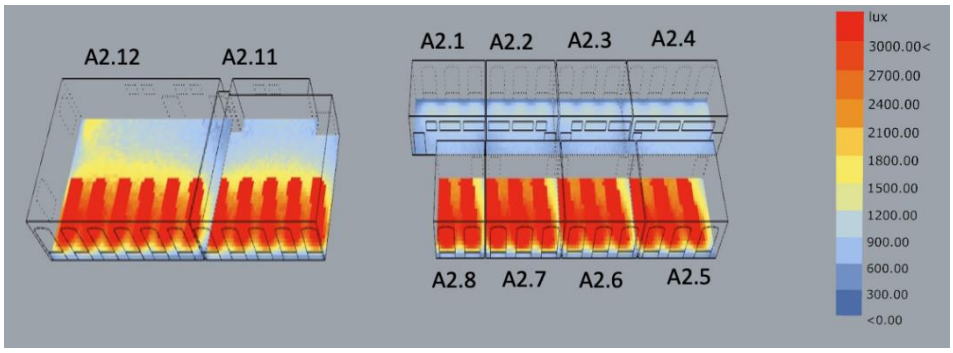


Figura 7 – Análise da iluminância no solstício de inverno (salas de aula do piso 2)

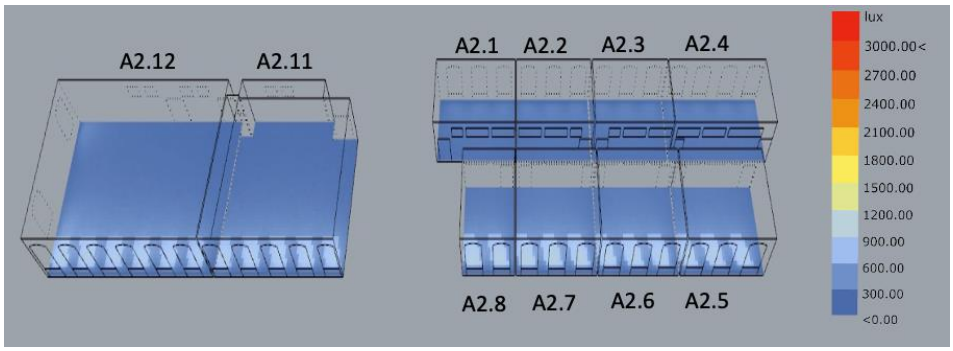


Figura 8 - Análise da iluminância no equinócio de primavera (salas de aula do piso 2)

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para a totalidade do ano, apesar da fachada sudoeste receber uma maior radiação solar incidente por metro quadrado, na realidade a superfície que recebe a maior radiação solar incidente por metro quadrado é a água da cobertura orientada a sudoeste, como se pode observar na Figura 3. Os menores resultados de radiação solar incidente por metro quadrado na generalidade da cobertura, comparativamente à fachada sudoeste, devem-se ao facto de existirem zonas sombreadas nas extremidades da cobertura e junto ao edifício contíguo ao Edifício A, as quais recebem valores mais baixos de radiação solar incidente, fazendo diminuir o valor da radiação solar incidente obtido para a totalidade da cobertura.

Para o solstício de verão, verifica-se uma radiação solar global de 3.275 kWh, sendo de 3.020 kWh no solstício de inverno. Sendo este valor superior no verão era expectável que em termos de radiação solar incidente por metro quadrado, os valores fossem também superiores no verão. Isto não se verifica, sendo em média de 0,202 kWh/m^2 no verão e de 0,398 kWh/m^2 no inverno, devido ao facto de o sol ter uma trajetória mais baixa no inverno, incidindo com um ângulo mais perpendicular nas superfícies verticais do edifício nessa altura do ano, principalmente na fachada sudoeste. Os valores da radiação solar global são mais elevados no verão do que no inverno, devido ao facto da radiação solar global na cobertura ser consideravelmente maior no verão do que no inverno. Isso faz com que o valor da radiação solar global para todo o edifício seja também mais elevado no verão do que no inverno. As simulações da radiação solar incidente para os solstícios de verão e inverno foram realizadas para se obter uma base de comparação e relação com os dados da iluminância, uma vez que a quantidade de fluxo luminoso que entra nas salas de aula está diretamente relacionada com a quantidade de radiação solar incidente nas janelas de cada sala de aula. Relembrando os valores apresentados anteriormente, nas janelas da fachada sudoeste foram obtidos valores de radiação solar

incidente por metro quadrado que são superiores no solstício de inverno (0,843 kWh/m^2) comparados com os valores do solstício de verão (0,381 kWh/m^2). Isso traduz-se num excesso de iluminação natural no solstício de inverno, nas salas de aulas orientadas a sudoeste.

Os resultados preliminares da sensorização indicam, como seria de esperar, diferenças substanciais no comportamento da parede de alvenaria simples versus a parede de alvenaria de pedra, bem como no comportamento das fachadas opostas. Estes resultados serão analisados em detalhe em estudos científicos subsequentes.

5 CONCLUSÕES

No geral, verifica-se que a cobertura do edifício recebe o maior valor de radiação solar global, nomeadamente 3.367.000 kWh correspondente a 45% de todo o edifício, e também um valor elevado de radiação solar incidente de 879 kWh/m^2. Esta exposição contribui para um excesso de ganhos solares pela cobertura. Atendendo a este facto, considera-se que se deve promover o aproveitamento desta radiação solar incidente através da instalação de painéis solares na cobertura, pois são uma forma sustentável e renovável de produzir energia, reduzindo assim a dependência de energia da rede. Como a área da cobertura é de 2.417 m^2, e assumindo uma ocupação de cerca de metade desta área com painéis solares com uma eficiência média de 17 %, seria possível produzir cerca de 180.511 kWh por ano de energia renovável. Quanto à análise da iluminância, observa-se que no equinócio de primavera foram identificadas diversas salas de aula com défice de iluminação natural, sendo necessário recorrer ao uso de luz artificial. Contudo, esta necessidade de consumo energético pode ser minimizada pela produção de energia local com painéis solares. No entanto, no solstício de inverno verifica-se um fenómeno inverso, com um excesso de iluminação natural nas salas de aulas, nomeadamente na fachada sudoeste do edifício.

Visto tratar-se de um edifício histórico com restrições de alteração da sua envolvente (cobertura e fachadas), seria preferível optar por estores de lâminas orientáveis aplicados pelo interior, maximizando assim o aproveitamento da iluminância e refletindo para o exterior o excesso de iluminação natural. No entanto, a escolha do dispositivo de sombreamento mais adequado carece de uma análise mais detalhada para os diversos períodos do ano. Pelo que serão também testadas várias soluções de sombreamento nos modelos computacionais, verificando qual o mais aconselhado para o edifício em estudo. A análise será complementada mediante medição dos níveis de iluminância nos espaços interiores com recurso a um luxímetro para avaliar as condições reais de iluminação natural.

Para desenvolvimento futuro, este projeto pretende realizar análises numéricas de temperatura interior, avaliando o conforto térmico das salas de aulas. Os valores destas análises serão comparados com os valores obtidos pelos sensores de temperatura ambiente instalados no edifício, validando assim o modelo numérico. Adicionalmente, poderão ser realizados questionários de conforto ambiental (térmico, acústico, visual) aos utilizadores do edifício para adequar a reabilitação às suas necessidades. Por fim, com base na análise das condições de conforto interior atual, pretende-se projetar soluções de reabilitação resilientes e adaptadas às alterações climáticas num contexto de reabilitação.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores Maria Manso, Elói Figueiredo e Vítor Antunes agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

7 REFERÊNCIAS

Autodesk (2024). Revit. Disponível em: https://www.autodesk.com/pt (acedido a 15.07.2024).

CEN (2021). EN 12464-1:2021. Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.

Davidson, S. (2024). Grasshoper. Disponível em: https://www.grasshopper3d.com/ (acedido a 15.07.2024).

DIRETIVA (UE) 2024/1275 do parlamento europeu e do concelho (2024). Relativa ao desempenho energético dos edifícios. http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj

EnergyPlus (2024). Disponível em: https://energyplus.net/ (acedido a 15.07.2024).

Garcia, M.S., Oliveira, I.C.F., Souza, R.B.G., Reis, I.A. (2021). Eficiência energética e conforto térmico em edifícios universitários: a importância de uma perspetiva integrada para a adaptação aos novos tempos. Revista da UFMG, Belo Horizonte, 28(1):148–179. https://doi.org/10.35699/2316-770X.2021.26714

Henriques, G. C., Duarte, J. P., & Leal, V. (2012). Strategies to control daylight in a responsive skylight system. Automation in Construction, Elsevier, 28, 91–105. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.002

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. https://doi:10.1017/9781009325844

Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., Sariyildiz, S., & Suganthan, P. N. (2016). Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. In 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC2016 (pp. 3917-3924). IEEE. https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7744286

Ladybug Tools. (2024). Ladybug Tools. Disponível em: https://www.ladybug.tools/ladybug.html (acedido a 15.07.2024).

Mateus, D., Duarte, J.P., & Romão, L. (2021). Energy-Based Design: A Digital Design System for the Design of Energy-Harvesting Building Envelopes. In P. Gomez & F. Braida (Eds.), SIGraDi 2021, XXV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (pp. 831-842). Blucher Design Proceedings.https://doi.org/10.5151/sigradi2021-90

Pinto, M., Almeida, R.M.S.F., Pinho, P.G., Lemos, L.T. (2013). Caracterização da iluminância em salas de aula de escolas da cidade de Viseu. In Repositório Científico do Instituto Politécnico de Viseu, Universidade da Beira Interior (Ed.), ICEUBI 2013, International Conference on Engineering, Engineering for Economic Development. https://api.core.ac.uk/oai/oai:repositorio.ipv.pt:10400.19/2407

Robert McNeel & Associates. (2024). Rhinoceros. Disponível em https://www.rhino3d.com/ (acedido a 15.07.2024).

Vazquez, E., Duarte, J., & Poerschke, U. (2020). Masonry screen walls: a digital framework for design generation and environmental performance optimization. Architectural Science Review, https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1749552

Venâncio, R. (2020). Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. Ambiente Construído, 20(4):59-77. https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400460

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PLUMAS TÉRMICAS EM RADIADORES: PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE ENSAIOS DE FUMO À ESCALA REAL

Rafaela Mateus[a,b], Armando Pinto[b], José M. C. Pereira[a]

[a]LAETA, IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica/LASEF, Av.Rovisco Pais, 1, Lisboa, 1049-001, Portugal, rafaela.mateus@tecnico.ulisboa.pt, jose.chaves@tecnico.ulisboa.pt

[b]NAICI, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Av. do Brasil 101, 1700-075 Lisboa, Portugal, apinto@lnec.pt

RESUMO

O estudo da transferência de calor por convecção natural é essencial na engenharia, nomeadamente em sistemas de aquecimento e ventilação de edifícios. Avanços significativos foram feitos na simulação, avaliação experimental e controlo da ventilação natural. Uma estratégia comum para promover a ventilação é usar radiadores para aproveitar o efeito de chaminé proporcionado pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior. Caracterizar as plumas térmicas geradas por esses radiadores é crucial para prever o escoamento do ar no interior do espaço, e para otimizar a transmissão de calor e a ventilação. Este trabalho incide no processamento de imagens e vídeos captados em ensaios experimentais de fumo em modelos à escala real, que são utilizados para caracterizar a evolução de plumas térmicas e visualizar padrões de escoamento. O estudo explora parâmetros de filtragem e separação do fumo, bem como as estimativas de concentrações e velocidade das partículas de fumo. Os resultados mostram a sensibilidade dos processos de filtragem e de separação a diferentes parâmetros e o impacto na estimativa das concentrações de velocidades do fumo. A metodologia demonstra versatilidade e eficácia para aplicações em diferentes contextos experimentais.

Palavras-chave: Transferência de calor, Convecção natural, Plumas térmicas, Fontes de fumo, Processamento de imagem.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da transferência de calor por convecção natural é essencial em várias áreas da engenharia, nomeadamente em aquecimento, ventilação de edifícios e processos de transmissão de calor. Ao longo dos anos, foram registados avanços significativos no campo da ventilação natural (VN) (Carrilho da Graça e Linden 2016; Etheridge 2015). A utilização das plumas térmicas para promover a VN pode oferecer soluções eficientes para edifícios de grande volume (Y. Liu et al. 2020; Mateus, Pereira, e Pinto 2023).

O estudo de fontes de calor, como radiadores são focados na melhoria da eficiência energética e em garantir uma distribuição adequada do ar (Gomes 2013; Turner 1979; Wang et al. 2020). Para tal a compreensão do desenvolvimento das plumas térmicas é essencial para otimizar o aquecimento (Hernández 2015). A literatura concentra-se maioritariamente nos aspetos associados à geometria dos radiadores (Aydar e Ekmekçi 2012; Calisir e Baskaya 2021; Calisir, Yazar, e Baskaya 2019, 2021; Ekmekci e Aydar 2016; Myhren e Holmberg 2011; Rahmati e Gheibi 2020; Q. Wu et al. 2021), existindo uma lacuna na exploração da dinâmica do escoamento interno em espaços equipados com fontes de calor em escala real (Brandl et al. 2021; Calisir et al. 2016; Ganesh, Lata, e Nath 2020). A utilização de substâncias corantes, como fontes de fumo colorido, em ensaios experimentais, amplia as capacidades de visualização dos padrões de escoamento, permitindo uma análise mais detalhada da evolução temporal e espacial dessas plumas. Geralmente, esses padrões são registados por câmaras e exigem processamento de imagem posterior.

No processamento de imagens, a etapa de separação, é crucial para isolar regiões de interesse e remover o fundo, visando aprimorar a qualidade da região isolada e reduzir o ruído (Canales et al. 2024; Karthick et al. 2023). Diversas abordagens, como algoritmos genéticos, fusão de cor e profundidade, e cluster *fuzzy do kernel*, têm sido desenvolvidas para lidar com esses desafios (Canales et al. 2024; L. Chen, Zhao, e Zhang 2022; Karthick et al. 2023; B. Lu et al. 2023; Y. Lu et al. 2023; Mengíbar-Rodríguez e Chamorro-Martínez 2022; Oprisescu, Coliban, e Ivanovici 2022; Zhao e Du 2023). No domínio do processamento de imagens de fumo, a segmentação enfrenta desafios específicos devido à característica semitransparente e à variação associada ao fumo (Y. Li et al. 2022; Yuan et al. 2023), e vários estudos exploraram métodos de segmentação, com aprendizagem *semi-supervised*, redes neurais, modelos baseados em redes adversárias generativas para separação em tempo real de fumo (H. Li et al. 2024; Y. Li et al. 2022; Sun, Wen, e Li 2022; Yuan et al. 2023).

Para segmentar as áreas de interesse em imagens, podem ser utilizadas diferentes técnicas. Isso inclui o color *thresholding segmentation*, que utiliza limiares de cor para separar regiões. O *edge detection and segmentation* destaca bordas ou contornos distintivos numa imagem, enquanto o *Adaptive k-means clustering* oferece uma abordagem dinâmica para a segmentação de dados visuais (Aleksi, Hocenski, e Kraus 2018; Marmanis et al. 2018; Vijayan, Subramaniam, e Sathiyasekar 2024). No processamento de vídeos, a técnica de *object motion detection* é aplicada para identificar o movimento dos objetos, com diversas abordagens, incluindo *Frame Differencing, Optical Flow* e *Background Models* (Babu e Parthasarathy 2022; Chacon-Murguia e Ramirez-Alonso 2015; Huang et al. 2023; D. Liu et al. 2020; H. Wu e Liu 2022; H. Zhang et al. 2022; Y. Zhang et al. 2018). Adicionalmente, o *object motion tracking* é utilizado para monitorizar e registar a movimentação contínua de um objeto na cena, fornecendo informações detalhadas sobre sua posição, velocidade e direção (S. Chen et al. 2023; Qiu et al. 2020; Yu et al. 2020).

Dadas as necessidades de estudar a visualização de padrões de escoamento em grandes espaços com ventilação natural em escala real, este estudo incidiu no processamento de imagens e vídeos captados em ensaios experimentais de fumo em modelos à escala real, que são utilizadas para caracterizar a evolução de plumas térmicas devidas à convecção natural em dois radiadores. O estudo integra uma possível conversão de dados RGB para HSV e a segmentação da matriz de pixéis com filtros para separar as zonas do fumo colorido, bem como um tratamento dos dados que auxilie na estimativa de concentrações de fumo e velocidades de escoamento.

2 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A metodologia do processamento de imagem para análise das plumas térmicas tem duas partes. Na primeira parte, designada por "Análise de Fotografias", várias fotografias (formato .jpg) são analisadas de acordo com o esquema da Figura 1-a, incluindo uma etapa de estudo de mapas de cor RGB versus HSV e o teste de vários parâmetros para a separação das zonas de cor, filtragem e cálculo das concentrações. Na etapa de separação, as áreas correspondentes a gamas/faixas de cores predefinidas são identificadas e isoladas no espaço RGB e HSV, e são criadas as máscaras. Esta etapa é crucial para isolar as áreas das plumas térmicas. A etapa de filtragem de cor desempenha um papel essencial no ajuste da aparência global da imagem, visando melhorar a qualidade visual, reduzir o ruído e destacar características específicas. Esta pode ser realizada antes ou após a etapa de separação das zonas de cor, dependendo do objetivo e do tipo de imagem original. A análise qualitativa foi realizada para três momentos dos ensaios, utilizando a vista frontal aproximada. Na segunda parte, denominada por "Análise de vídeos", pretende-se examinar diversos vídeos disponíveis (no formato mp4) que representem escoamentos ascensionais típicos, utilizando partículas marcadoras, e avaliar diversos parâmetros relacionados à separação das áreas de cor, à filtragem de cada cor e ao cálculo dos tempos médios, distâncias e velocidades pertinentes, de acordo com o esquema da Figura 1-b. Nesse contexto,

o objetivo é determinar o intervalo de amostragem adequado entre as imagens processadas e verificar a viabilidade da realização dessa análise em tempo real.

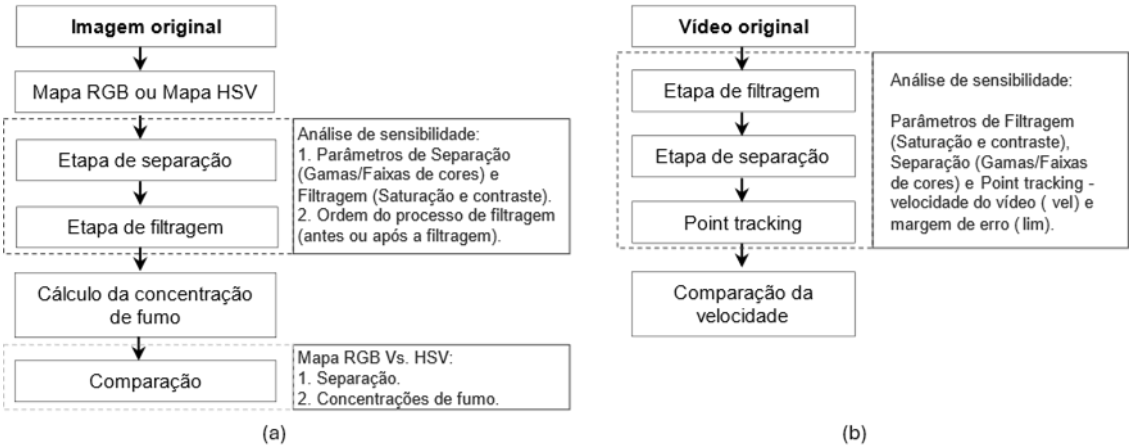


Figura 1 – Metodologia: (a) análise de fotografias e (b) análise de vídeos.

3 CASO DE ESTUDO

As imagens e vídeos das plumas térmicas utilizados neste estudo são resultados de um estudo experimental de um sistema de aquecimento cuja configuração é composta por vários componentes apresentados na Figura 2-a, destacam-se o termoacumulador e os dois radiadores, de alumínio fundido e extrudido com 8 elementos, na cor branca. O elemento de alumínio tem uma altura x largura x profundidade de 2000x80x95 mm^3 e um *heat output* para ΔT= 50°C de 321 W, determinada de acordo com a norma EN 442 (EN 442-2 2015). Na Figura 2-a, o circuito de água quente é representado a vermelho, o circuito de retorno a azul e o circuito de água fria a verde. Esta instalação está situada no LNEC, Lisboa, Portugal, numa sala de ensaio de aproximadamente 4 200 m^3, com condições ambientais não controladas. A relação altura da sala/altura do radiador é de 5.

Para os testes de fumo, foram utilizadas fontes técnicas de fumo de duas cores, vermelha e azul, para identificar a pluma térmica de cada radiador e as suas interações. Essas fontes de fumo têm dimensões de 120 x 50 x 50 mm^3 e uma duração média de 90 segundos, e foram posicionadas conforme os detalhes fornecidos na Figura 2-b. No processo de monitorização do ensaio foram utilizadas 3 câmaras para registar as plumas térmicas, com 60 fps, na vista frontal aproximada e total e na perspetiva aproximadamente isométrica. O estudo incluiu dois ensaios, em que no Ensaio 1 a velocidade inicial que caracteriza as fontes de fumo é de 0,95m/s e no Ensaio 2 é de 0,22m/s.

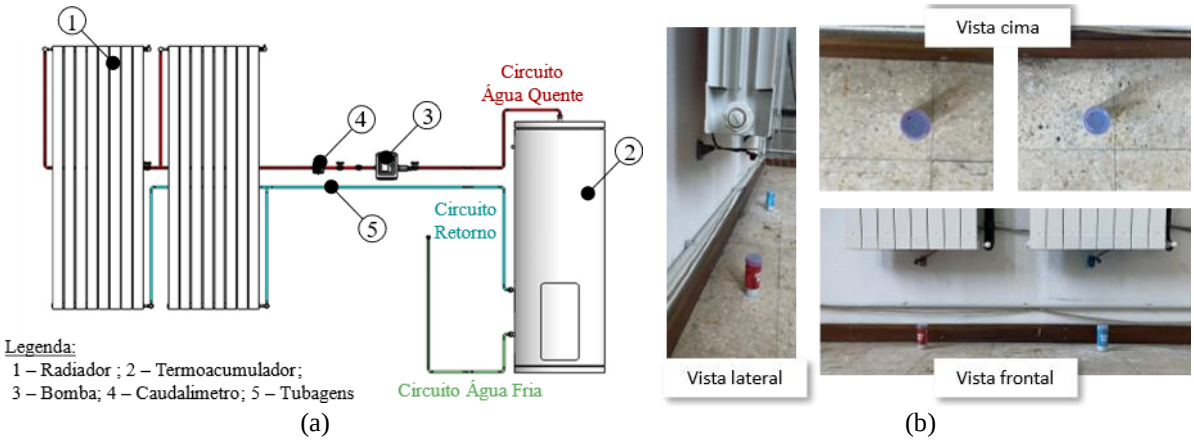


Figura 2 –Instalação experimental: (a) layout e (b) localização das fontes técnicas de fumo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE FOTOGRAFIAS

Na parte de análise de fotografias, foram consideradas as imagens resultantes dos ensaios experimentais, conduzindo a análise conforme ilustrado no esquema da Figura 1-a. Os cenários analisados estão detalhados no Quadro 1. O objetivo foi realizar uma análise comparativa entre a utilização de mapas RGB e HSV no processo de separação, visando estimar as concentrações de fumo. Optou-se pela color *thresholding segmentation*, devido à sua menor sensibilidade a limites complexos, variações de gradiente e ruído das imagens experimentais, em comparação à *edge detection*. A análise incluiu uma avaliação de sensibilidade, abrangendo diferentes parâmetros da etapa de separação para os mapas RGB e HSV (comparação dos cenários 1-2 e 5-6, respetivamente), da etapa de filtragem para os mapas RGB e HSV (comparação dos cenários 2-3 e 6-7, respetivamente) bem como a ordem das etapas de filtragem (comparação dos cenários 3-4 e 7-8, respetivamente), e limites para considerar um pixel RED ou BLUE no cálculo das concentrações (comparação dos cenários 7 e 9). Finalmente, a eficácia da utilização dos mapas RGB e HSV no processo de separação e estimativa das concentrações foi avaliada comparando os cenários 3 e 7 do Quadro 1.

Quadro 1 – Cenários da análise de fotografias.

Etapas	Variáveis			Cenários								
				RGB				HSV				
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
Separação	Faixa Inicial	RED=[70, 0, 0; 150, 60, 80], BLUE= [0, 0, 50; 80, 120, 150]	RED=[0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1]; BLUE= [0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2]	•				•				
	Faixa Ref.	RED=[60, 0, 0; 255, 60, 90], [210, 110, 130; 240, 180, 190] [110, 30, 60; 190, 100, 150], [0, 0, 0; 100, 40, 20], [170, 80, 90; 210, 150,160]; BLUE=[0, 0, 50; 80, 130, 225], [0, 0, 30; 90, 40, 60], [70, 40, 120; 120, 150, 220], [90, 80, 90; 150, 110, 220], [130, 70, 190; 190, 160, 220]	RED= [0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1], [0.85, 0.1, 0.55; 1, 0.9, 1], [0, 0.4, 0; 0.05, 1, 1]; BLUE=[0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2], [0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95], [0.4, 0.1, 0.2; 0.7, 1, 0.3], [0.65, 0.65, 0.4; 0.9, 0.8, 0.5]		•	•	•		•	•	•	•
Filtragem	Antes	(sat, c1, c2)=(1.5, 0.025, 0.85)	(sat, c1, c2)=(1.5, 0.025, 0.85)	•	•			•	•			
		(sat, c1, c2)= (1.2, 0.015, 0.9)	(sat, c1, c2)= (1.2, 0.015, 0.9)			•				•		•
	Após	(sat, c1, c2)= (1.2, 0.015, 0.9)	(sat, c1, c2)= (1.2, 0.015, 0.9)				•				•	
Cálculo da Concentração	Lim.1	0.1	0.1	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Lim.2	-	0.5									•

* Extremos de um intervalo de cores RGB [min.; max.]; **Extremos de um intervalo de cores HSV [min.; max.].

A análise qualitativa foi realizada para três momentos dos ensaios, utilizando a vista frontal aproximada como referência. Os resultados dos Cenários 1 a 4, com os mapas RGB, são mostrados na Figura 3, enquanto os resultados dos Cenários 5 a 8, com os mapas HSV, são apresentados na Figura 4.

Na etapa de separação, foram analisados os cenários 1 e 2 para os mapas RGB e os cenários 5 e 6 para os mapas HSV. Com o aumento das faixas de cores, foi abrangida uma gama mais ampla de tons, incluindo tons intermédios de rosa e roxo nos mapas RGB. Nos mapas HSV, a inclusão das zonas de mistura foi mais eficiente. As diferenças entre os ensaios foram mínimas, permitindo a aplicação das mesmas faixas para ambos. As discrepâncias na separação foram destacadas com círculos amarelos. Na etapa de filtragem, foram examinadas duas variações nos valores de saturação e contraste. Nos mapas RGB, a comparação entre os Cenários 2 e 3 revelou sensibilidade aos resultados em relação a essas variáveis. No Cenário 3, com menor saturação e maior contraste, observou-se uma separação mais eficiente do fumo na pluma térmica, incluindo na zona de mistura e nos tons mais claros do fumo RED para o Ensaio 1. No Ensaio 2, houve uma melhoria, embora não tão significativa. As principais diferenças na etapa de filtragem foram destacadas com círculos verdes. Nos mapas HSV, a comparação

entre os Cenários 6 e 7 revelou que a etapa de separação foi pouco sensível às alterações desses parâmetros para ambos os ensaios.

Para determinar a ordem mais eficaz da etapa de filtragem em relação à etapa de separação, foram comparados os cenários 3 (antes) e 4 (após) para os mapas RGB, e os cenários 7 (antes) e 8 (após) para os mapas HSV. Em ambos o caso, observou-se que a separação antes da filtragem permitiu uma separação mais eficiente do fumo na pluma térmica. As maiores diferenças foram notadas nos 1º e 2º momentos dos Ensaios 1 e 2 para os mapas RGB, e no 3º momento do Ensaio 2 para os mapas HSV. O que indica que nesta abordagem de separação de fumo, a filtragem deve ser realizada antes da etapa de separação. Em relação aos limites para classificar um pixel como "RED" ou "BLUE" no cálculo da estimativa das concentrações nos mapas RGB, foram consideradas duas variações. Na Figura 5 observou-se sensibilidade ao valor do limite: um limite mais alto (Cenários 9) resultou em determinações menos eficientes, enquanto um limite de 0,1 (Cenário 7) produziu estimativas mais precisas, contudo verificou-se que não é necessário ajustar este limite entre ensaios. A análise da eficácia da utilização dos mapas RGB e HSV no processo de separação e estimativa das concentrações (cenários 3 vs. 7) demonstrou que os mapas HSV foram mais eficazes na separação do fumo, resultando em estimativas mais completas de concentração, com menos falhas em comparação com os mapas RGB, as diferenças foram assinaladas com círculos amarelos na Figura 5. A Figura 6 demonstra a versatilidade do processo de filtragem, separação e estimativa de concentrações em diferentes ensaios e perspetivas de imagens para o Ensaio 2. A análise qualitativa revela que, independentemente do ângulo de filmagem, o processo opera de forma eficaz, permitindo obter as estimativas de concentrações.

Além da avaliação qualitativa anterior, uma avaliação quantitativa foi conduzida, calculando a distância Euclidiana entre os pixels correspondentes das imagens originais. Os resultados confirmam o impacto significativo do ajuste das faixas, com variações na similaridade conforme apresentado no Quadro 2. A decisão de realizar a filtragem antes ou após a separação teve maior impacto nos mapas RGB do que nos mapas HSV, com valores de similaridade variando de acordo. Além disso, a filtragem antes da separação demonstrou vantagens em termos de tempo de execução. Embora a análise qualitativa tenha revelado diferenças mais visíveis na separação em "RED" e "BLUE" entre o uso dos mapas RGB e HSV, as diferenças quantitativas não foram tão marcantes.

Quadro 2 – Valores de similaridade entre cenários da análise de fotografias.

Cenários*	Ensaio 1			Ensaio 2		
	1º momento	2º momento	3º momento	1º momento	2º momento	3º momento
Cenário 1/ Cenário 2	0.91	0.85	0.84	0.88	0.82	0.77
Cenário 2/ Cenário 3	0.95	0.92	0.88	0.94	0.89	0.85
Cenário 3/ Cenário 4	0.95	0.91	0.93	0.93	0.89	0.93
Cenário 5/ Cenário 6	0.93	0.89	0.72	0.93	0.87	0.69
Cenário6/ Cenário 7	0.97	0.96	0.93	0.97	0.95	0.92
Cenário 7/ Cenário 8	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99	0.96
Cenário 3/ Cenário 7	0.94	0.94	0.90	0.93	0.89	0.90

*Escala de cores aplicada individualmente a cada linha do quadro: do vermelho ao verde, com valores máximos a vermelho, mínimos a verde e intermédios a amarelo (percentil de 50).

4.2 ANÁLISE DE VÍDEOS

Na parte de análise de vídeos, os vídeos capturados durante os ensaios experimentais foram avaliados conforme ilustrado na Figura 1-b e apresentados em diferentes cenários no Quadro 3. O objetivo principal foi analisar o intervalo de amostragem apropriado entre as imagens processadas, considerando a viabilidade da análise em tempo real. Para isso, foi utilizado o *object motion tracking*, incluindo as contribuições que resultaram da parte de Análise de Imagens. A análise de sensibilidade realizada, abrangeu diferentes parâmetros, como a etapa de filtragem (comparação dos cenários 1-3),

a separação das cores (comparação dos cenários 3-4), a margem de erro do *point tracking* (comparação dos cenários 4-5 e 7-8) e a velocidade do vídeo (comparação dos cenários 5-7). Por fim, a análise do intervalo de amostragem adequado entre as imagens processadas e a verificação da viabilidade da realização dessa análise em tempo real teve por base os Cenários 5 e Cenário 6 para diferentes taxas de amostragem (30 fps e 60 fps), e a possibilidade de aplicação a várias perspetivas de filmagem.

Quadro 3 – Cenários da análise de vídeos.

Etapas	Variáveis	Cenários							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Filtragem	(sat, cont)=(1,1)	•							
	(sat, cont)=(1.2,1.3)		•						
	(sat, cont)=(1.1,1.2)			•	•	•	•	•	•
Separação	Faixa RED=[0, 0, 0; 0.05, 1, 1], Faixa BLUE=[0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95];	•	•	•					
	Faixa RED=[0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1], [0.85, 0.1, 0.35; 1, 1, 1], [0, 0, 0; 0.05, 1, 1], Faixa BLUE=[0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2], [0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95], [0.4, 0.1, 0.2; 0.7, 1, 0.3], [0.65, 0.65, 0.4; 0.9, 0.8, 0.5]				•	•	•	•	•
Rastreamento dos pontos	(lim,vel)=(50,1x)	•	•	•	•				
	(lim,vel)=(5,1x)					•			
	(lim,vel)=(5,0.5x)						•		
	(lim,vel)=(5,0.3x)							•	
	(lim,vel)=(1.25,0.3x)								•

Na análise foram utilizados vídeos de 10 segundos para cada um dos Ensaios 1 e 2, divididos em duas partes: inicial (Parte 1) e desenvolvida (Parte 2) da pluma térmica. A comparação foi feita usando *frames* de vista frontal aproximada como referência principal. Na etapa de filtragem, três variações nas configurações de saturação e contraste foram exploradas, resultando nos Cenários 1 a 3 para cada ensaio. O Cenário 2 apresentou saturação e contraste superiores ao Cenário 1, enquanto o Cenário 3 teve valores inferiores ao Cenário 2, mas superiores ao Cenário 1. Aumentar significativamente a saturação e o contraste resultaram em menor filtragem do fumo "RED" e "BLUE", enquanto os parâmetros do Cenário 3 realçaram o fumo "RED" sem comprometer a separação, conforme exibido na Figura 7. Na etapa de separação, foram exploradas duas variações nas faixas "RED" e "BLUE". O Cenário 3 tinha uma única faixa de cores para cada fumo, enquanto o Cenário 4 tinha múltiplas faixas. A inclusão da zona de mistura de fumos associados ao "RED" foi identificada na separação do Cenário 4, mantendo-se consistente nos *frames* subsequentes de ambos os ensaios, como é visível na Figura 7.

Na etapa de rastreamento dos pontos correspondentes às partículas de fumo colorido, foi avaliada a sensibilidade aos parâmetros da margem de erro do *point tracking*. Foram consideradas três variações do parâmetro de margem de erro (*MaxBidirectionalError* do *vision.PointTracker*), comparando os cenários 4 e 5, e os cenários 7 e 8. Ambos os pares de cenários tinham a mesma velocidade, mas margens de erro distintas. Nos cenários 4 e 5, com velocidade de aquisição de vídeo original (1x), as margens de erro foram de 50 e 5, respetivamente, enquanto nos cenários 7 e 8, com velocidade reduzida (0.3x), as margens de erro foram de 5 e 1.25, respetivamente. A análise baseada na velocidade no ponto $[x,y]_{RED}$=[241.5,379.5] e $[x,y]_{BLUE}$=[391.5,375.5], mostrada na Figura 8, revela diferenças significativas na velocidade da faixa "RED" entre os cenários 4 e 5, com velocidades maiores em margens de erro menores. Nos cenários 7 e 8, observa-se o oposto, com velocidades menores em margens de erro menores, especialmente em velocidades de vídeo reduzidas. Recomenda-se o uso de margens de erro mais baixas (entre 5 e 1.25) para uma maior precisão na faixa "RED", sem comprometer a faixa "BLUE".

Em relação à velocidade do vídeo, observou-se que para a mesma margem de erro, a velocidade do ponto é consistente para a faixa "BLUE". Para a faixa "RED", a velocidade mais alta resulta em diferenças de cerca de 0.03 m/s, enquanto para velocidades reduzidas (0.5x e 0.3x), as variações são mínimas. Sugere-se o uso

de velocidades reduzidas, especialmente em torno de 0.5x e 0.3x, para resultados mais precisos, especialmente para a faixa "RED". A comparação entre os cenários 5 e 6 permitiu verificar a influência do intervalo de amostragem (30 fps e 60 fps) no rastreamento de pontos. Observou-se que, para a faixa "BLUE", não houve diferença significativa na velocidade de rastreamento com a alteração do intervalo. Porém, para a faixa "RED", uma taxa de amostragem de 60 fps resultou em velocidades mais altas em comparação com 30 fps, independentemente da velocidade do vídeo. Isso sugere que uma taxa de amostragem mais alta pode melhorar a precisão do rastreamento para a faixa "RED". No entanto, taxas de amostragem mais altas podem exigir mais recursos computacionais, o que pode afetar o processamento em tempo real. Apesar de as comparações terem sido feitas a 30 fps é possível com recursos tecnológicos mais robustos realizar análises em tempo real com taxas de amostragem mais altas.

Por fim, na Figura 9 demostra-se a capacidade de rastreamento simultâneo de vários pontos. Esta característica evidencia a sua versatilidade aplicada aos vídeos de separação do Cenário 6 para o Ensaio 2 Parte 2. Pela análise dos resultados é notório que na região mais próxima do radiador (ponto P1) houve uma velocidade superior, enquanto as regiões de menor velocidade (ponto P3) correspondem às zonas da pluma mais próximas da cobertura, tanto para a faixa "RED" quanto para a faixa "BLUE" do fumo na pluma térmica.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, uma abordagem de processamento de imagem foi adotada para analisar os resultados experimentais de dois ensaios, utilizando fumos coloridos para visualizar o desenvolvimento de plumas térmicas sobre radiadores. A metodologia implementada foi dividida em duas partes: a parte de análise de fotografias e a parte de análise de vídeos dos resultados experimentais.

Na análise de fotografias, considerando 9 cenários distintos, as principais conclusões foram a sensibilidade aos valores das gamas/faixas "RED" e "BLU" na etapa de separação, a maior sensibilidade às alterações de saturação e contraste nos mapas RGB na etapa de filtragem, a eficiência da filtragem antes da separação e a sensibilidade ao limite de classificação "RED" e "BLUE" na estimativa de concentrações, com resultados mais consistentes nos mapas HSV.

Na análise de vídeos, considerando 8 cenários distintos, as principais conclusões foram o impacto significativo dos ajustes de saturação e contraste na eficácia da filtragem, a influência do número de faixas de cores na separação, a sensibilidade à margem de erro no rastreamento de pontos, a importância do intervalo de amostragem na velocidade dos pontos e o potencial para análise em tempo real com taxa de 60 fps. A análise mostrou-se versátil, permitindo o rastreamento simultâneo de vários pontos e adaptando-se a diferentes ângulos de filmagem.

Com base nas conclusões do estudo, perspetivas futuras incluem explorar o impacto de variações nas condições ambientais na convecção natural e investigar configurações em diversos ambientes. Para aplicações mais gerais, propõe-se a otimização automática de parâmetros de processamento de imagem e a integração de técnicas de aprendizagem automática. Além disso, a metodologia pode ser aplicada na monitorização ambiental, incluindo deteção de poluentes e análise de padrões climáticos.

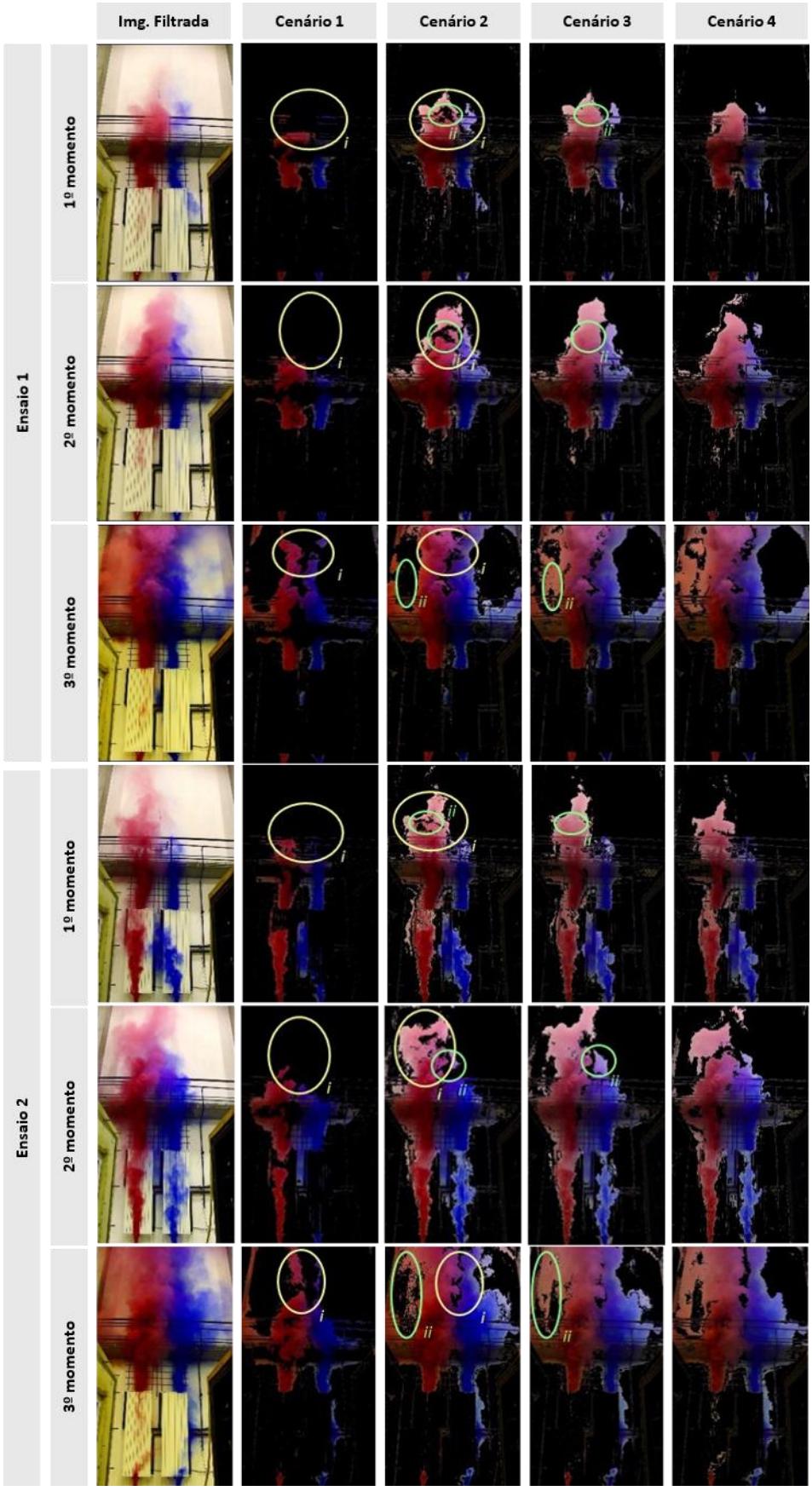


Figura 3 – Cenário 1 a 4 da análise de fotografias.

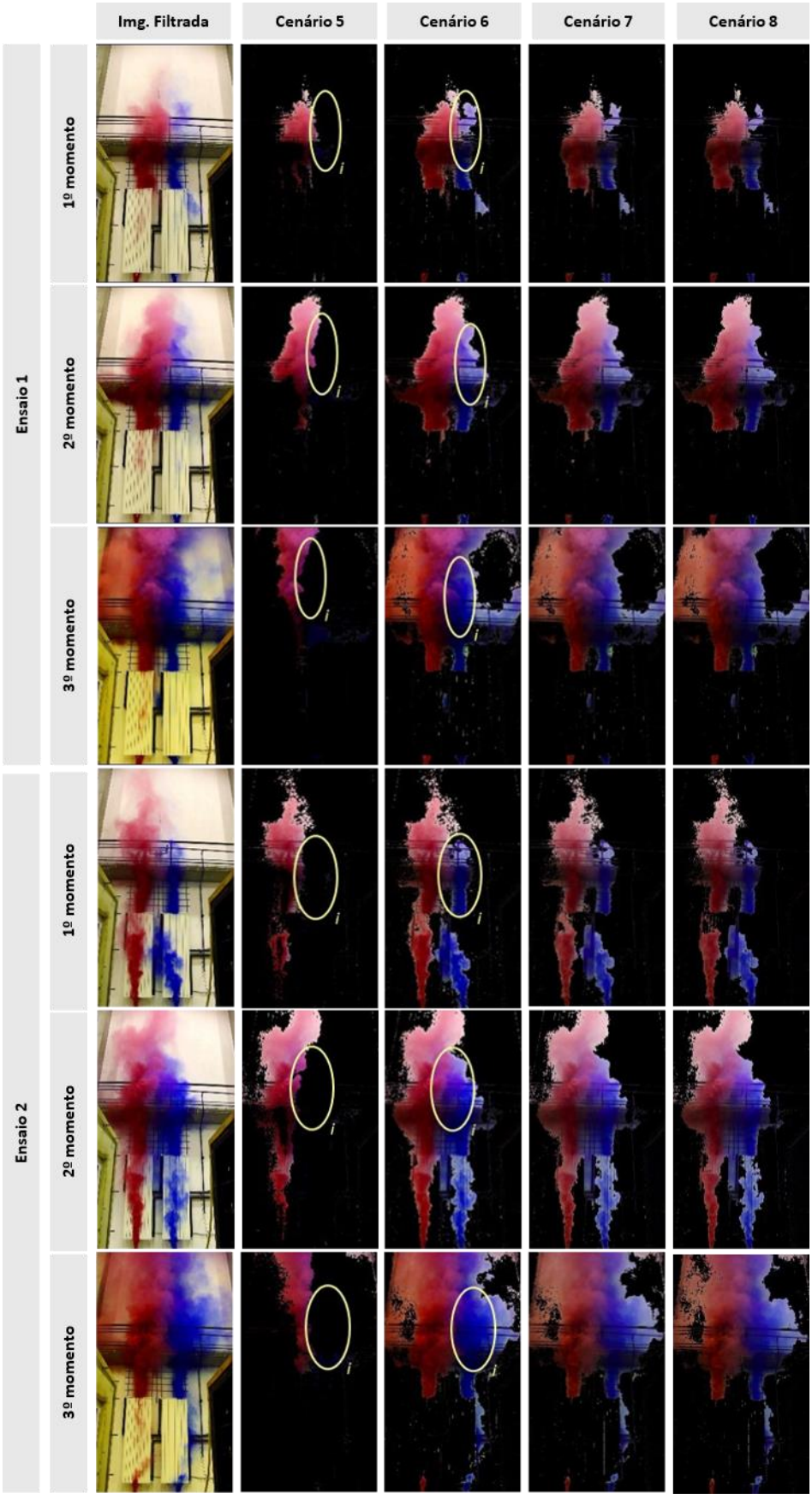


Figura 4 – Cenário 5 a 8 da análise de fotografias.

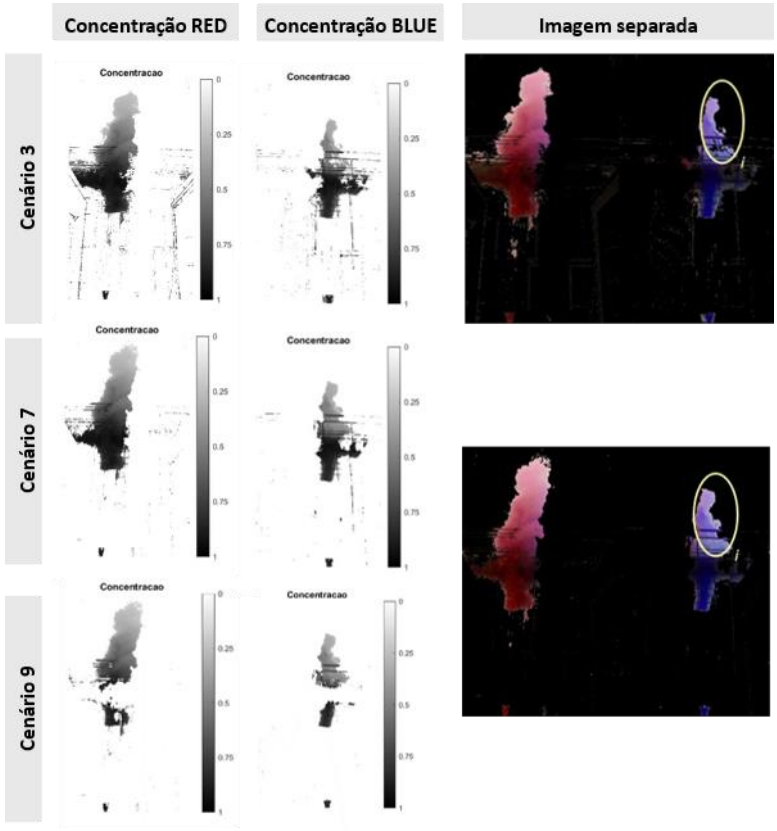


Figura 5 – Estimativa da concentração para o Ensaio 1 da análise de fotografias.

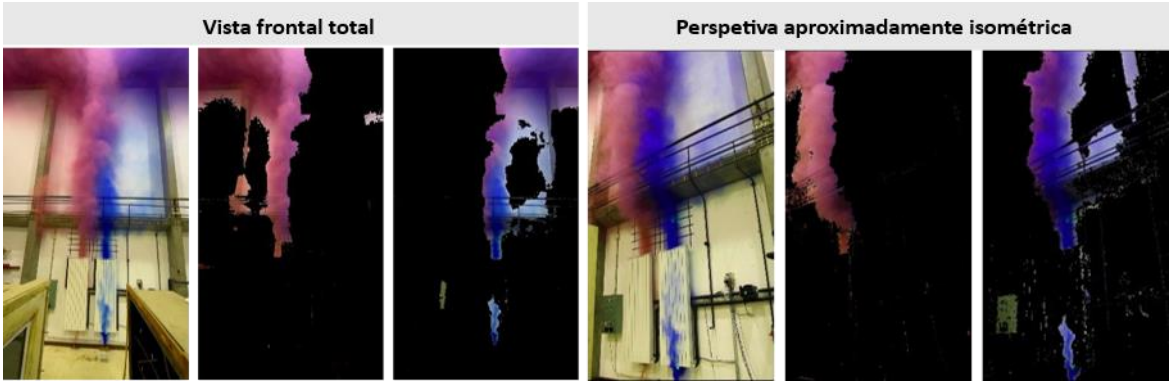
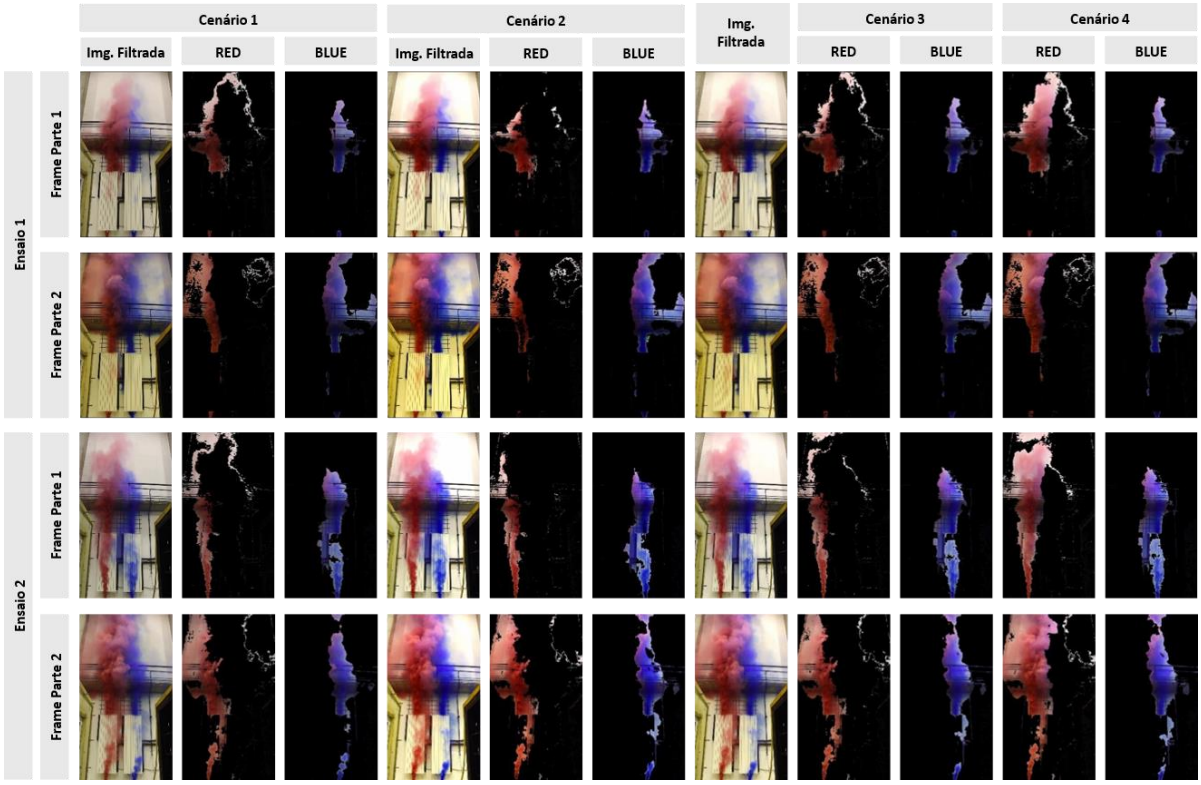


Figura 6 – Aplicação das etapas em diferentes vista e prespetiva para o Ensaio 2 da análise de fotografias.


Cenário 1
Cenário 2
Img. Filtrada
Cenário 3
Cenário 4
Img. Filtrada
RED
BLUE
Ensaio 1
Ensaio 2
Frame Parte 1
Frame Parte 2

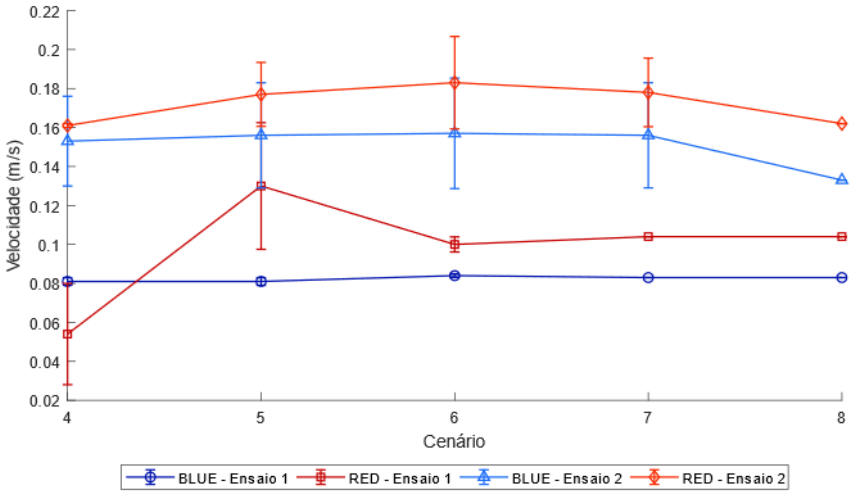


Figura 8 – Estimativa da velocidade no ponto $[x,y]_{RED}$=[241.5,379.5] e $[x,y]_{BLUE}$=[391.5,375.5] para os Cenários 4 a 8 do Ensaio 1 e Ensaio 2 da análise de vídeos.

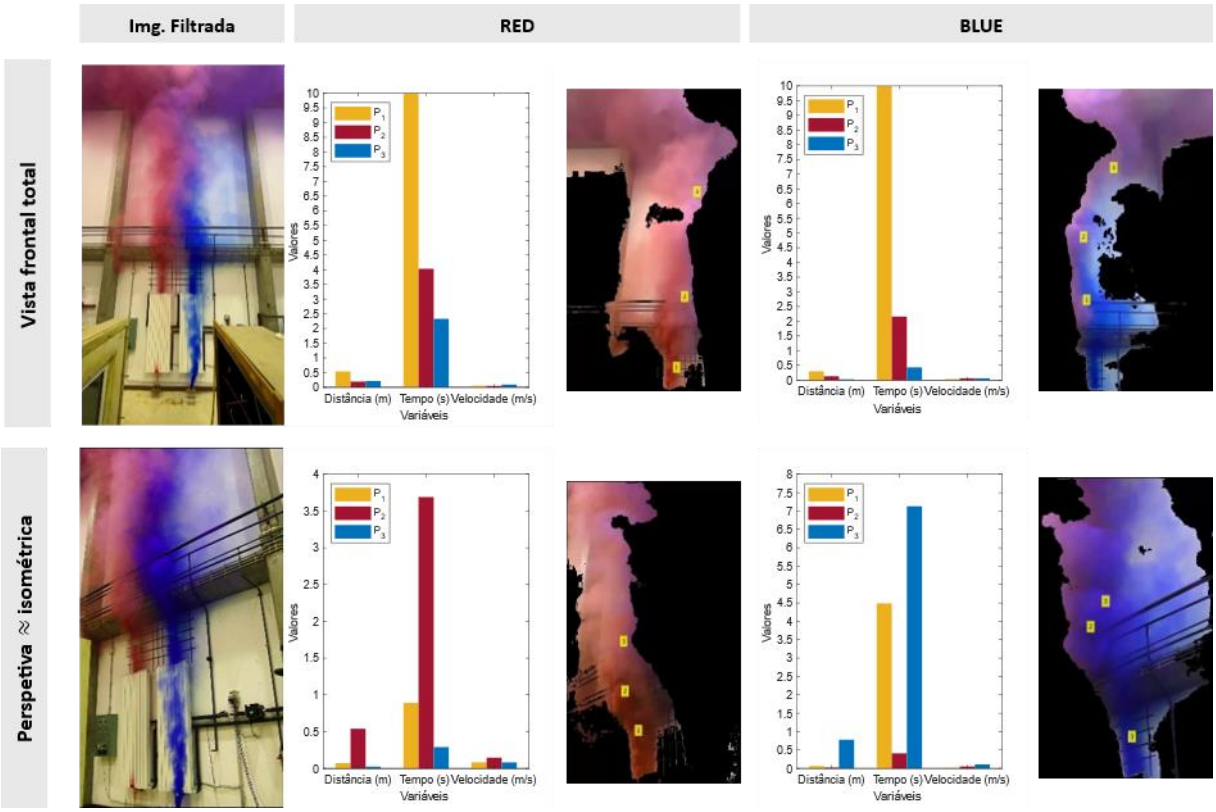


Figura 9 – Estimativa da velocidade para multiplos pontos em diferentes vista e prespetiva da análise de vídeos (cenário 6 do Ensaio 2 Parte 2).

REFERÊNCIAS

Aleksi, Ivan, Željko Hocenski, e Dieter Kraus. 2018. Real-time biscuit tile image segmentation method based on edge detection. *ISA Transactions* 76: 246–54.

Aydar, Emir, e Ismail Ekmekçi. 2012. Thermal efficiency estimation of the panel type radiators with CFD analysis. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology* 32 (2): 63–71.

Babu, Praveenkumar, e Eswaran Parthasarathy. 2022. FPGA implementation of multi-dimensional Kalman filter for object tracking and motion detection. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 33: 101084. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.101084.

Brandl, D et al. 2021. Thermal evaluation of a component heating system for a monastery cell with measurements and CFD simulations. *Journal of Building Engineering* 39 (February): 102264. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102264.

Calisir, Tamer, e Senol Baskaya. 2021. The influence of different geometrical dimensions of convectors on the heat transfer from panel radiators. *SN Applied Sciences* 3(3): 1–16. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04276-2.

Calisir, Tamer, Senol Baskaya, Hakan Onur Yazar, e Sinan Yucedag. 2016. Experimental and Numerical Prediction of Flow Field around a Panel Radiator. *Conference on Environment and Renewable Energy*.

Calisir, Tamer, Hakan O. Yazar, e Senol Baskaya. 2019. Thermal performance of PCCP panel radiators for different convector dimensions – An experimental and numerical study. *International Journal of Thermal Sciences* 137 (5): 375–87. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.007.

Calisir, Tamer, Hakan O Yazar, e Senol Baskaya. 2021. Evaluation of flow field over panel radiators to investigate the effect of different convector geometries. *Journal of Building Engineering* 33. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101600.

Canales, Jared Cervantes et al. 2024. Optimal segmentation of image datasets by genetic algorithms using color spaces. *Expert Systems With Applications* 238 (PD): 121950. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121950.

Carrilho da Graça, Guilherme, e Paul Linden. 2016. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. *Building and Environment* 107: 263–73. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007.

Chacon-Murguia, Mario I, e Graciela Ramirez-Alonso. 2015. Fuzzy-neural self-adapting background modeling with automatic motion analysis for dynamic object detection. *Applied Soft Computing Journal* 36: 570–77. http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.007.

Chen, Long, Yin-ping Zhao, e Chuanbin Zhang. 2022. Efficient kernel fuzzy clustering via random Fourier superpixel and graph prior for color image segmentation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 116 (August): 105335. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105335.

Chen, Siyuan et al. 2023. Novel learning framework for optimal multi-object video trajectory tracking. *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 5(5): 422–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.vrih.2023.04.001.

Ekmekci, İsmail, e Emir Aydar. 2016. A new design for panel radiators using CFD. *CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2016 – ICAME2016* (May).

EN 442-2. 2015. EN 442-2, Radiators and Convectors – Part 2: Test Methods and Rating. *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION*.

Etheridge, David. 2015. A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment* 91: 51–60. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033.

Ganesh, Ghogare Abhijeet, Shobha Lata, e Tikendra Nath. 2020. Numerical simulation for optimization of the indoor environment of an occupied office building using double-panel and ventilation

radiator. *Journal of Building Engineering* 29(December 2019): 101139. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101139.

Gomes, Maria. 2013. Avaliação das Taxas de Infiltração de Ar no Sector Residencial. *MSc Thesis - Universidade de Coimbra*.

Hernández, R. H. 2015. Natural convection in thermal plumes emerging from a single heat source. *International Journal of Thermal Sciences* 98: 81–89. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072915001751.

Huang, Kan et al. 2023. Motion Context guided Edge-preserving network for video salient object detection. *Expert Systems With Applications* 233(June): 120739. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120739.

Karthick, P et al. 2023. Investigations of color image segmentation based on connectivity measure , shape priority and normalized fuzzy graph cut. *Applied Soft Computing* 139: 110239. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110239.

Li, Haibin, Jiawei Qi, Yaqian Li, e Wenming Zhang. 2024. A dual-branch selection method with pseudo-label based self-training for semi-supervised smoke image segmentation. *Digital Signal Processing* 145: 104320. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104320.

Li, Yuming, Wei Zhang, Yanyan Liu, e Xiaorui Shao. 2022. A lightweight network for real-time smoke semantic segmentation based on dual paths. *Neurocomputing* 501: 258–69. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.026.

Liu, Dongfang et al. 2020. Video object detection for autonomous driving : Motion-aid feature calibration. *Neurocomputing* 409: 1–11. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.05.027.

Liu, Yanan et al. 2020. Effects of different types of entrances on natural ventilation in a subway station. *Tunnelling and Underground Space Technology* 105 (May): 103578. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103578.

Lu, Bo et al. 2023. Fusion-based color and depth image segmentation method for rocks on conveyor belt Standard Deviation of Saturation. *Minerals Engineering* 199(April).

Lu, Yujie et al. 2023. A deep learning method for building façade parsing utilizing improved SOLOv2 instance segmentation. *Energy & Buildings* 295 (1239): 113275. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113275.

Marmanis, D et al. 2018. Classification with an edge : Improving semantic image segmentation with boundary detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 135: 158–72. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.009.

Mateus, Rafaela, José M C Pereira, e Armando Pinto. 2023. Natural ventilation of large air masses : experimental and numerical techniques review. *Energy & Buildings*: 113120. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113120.

Mengíbar-Rodríguez, Míriam, e Jesús Chamorro-Martínez. 2022. An image-based approach for building fuzzy color spaces. *Information Sciences* 616: 577–92.

Myhren, Jonn Are, e Sture Holmberg. 2011. Improving the thermal performance of ventilation radiators e The role of internal convection fins. *International Journal of Thermal Sciences* 50(2): 115–23. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.10.011.

Oprisescu, Serban, Radu-mihai Coliban, e Mihai Ivanovici. 2022. Polarization-based optical

characterization for color texture analysis and segmentation. *Pattern Recognition Letters* 163: 74–81. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2022.09.019.

Qiu, Ji, Lide Wang, Yu Hen, e Yin Wang. 2020. Two motion models for improving video object tracking performance. *Computer Vision and Image Understanding* 195 (March): 102951. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2020.102951.

Rahmati, A. R., e A. Gheibi. 2020. Experimental and numerical analysis of a modified hot water radiator with improved performance. *International Journal of Thermal Sciences* 149. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106175.

Sun, Guangmin, Yuxuan Wen, e Yu Li. 2022. Instance segmentation using semi-supervised learning for fi re recognition. *Heliyon* 8(March).

Turner, John Stewart. 1979. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge university press.

Vijayan, Hima, M Subramaniam, e K Sathiyasekar. 2024. A-MKMC : An effective adaptive-based multilevel K-means clustering with optimal centroid selection using hybrid heuristic approach for handling the incomplete data. *Data & Knowledge Engineering* 150 (March 2023): 102243. https://doi.org/10.1016/j.datak.2023.102243.

Wang, Ying et al. 2020. Numerical study of an unsteady confined thermal plume under the influence of gas radiation. *International Journal of Thermal Sciences* 156. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106474.

Wu, Han, e Guizhong Liu. 2022. A dynamic infrared object tracking algorithm by frame differencing. *Infrared Physics and Technology* 127 (November 2021): 104384. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104384.

Wu, Qing, Zhaojun Wang, Jiankai Dong, e Jing Liu. 2021. A method for judging the overheating of the radiator in the compensation of window downdraught based on thermal image velocimetry. *Building and Environment* 197. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107858.

Yu, Hongyang et al. 2020. Conditional GAN based individual and global motion fusion for multiple object tracking in UAV videos. *Pattern Recognition Letters journal* 131: 219–26.

Yuan, Feiniu, Yu Shi, Lin Zhang, e Yuming Fang. 2023. A cross-scale mixed attention network for smoke segmentation. *Digital Signal Processing* 134: 103924. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.103924.

Zhang, Hongrui et al. 2022. A motion-appearance-aware network for object change detection. *Knowledge-Based Systems* 255: 109612. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109612.

Zhang, Yugui, Jin Zheng, Chi Zhang, e Bo Li. 2018. An effective motion object detection method using optical flow estimation under a moving camera. 55 (April): 215–28.

Zhao, Xiangjun, e Zhenlong Du. 2023. Video colorization with semantic preservation and consistency. *Computers and Electrical Engineering* 108 (62177028): 108697. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108697.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA INCIDENTE DE RISCO PARA ELEMENTOS CONSTRUTIVOS VERTICAIS EM PORTUGAL

Miguel Catarino Valente da Cruz[a]; Guilherme B. A. Coelho[b,c];

[a](Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal), mcv.cruz@campus.fct.unl.pt

[b](CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516, Portugal), g.coelho@fct.unl.pt

[c](Department of Built Environment, Faculty of Technology, Art and Design, Oslo Metropolitan University, PO box 4 St. Olavs plass, Oslo, NO-0130, Norway), coelho@oslomet.no

RESUMO

É expectável que a precipitação sofra alterações de periocidade e quantidade devido às alterações climáticas. Em Portugal, prevê-se que a quantidade de chuva diminuirá, mas os fenómenos de precipitação extrema terão tendência a aumentar, o que poderá originar problemas nos edifícios.

A chuva com componente do vento associada, denominada como chuva incidente, é a principal forma de como a humidade de precipitação afeta as fachadas dos edifícios. Desta forma, estudou-se qual a influência que a chuva incidente e a respetiva intensidade e recorrência têm nos revestimentos exteriores, com recurso ao software WUFI Pro. Com base numa revisão efetuada optou-se por estudar soluções construtivas de alvenaria de tijolo cerâmico, sendo ainda abordados rebocos exteriores térmicos. São utilizados dados horários do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, para as estações meteorológicas de Porto e Lisboa e para identificar os fenómenos de chuva incidente foi usada a metodologia da norma EN ISO 15927-3.

Conclui-se que os rebocos estudados estão aptos para a grande maioria do tempo, porém em casos de fenómenos extremos de precipitação, esses rebocos ficam com uma performance higrotérmica não favorável. Adicionalmente, verificou-se que aplicação de tintas no exterior não melhora significativamente a performance higrotérmica.

Palavras-chave: Edifícios; Eventos de chuva incidente; Performance higrotérmica; Humidade de precipitação; Dados meteorológicos medidos in situ; Alterações climáticas.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das paredes exteriores em Portugal Continental são geralmente revestidas com reboco tradicional, i.e. 84% (INE, 2013). Estes revestimentos são fundamentais para garantir a impermeabilização e regularização das envolventes opacas dos edifícios, garantindo a eficácia destes fatores pela aplicação de revestimentos ligantes minerais ou mistos, juntamente a aplicação de agregados água e adjuvantes. As argamassas aplicadas podem ter como ligante cimento, cal hidráulica ou cal aérea apagada, sendo que à aplicação de dois ligantes diferentes denomina-se argamassa bastarda. O agregado mais comumente usado é areia (Faria 1990).

Apesar dos rebocos tradicionais serem eficazes no seu desempenho desejado, surge a necessidade da aplicação de argamassas com outras caraterísticas, dado que as regulamentações europeias exigem uma maior resistência térmica das paredes exteriores e também devido à necessidade de aplicar materiais sustentáveis. São estudados no presente trabalhos rebocos térmicos (Maia et al. 2018, Posani et al. 2023) e rebocos com fibras adicionadas (Pedroso et al. 2023).

Para ser estudada a eficácia da impermeabilização dos rebocos, é necessário ter em conta o clima português atual e a tendência a que este está sujeito por consequência das alterações climáticas. Segundo Ali et al. (2023), atualmente o clima no Noroeste do Mediterrâneo (onde se encontra Portugal Continental) é caraterizado por: 1) aumento do calor extremo e pelo aumento de períodos de seca; 2) aumento ou diminuição da precipitação média consoante a localidade e o período a estudar; 3) aumento da precipitação forte e 4) o valor médio da velocidade do vento não sofreu alterações. De acordo com Ali *et al.* (2023), serão ainda futuramente observados aumentos no valor do calor extremo, dos períodos de seca e da chuva forte, enquanto se observarão diminuições no valor médio da precipitação anual e do valor médio do vento.

Dadas as alterações expectáveis do clima em Portugal, o estudo da eficácia das argamassas inovadoras torna-se imprescindível, uma vez que a diminuição do valor médio da precipitação e o aumento da precipitação forte induz a fenómenos de precipitação extrema, provocando uma migração de água mais acentuada, que induz à circulação de água pelo reboco exterior, até atingir a camada de suporte. Adicionalmente, é ainda estudado o efeito das características hígricas na performance destes sistemas através da simulação diferentes tintas (Coelho et al, 2023).

A chuva, juntamente com a ação do vento, cria o fenómeno de chuva incidente (Blocken & Carmeliet 2004), uma vez que a chuva ganha uma componente horizontal, que pode comprometer a performance higrotérmica dos elementos construtivos. Introduz-se o conceito de *spell*, que segundo a EN ISO 15927-3 é um período em que o risco de penetração de água da chuva pelos elementos construtivos verticais aumenta. Define-se o coeficiente de proteção à chuva incidente, C_{rp} (Blocken & Carmeliet 2004).

No presente trabalho será então estudada a performance higrotérmica de várias argamassas, tendo em conta o clima de Lisboa e o clima do Porto nos anos de 2015 a 2022 (IPMA 2024).

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 CLIMA

Uma vez que a chuva incidente depende da chuva e do vento, apresenta-se o estudo destes fatores em Lisboa e no Porto, tendo sido usados dados fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA 2024) referentes ao período compreendido entre 2015 a 2022.

2.1.1 VENTO

Na figura 1 estão representadas as rosas dos ventos com a intensidade e direção do vento no Porto (A) e em Lisboa (B). Como se pode observar, na cidade do Porto a direção do vento dá-se maioritariamente segundo Noroeste, por vezes com valores de velocidade do vento superiores a 11 m/s. Na cidade de Lisboa, o vento dá-se na grande parte dos casos segundo Norte, com velocidade do vento menos intensa comparativamente com a cidade do Porto. Note-se que na cidade do Porto, existem alguns casos em que o vento se dá na direção Este, mas esta não tem registo de velocidades do vento significativamente elevadas, contrariamente à direção predominante.

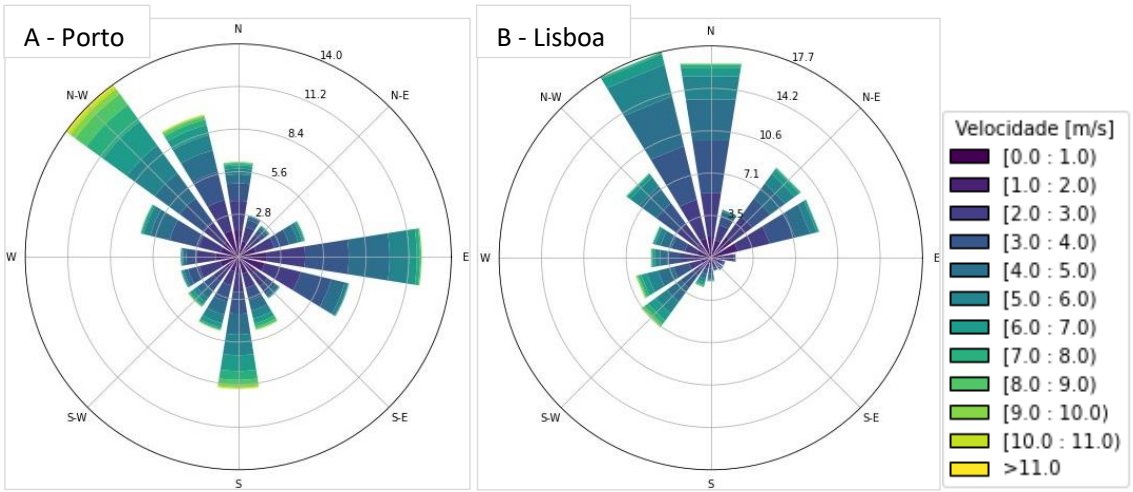


Figura 1 – Rosa dos Ventos com direção e intensidade do vento no Porto (A) e em Lisboa (B)

2.1.2 PRECIPITAÇÃO

Na tabela 1 encontram-se os valores da precipitação acumulada na cidade do Porto e na cidade de Lisboa, em cada ano. É percetível que na cidade de Lisboa os valores de precipitação acumulada são substancialmente menores que na cidade do Porto, e.g., em 2019 os valores de precipitação acumulada na cidade do Porto são de 1258 mm, enquanto em Lisboa registam-se valores de 482 mm. Entende-se ainda que, com o avanço do tempo, os valores de precipitação acumulada têm recorrentes subidas e descidas, tanto em Lisboa como no Porto, o que não permite entender se a precipitação média anual terá tendência a diminuir, como descrito por Ali *et al.* (2023).

Tabela 1 – Precipitação acumulada anual na cidade do Porto e na cidade de Lisboa

Precipitação acumulada (mm)		
Ano	Porto	Lisboa
2015	994	499
2016	1529	791
2017	816	495
2018	1253	773
2019	1258	482
2020	707	563
2021	797	428
2022	1323	772

2.1.3 CHUVA INCIDENTE

Como referido anteriormente (secção 1), a chuva incidente é a precipitação que, através do vento, ganha uma direção segundo um vetor obliquo (Blocken & Carmeliet 2004). Segundo a EN ISO 15927-3, o *spell* é um fenómeno de precipitação em que a chuva incidente tem elevado risco de penetração na parede de alvenaria, i.e., um intervalo entre dois *spells* corresponde ao período de 96 horas em que:

$$v * r^{8/9} * \cos(D - \theta) \leq 0 \quad (1)$$

Sendo *v* o valor médio do vento horário, em m/s; *r* o valor horário total da precipitação, em mm; *D* a direção média do vento a partir do Norte, em ° e θ a direção da parede a partir do Norte, em °.

Tendo em conta as possíveis diferentes orientações das paredes (θ), na figura 2 apresentam-se a intensidade média anual de chuva incidente, segundo cada orientação. Entende-se que a intensidade é ligeiramente superior no Porto que em Lisboa, registando-se maior intensidade, no Porto, a Sul e em Lisboa, a Sudoeste.

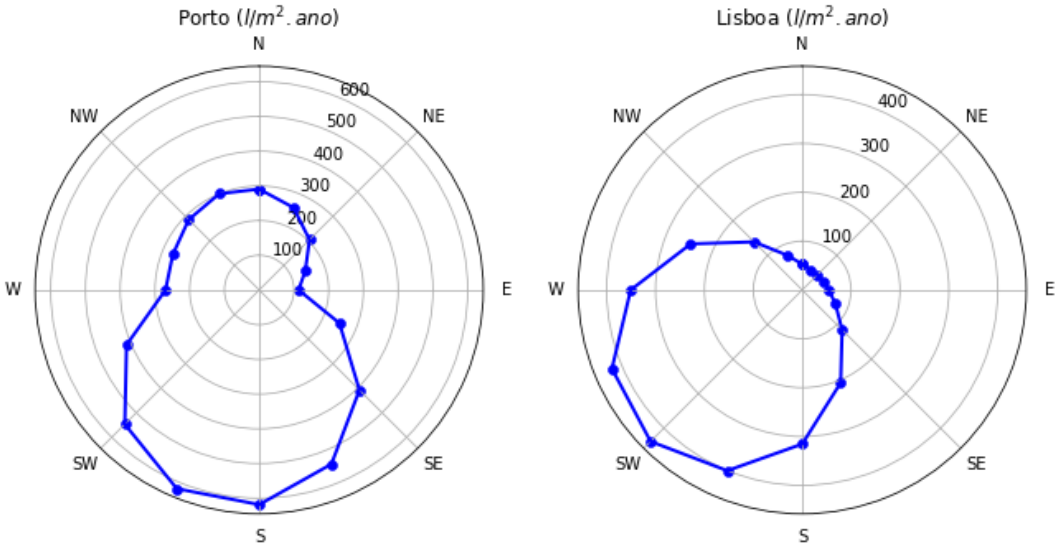


Figura 2 – Rosetas com intensidade de eventos *spell* na cidade do Porto e na cidade de Lisboa

2.2 MATERIAIS E MODELOS

2.2.1 MATERIAIS

Neste trabalho são abordados quatro rebocos térmicos que se apresentam na tabela 2, aplicados ao mesmo material de suporte, um tijolo cerâmico maciço, AL (WUFI®Pro). Ainda se apresentam nesse quadro o reboco interior e a última camada do reboco exterior, de cal aérea e cimento.

Neste caso os rebocos térmicos TR1 e TR2 têm em comum o uso de EPS como agregado, alterando apenas o ligante, enquanto TR3 e TR4 têm ambas o cimento como ligante e como agregado aerogel, porém existe uma adição de fibras de sisal na argamassa TR4.

Para estudar a performance higrotérmica de cada sistema é importante referir as caraterísticas de cada material que faz parte dos modelos de testagem das soluções construtivas. Na tabela 3 são apresentadas as caraterísticas fundamentais da cada um dos materiais anteriormente referidos.

Tabela 2 – Rebocos estudados

Nomenclatura	Argamassa (Ligante e Agregado)	Referência
TR1	Argamassa de ligante misto e EPS	Maia *et al.* 2018
TR2	Argamassa de cal aérea e EPS	Posani *et al.* 2023
TR3	Argamassa de cimento e aerogel	Pedroso *et al.* 2023
TR4	Argamassa de cimento e aerogel com fibras de sisal	Pedroso *et al.* 2023
B1	Argamassa bastarda e areia	WUFI®Pro
C1	Argamassa de gesso e areia	WUFI®Pro

Tabela 3 – Massa volúmica aparente, porosidade, calor específico, condutibilidade térmica, teor de água de referência e limite de saturação de cada material

Material	Massa Volúmica Aparente	Porosidade	Calor Específico	Condutibilidade térmica	Teor de água referência (w_{80})	Teor de água saturado (f)
	[kg/m³]	[%]	[J/kgK]	[W/mK]	[kg/m³]	[kg/m³]
AL	1900,0	24,0	850	0,60	18,0	190
B1	1900,0	24,0	850	0,80	45,0	210
C1	850,0	65,0	850	0,20	6,3	400
TR1	406,2	27,9	1000	0,08	9,5	279
TR2	342,3	28,8	920	0,03	14,3	66
TR3	158,7	86,7	930	0,03	7,8	281
TR4	160,3	86,9	895	0,03	7,3	260

Para avaliar a performance das argamassas a resistir aos fenómenos de chuva incidente, introduz-se o conceito de coeficiente de proteção da chuva incidente, C_{RP} (Künzel 2015) . Este coeficiente depende da espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d, m) e do coeficiente de capilaridade (A, kg/(m^{2}h$^{1/2}$)) das argamassas e é determinado por:

$$C_{RP} = A \; x \; S_d \tag{2}$$

Na tabela 4 apresentam-se os valores de A e de S_d para cada material, bem como a resistência à difusão de vapor de água.

Tabela 4 – Resistência à difusão de vapor de água, coeficiente de absorção capilar e espessura da camada de ar de difusão equivalente (para uma espessura de 0,04 m)

Materiais	Resistência à difusão de vapor de água (μ)	Coeficiente de absorção capilar (A)	Espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d)
	[-]	[kg/(m²s$^{1/2}$)]	[m]
AL	10,0	-	-
B1	19,0	0,017	-
C1	8,3	0,287	-
TR1	12,7	0,014	0,50
TR2	11,0	0,034	0,44
TR3	13,7	0,109	0,55
TR4	12,7	0,033	0,51

Segundo a norma alemã: 1) o valor de C_{RP} deve ser inferior a 0.2 kg/($m^2h^{1/2}$), 2) o valor de A não deve ser superior a 0.5 kg/(m.$h^{1/2}$) e 3) o valor de S_d não deve ser superior a 2 m, uma vez que dessa forma se previne a criação de condensações intersticiais (Künzel 2015). Na figura 3 encontram-se representadas nesta curva as argamassas TR1, TR2, TR3 e TR4, onde se percebe que a performance higrotérmica destas argamassas não será favorável, uma vez que ultrapassam o coeficiente de proteção da chuva incidente, comprometendo assim a impermeabilização dos elementos construtivos.

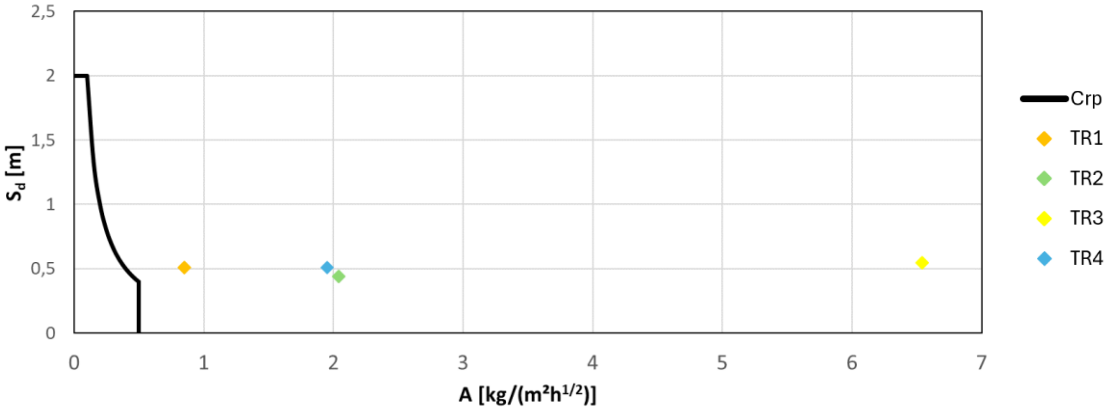


Figura 3 – Curva do limite desejável do coeficiente de proteção da chuva incidente

Foram testadas ainda duas tintas de revestimento exterior, apresentadas na tabela 5, com o objetivo de perceber a sua influência na performance higrotérmica das soluções construtivas mais críticas.

Tabela 5 – Caraterísticas das tintas

Nomenclatura	Material	S_d (m)	Referência
T1	Tinta Acrílica	0,20	BRS 573,430
T2	Tinta de Sílica	0,05	BRS 573,430

2.2.2 Modelo

O modelo de estudo dos rebocos exterior é igual em todos os casos, observando-se na figura 4 a representação desse mesmo modelo, com os diversos materiais, que seguem a seguinte legenda:

1. Reboco exterior, de argamassa bastarda (B1), com 0,3 cm de espessura;
2. Reboco térmico (TR1, TR2, TR3 ou TR4), com 4 cm de espessura;
3. Alvenaria de tijolo cerâmico maciço (AL), com 20 cm de espessura;
4. Reboco interior de Gesso (C1), com 2 cm de espessura.

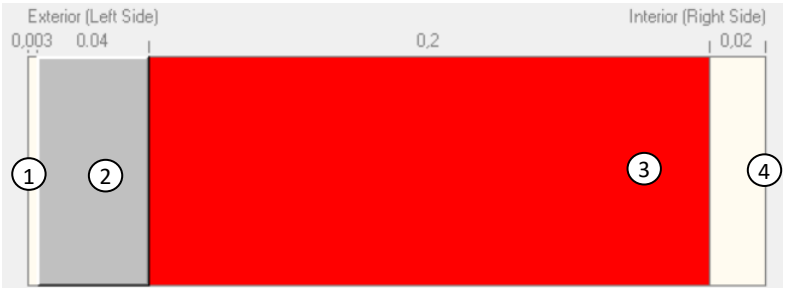


Figura 4 – Modelo de testagem das argamassas.

As simulações são compostas pelos seguintes materiais, do exterior para o interior, mudando apenas a camada de reboco térmico entre elas (TRX):

- Simulação 1 (S1): B1 + TR1 + AL + C1;
- Simulação 2 (S2): B1 + TR2 + AL + C1;
- Simulação 3 (S3): B1 + TR3 + AL + C1;
- Simulação 4 (S4): B1 + TR4 + AL + C1.

2.3 TESTAGEM DOS MODELOS

Para a testagem dos modelos, recorreu-se ao software WUFI®Pro, que permite ensaiar e analisar a respetiva performance higrotérmica. Definiram-se os modelos anteriormente apresentados, analisados com base nos ficheiros climáticos tanto para o Porto como para Lisboa.

Para entender a durabilidade dos rebocos referidos neste trabalho, deve-se ter em consideração o teor de humidade de cada elemento construtivo, sendo que a comparação deve ser feita perante a alvenaria de tijolo, dado que é o elemento que o reboco deve impermeabilizar, ou seja, caso o teor de humidade na alvenaria de tijolo seja elevado, o reboco tem uma má performance higrotérmica.

O software permite então obter os valores horários de teor de humidade em cada material e de temperatura e humidade relativa da solução construtiva, ao longo do período dos ficheiros climáticos (de 2015 a 2022). É, então, possível determinar os valores máximos do teor de humidade na alvenaria de tijolo, bem como o período em que a performance higrotérmica deixa de ser favorável.

Tendo em conta as condições iniciais de humidade relativa de 60% e de temperatura nos elementos construtivos de 20°C, são testadas as soluções construtivas segundo todas as orientações, afim de perceber qual a orientação mais crítica para cada cidade (Porto e Lisboa).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 5 é possível observar o valor máximo do teor de humidade para cada orientação para a camada de suporte, neste caso a alvenaria de tijolo, seguindo um esquema de cores apresentado na tabela 6, em que se observa o teor de humidade para a respetiva humidade relativa. Tendo em conta que para a humidade relativa de 60%, o teor de humidade do tijolo cerâmico é de 7,2 kg/m^3, entende-se que a boa performance higrotérmica do reboco é comprometida quando os valores de teor humidade da camada de suporte (alvenaria de tijolo) ultrapassam substancialmente esse valor.

Tabela 6 – Esquema de cores, tendo em conta o teor de humidade da camada de suporte.

HR	**Teor de humidade tijolo maciço** (kg/m^3)	**Cor**
60% - 70%	7,2 - 10,9	Verde
70% - 80%	10,9 - 18,0	Amarelo
80% - 90%	18,0 - 36,2	Laranja
>90%	>36,2	Vermelho

Na cidade de Lisboa os valores máximos do teor de humidade são substancialmente inferiores, comparativamente com a cidade o Porto (figura 5), notando-se que os valores máximos são obtidos segundo a direção Sudoeste em Lisboa, enquanto no Porto a direção em que se registam maiores valores é segundo Norte, estando em ambos os casos associados a um evento de chuva incidente de elevada intensidade. Note-se ainda que na cidade de Lisboa, a aplicação da argamassa TR1 não

compromete a impermeabilização da solução construtiva, uma vez que o valor máximo do teor de água na alvenaria é de 12,9 kg/m^3, que não é substancialmente superior a 7,2 kg/m^3. O mesmo se observa na aplicação da argamassa TR4, uma vez que em grande parte das orientações, o valor do teor de água não é consideravelmente superior a 7,2 kg/m^3.

Na cidade do Porto, por análise à figura 5, é percetível que a argamassa TR1 é a que tem a melhor performance higrotérmica uma vez que o valor do teor de humidade no suporte não é notavelmente superior a 7,2 kg/m^3, sendo o valor máximo 23,7 kg/m^3.

Note-se que os valores apresentados na figura 5 são valores máximos de teor de humidade na camada de suporte, sendo que por observação das figuras 6 e 7 entende-se que durante a grande maioria do tempo os rebocos estudados não comprometem a boa performance higrotérmica das paredes. A exceção dá-se apenas em certas ocasiões, associadas a fenómenos extremos de precipitação.

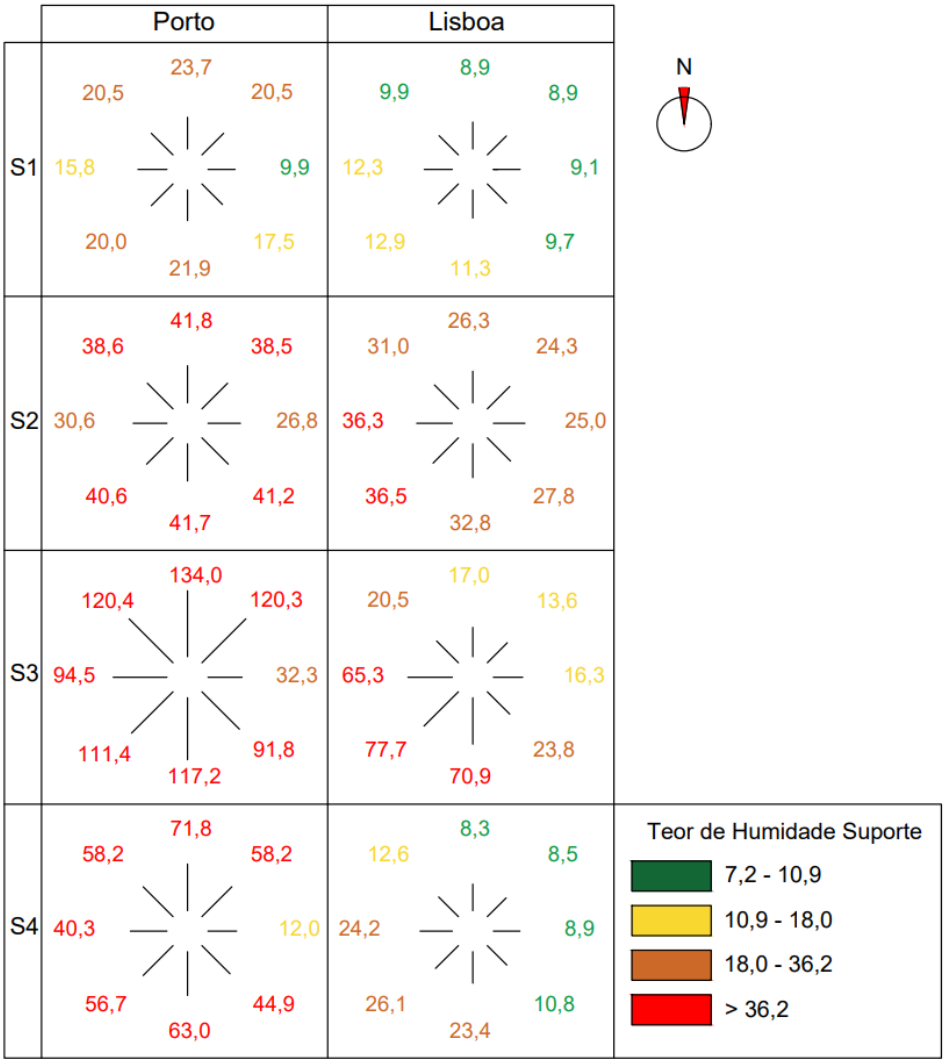


Figura 5 – Rosetas de valores máximos de teor de humidade no suporte, em kg/m^3, na cidade do Porto e na cidade de Lisboa para as simulações S1, S2, S3 e S4.

Na figura 6 e na figura 7 são analisados os gráficos do teor de humidade na camada de alvenaria de tijolo maciço, para o caso de estudo em que a solução construtiva está direcionada para a direção em que se regista maior intensidade de chuva incidente (Figura 2).

Por análise da figura 6 entende-se que no Porto, para a direção Sul, existem vários momentos onde ocorrem eventos de precipitação críticos, em que a impermeabilização do reboco está comprometida, ou seja, o valor do teor de humidade do suporte é consideravelmente superior a 7,2 kg/m^3. Existem dois eventos que se demonstram mais críticos: no início de 2016 e no final de 2022, em que o teor de humidade no suporte atinge perto de 180 kg/m^3, realçando que as simulações S3 e S4 têm pior performance higrotérmica. Em Lisboa, para direção Sudoeste, observando a figura 7, entende-se que a simulação S3 e S4 são novamente mais críticas, registando-se dois eventos mais críticos: no início de 2018 e no final de 2022, em que o teor de humidade no suporte atinge o valor de cerca de 160 kg/m^3. Os eventos mais críticos referidos estão assinalados com setas nas figuras 6 e 7.

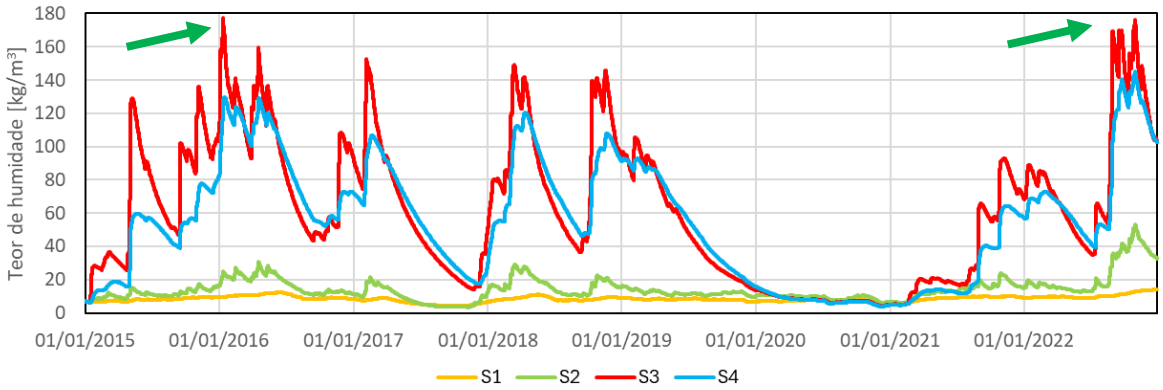


Figura 6 – Teor de água da alvenaria de tijolo, tendo em conta os diferentes rebocos exteriores aplicados, analisado no **Porto** com uma orientação de parede de Sul

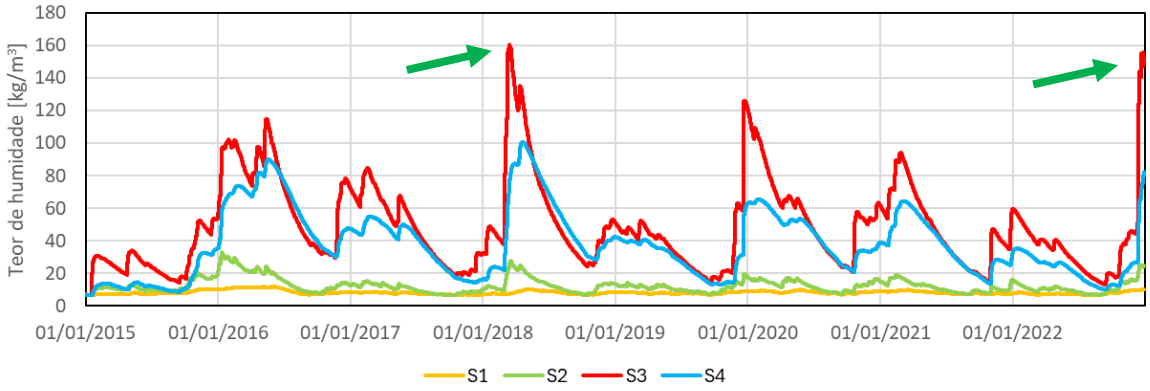


Figura 7 – Teor de água da alvenaria de tijolo, tendo em conta os diferentes rebocos exteriores aplicados, analisado em **Lisboa** com uma orientação de parede de Sudoeste

Para analisar o risco de penetração de água pela alvenaria na época de eventos críticos, analisam-se os eventos *spell* nas épocas descritas, apresentados na figura 8, na figura 9 e na figura 10.

Analisando o gráfico da figura 8 entende-se que o *spell* crítico no Porto tem picos espaçados por algumas horas, apresentando elevada intensidade, com picos com valores superiores a 60 l/m^2 e com uma duração considerável (240 horas). Já na figura 9, entende-se que apesar de curto e menos intenso, um *spell* desse tipo pode comprometer facilmente a performance higrotérmica de uma fachada no Porto. Na figura 10 entende-se que, apesar de ter picos com menor intensidade que no Porto, um *spell* crítico em Lisboa tem picos frequentes, com valores superiores a 35 l/m^2, tendo também uma duração elevada (200 horas).

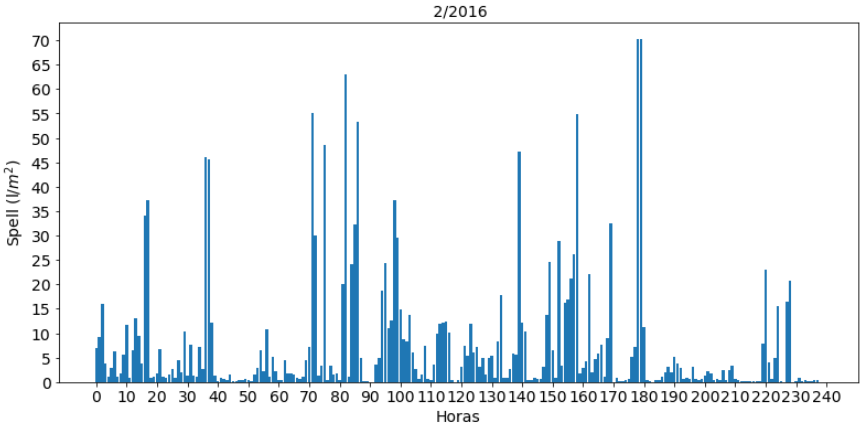


Figura 8 – Gráfico de evento de *spell* crítico no Porto em fevereiro 2016

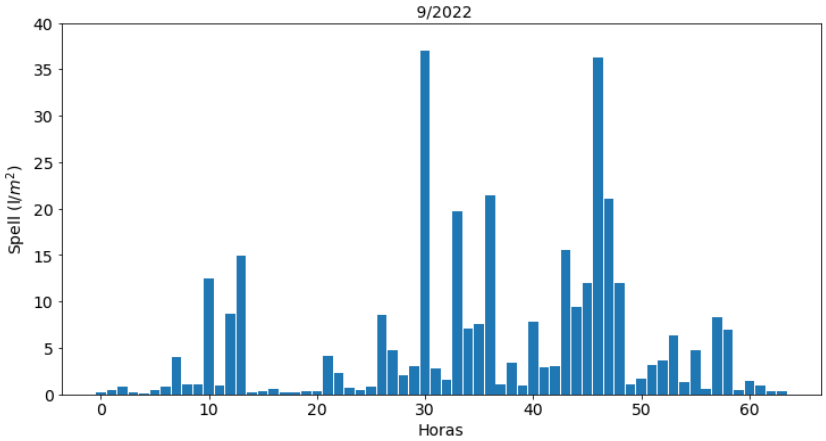


Figura 9 – Gráfico de evento de *spell* crítico no Porto em dezembro de 2019

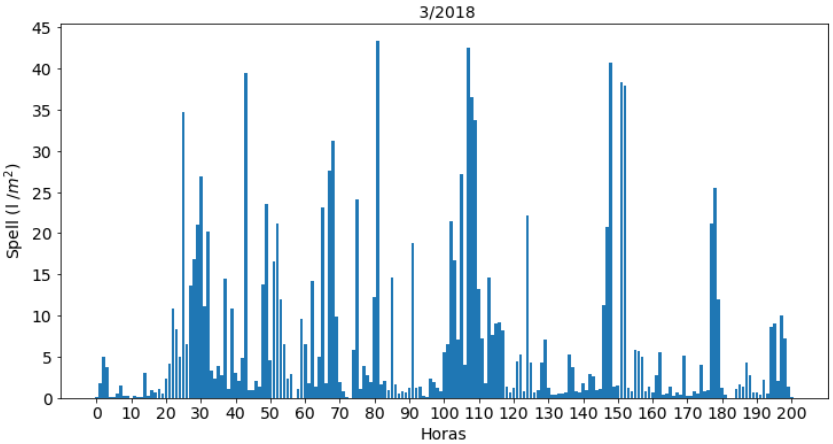


Figura 10 – Gráfico de evento de *spell* crítico em Lisboa em março de 2018

Por último, para cada cidade e para o reboco mais crítico (TR3), estuda-se influência da aplicação, pelo exterior, das duas tintas referidas anteriormente – tinta acrílica (S_d = 0,20 m) e de sílica (S_d = 0,05 m).

Por análise da figura 11 percebe-se que a aplicação de qualquer uma das tintas piora a performance higrotérmica na cidade do Porto. Apesar da tinta acrílica e da tinta de sílica provocarem um comportamento higrotérmico idêntico, note-se que a tinta acrílica acaba por ser o pior caso, já que

conduz a maiores valores de teor de humidade, dado que reduz a capacidade de secagem da parede, porque tem uma espessura da camada de ar de difusão equivalente quatro vezes maior. Na cidade de Lisboa, observando a figura 12, entende-se que a tendência é igual, isto é, as aplicações das duas tintas pioram também a performance higrotérmica da fachada.

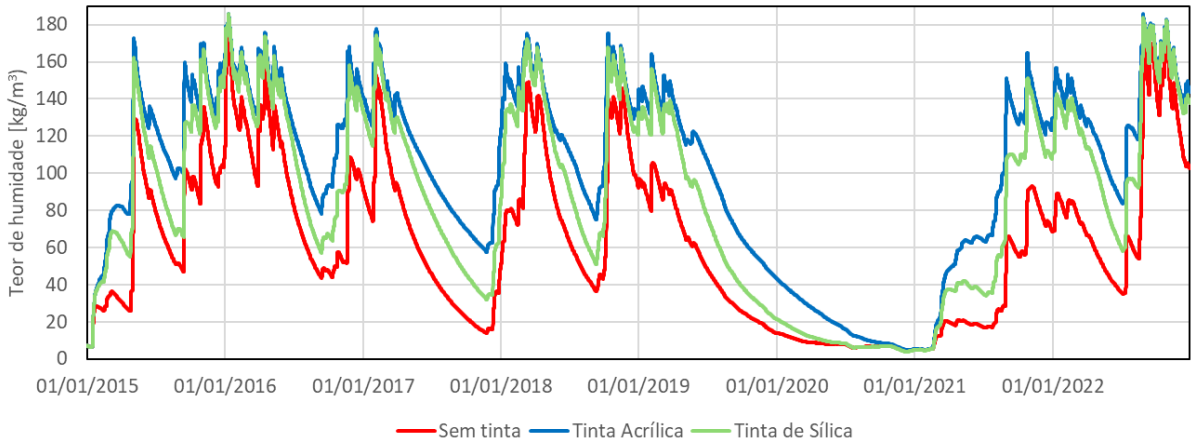


Figura 11 – Teor de humidade no suporte para a aplicação de tinta acrílica (S_d = 0,20 m) e de tinta de sílica (S_d = 0,05 m) na cidade do Porto para uma parede orientada a Noroeste e para a simulação S3.

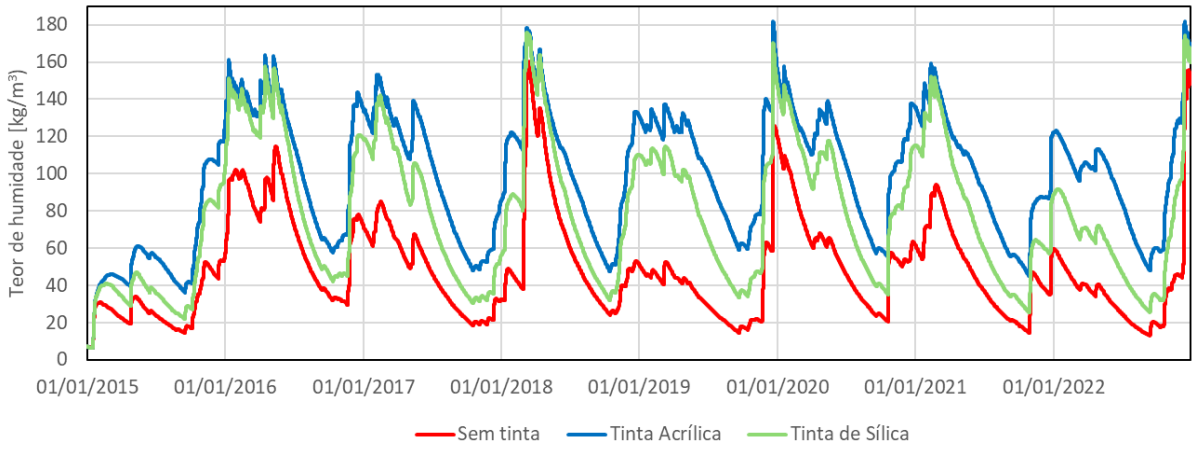


Figura 12 – Teor de humidade no suporte para a aplicação de tinta acrílica (S_d = 0,20 m) e de tinta de sílica (S_d = 0,05 m) na cidade de Lisboa para uma parede orientada a norte e para a simulação S3.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho começou-se por caraterizar o clima do Porto e de Lisboa, seguindo-se da caraterização e da testagem de performance higrotérmica de quatro rebocos térmicos, identificando-se quais os eventos de chuva incidente que comprometem essa performance. Por fim, foi analisado o efeito do acréscimo de tinta na performance higrotérmica no acréscimo de um revestimento de tinta.

Conclui-se todos os rebocos TR1 e TR2 têm, na generalidade do tempo, uma boa performance higrotérmica, porém em fenómenos extremos de precipitação, o reboco térmico TR3 e TR4 têm a sua performance higrotérmica comprometida, enquanto os rebocos TR1 e TR2 têm uma boa performance face à ocorrência de chuva incidente. Verifica-se ainda que os eventos *spell* críticos são caraterizados por terem uma longa duração e por terem picos de maior intensidade, tanto na cidade de Lisboa como

na cidade do Porto. Por último, conclui-se que a aplicação das tintas analisadas, nos revestimentos exteriores, não melhora a performance higrotérmica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) o fornecimento dos dados climáticos de Lisboa e Porto referentes ao intervalo de 2015 a 2022. O segundo autor agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N.J.M. Hilmi, G. Le Cozannet, & P. Lionello. (2023). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, & A. OkemB. Rama (Eds.), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2233–2272). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.021

Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *92*(13), 1079–1130. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003

BRS 573,430, Material data for water vaportransport, Byggforskserien

Coelho, G. B. A., & Kraniotis, D. (2023). A multistep approach for the hygrothermal assessment of a hybrid timber and aluminium based facade system exposed to different sub-climates in Norway. *Energy and Buildings*, *296*, 113368. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113368

EN ISO 15927-3 (2009), Hygrothermal Performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data*. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*, European Committee for Standardization (CEN)

Faria, P. (1990). Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética. In *Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes. 1º Módulo* (pp. 40–173). LNEC.

INE, I. P. (2013). *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*.

Künzel, H. (2015). Criteria defining rain protecting external rendering systems. *Energy Procedia*, *78*, 2524–2529. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.260

Maia, J., Ramos, N. M. M., & Veiga, R. (2018). Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems. *Building and Environment*, *144*, 437–449. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.055

Posani, M., Veiga, R., & de Freitas, V. P. (2023). Thermal renders for traditional and historic masonry walls: Comparative study and recommendations for hygric compatibility. *Building and Environment*, *228*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109737

WUFI®Pro, Version 4.2, Fraunhofer Institute for Building Physics (Fraunhofer IBP), (2017)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE HIGROTÉRMICA NA CONSTRUÇÃO RESIDENCIAL EM PORTUGAL. Impacto das alterações climáticas no setor da construção civil.

Mateus de G. V. e Marques da Costa[a]; Guilherme B. A. Coelho[b,c]

[a](Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Largo da Torre, 2829-506 Caparica, Portugal, mg.costa@campus.fct.unl.pt)

[b](CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516, Portugal, g.coelho@fct.unl.pt)

[c](Department of Built Environment, Faculty of Technology, Art and Design, Oslo Metropolitan University, PO box 4 St. Olavs plass, Oslo, NO-0130, Norway, coelho@oslomet.no)

RESUMO

Num contexto atual, as alterações climáticas marcam uma posição na sociedade. Por outro lado, a crise da habitação que se vive no país e também a conhecida pobreza energética são temas que estão em discussão e onde se estima um elevado investimento europeu. No âmbito da engenharia civil, é premente o estudo soluções que atenuem problemas atuais, como o impacto das alterações climáticas, o impacto do setor na redução da pegada de carbono e a utilização de materiais sustentáveis. O presente estudo pretende analisar melhorias de soluções construtivas de paredes em edifícios residenciais em Portugal. Para tal, identificaram-se as principais soluções construtivas utilizadas e os principais requisitos do clima interior nos edifícios. Finalmente, simulou-se um edifício residencial real, referente a uma moradia unifamiliar, constituída por dois pisos. Inicialmente, recolheu-se a geometria da mesma, a constituição dos elementos construtivos e a sua utilização. Posteriormente, foi utilizado o software WUFI®Plus de modo a analisar as reabilitações selecionadas. Este estudo contribuiu para uma análise de otimizações em soluções construtivas nas habitações, garantindo uma melhoria da eficiência energética e do conforto para enfrentar os desafios climáticos, obtendo, com as simulações realizadas, uma redução em cerca de 50% do consumo energético.

Palavras chave: Alterações climáticas, Otimização, Simulação, Soluções construtivas, Performance higrotérmica

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual da crescente preocupação com as mudanças climáticas e as suas implicações, o setor da construção civil emerge como um dos principais alvos de atenção. Em Portugal, país com uma rica história arquitetónica e uma evolução construtiva marcante, a questão da performance higrotérmica na construção residencial torna-se premente. No âmbito da engenharia civil, o estudo, a conceção e a concretização de projetos para atenuar e até mesmo mitigar problemas atuais, mas também futuros como o impacto da construção civil na redução da pegada de carbono, as alterações climáticas, entre outros problemas, terão de ser, rapidamente, uma prioridade a começar nas instituições de ensino e posteriormente nas empresas de construção e projeto, não descurando, naturalmente, a consciencialização da população (INE and LNEC 2001; M. A. Henriques 2011; Parente Rodrigues 2014;

Parliari, Keppas, and Papadogiannaki 2023; PESSOA 2009; Zhang, Luo, and Skitmore 2015). É expectável que as alterações climáticas provoquem o aumento generalizado da temperatura do ar (Borrego et al. 2009; Jaysawal et al. 2022; Säynäjoki, Heinonen, and Junnila 2011), o que implicará, evidentemente, o aquecimento das próprias habitações. A incapacidade de estas arrefecerem, caso não estejam devidamente preparadas, irá traduzir-se em desconforto, possivelmente acentuado em função de diversos fatores, dos seus utilizadores. Por outro lado, uma das consequências será, certamente, um maior consumo de energia associado a sistemas de climatização para contrabalançar o aumento da temperatura interior, o que originará um aumento da pegada carbónica.

Neste contexto, os objetivos deste trabalho são duplos. Em primeiro lugar, pretende-se realizar uma caracterização do parque habitacional em Portugal, abordando tanto a sua evolução histórica como também a evolução das diferentes soluções construtivas. Em seguida, pretende-se identificar e analisar os principais requisitos em edifícios residenciais, com foco especial na qualidade higrotérmica e nas necessidades energéticas. Por fim, propõem-se estratégias de otimização da performance higrotérmica, utilizando simulações computacionais e respetivas análises de resultados de modo a melhorar o comportamento dos edifícios residenciais tanto a nível térmico como também a nível de conforto dos próprios utilizadores.

2 A CONSTRUÇÃO ATUAL EM PORTUGAL

Naturalmente que nos dias atuais, existe pelo país inteiro uma diversidade enorme de soluções construtivas. De notar, que a análise realizada, focou-se principalmente, dada a bibliografia, na evolução das diferentes soluções construtivas na cidade de Lisboa. Evidentemente, que a análise se pode transpor a todo o território nacional e pode-se concluir que a generalidade das épocas de construção apresentadas também se verificou pelo resto do País. Notando, que em certos casos, dado os recursos naturais próprios de cada região, pode haver diversidade de materiais na constituição das alvenarias. Em seguida, são ilustrados exemplos de soluções construtivas mais atuais.

2.1 PAREDE SIMPLES DE FACHADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR

Este termo, do inglês, que se significa *External Thermal Insulation Composite System* (ETICS), é uma solução construtiva de paredes exteriores, constituído por um pano de alvenaria simples e, pelo exterior, do sistema completo de isolamento térmico, até ao revestimento final, com função de proteção das camadas anteriores. Este sistema (Figura 1a) para além da vantagem em termos de custos, também é uma boa solução visto que não retira área útil ao edifício. Contudo, apresenta algumas desvantagens ou dificuldades, como a mão de obra mais especializada e ainda a impossibilidade de adotar esta solução quando se tem de preservar a fachada exterior (Barreira and De Freitas 2014; Carlucci et al. 2018).

2.2 PAREDE SIMPLES DE FACHADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR E REVESTIMENTO DESCONTÍNUO

Esta solução, embora ainda não muito utilizada em Portugal, face, por exemplo, ao sistema anterior, é ainda um sistema em que o isolamento térmico se encontra pelo exterior protegido por uma estrutura e revestimento descontinuo do resto da solução, garantindo assim um espaço de ar físico (Barabash et al. 2016). A Figura 1b ilustra exatamente a solução construtiva apresentada.

2.3 PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO TÉRMICO PREENCHENDO PARCIALMENTE A CAIXA DE AR

A solução apresentada (Figura 1c), embora já utilizada no final do século passado, ainda nos dias de hoje é utilizada, muito embora, tem sido, progressivamente, substituída pela solução de ETICS. Na figura seguinte está representado um esquema da solução referida.

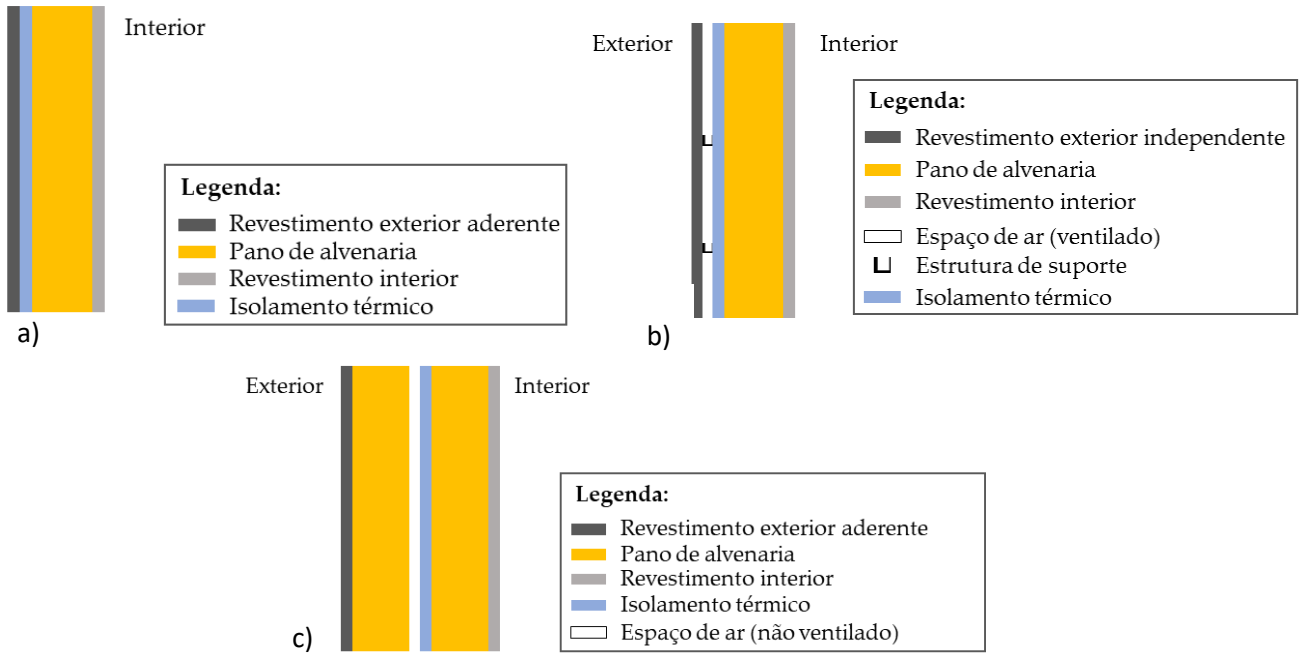


Figura 1. a) Solução parede simples com isolamento térmico pelo exterior; b) solução fachada ventilada; e c) solução parede dupla com isolamento térmico preenchendo parcialmente a caixa de ar

3 PRINCIPAIS REQUISITOS DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS EM PORTUGAL

O clima interior em edifícios é influenciado por vários parâmetros, nomeadamente (ASHRAE 2013): 1) externos (envolventes) – paredes, telhados, janelas e pavimento; 2) internas (ganhos) – iluminação, ocupantes e equipamentos; 3) infiltração – infiltração ao ar das envolventes e migração de humidade e 4) sistemas climatização – clima exterior, eficiência energética, entre outros. Contudo, no âmbito do presente estudo, pretende-se dar mais ênfase ao requisito da qualidade térmica, no que diz respeito o isolamento térmico e aos envidraçados e ainda referir no segundo ponto, qual o impacto expectante face às alterações climáticas.

3.1 ISOLAMENTO TÉRMICO

A primeira regulamentação térmica surgiu em Portugal em 1991, com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este foi, portanto, o primeiro instrumento legal que introduziu requisitos ao projeto tanto de novos edifícios como também de projetos de grandes remodelações, de forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico sem necessidade excessivas de energia, tanto na estação de aquecimento, como também na estação de arrefecimento (Governo Português 2006; Parente Rodrigues 2014). Analisando o Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH), versão mais atualizada do regulamento térmico em vigor e de modo que os novos projetos de edifícios residenciais limitem as necessidades de energia.

A tendência tem sido de reduzir consideravelmente os valores máximos do coeficiente de transmissão térmica admissíveis em todos os elementos dos edifícios, o que se tem traduzido, em incrementos bastante significativos de espessura de isolamento térmico para fazer cumprir a legislação em vigor. Este consequente aumento significativo da camada de espessura do isolamento térmico, que se tem vindo a adotar nos novos projetos de edifícios, pode ou não conduzir ao sobreaquecimento dos edifícios visto que os edifícios se tornam incapazes de arrefecer e restabelecer temperaturas aceitáveis para os utilizadores, devido, como referido, ao excesso de isolamento térmico colocado (Attia et al. 2023). Esta problemática não será analisada nas simulações realizadas no presente estudo, contudo como planos futuros, será mencionado.

3.2 O IMPACTO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

As alterações climáticas e o impacto que estas poderão ter numa sociedade não muito longínqua da atual, é uma preocupação constante tanto a nível nacional, como internacional. Apesar de, desde cedo, a legislação europeia, posteriormente transposta à nacional, fazer referência à limitação do consumo de energia, tentando que os edifícios fossem autónomos energeticamente. Adicionalmente, de acordo com estudos recentes, a construção é responsável pela produção de milhares de milhões de resíduos, tanto na fase de construção, como também em resíduos de demolição (Gallego-Schmid et al. 2020).

De que modo é que as alterações climáticas podem ter impacto na construção civil e mais especificamente, na área da habitação? Em primeiro lugar, como já se afirmou, o próprio setor é um dos grandes responsáveis pela produção excessiva de resíduos e de gases de efeito de estufa, promovendo, naturalmente as alterações climáticas. Um dos grandes passos que se tem de dar é a descarbonização através, por exemplo, da utilização de materiais com menor pegada carbónica (Cosentino, Fernandes, and Mateus 2023; Gradeci et al. 2018; Schulte et al. 2021; Silva 2013) e a utilização de fontes de energia e tecnologias mais limpas e sustentáveis (Borrego et al. 2009).

Concluiu-se que as alterações climáticas são cada vez mais uma preocupação da sociedade internacional e que têm sido realizadas projeções para aferir o aumento da temperatura global. Constatou-se ainda que a área da construção civil é das áreas que mais impacto tem nas alterações climáticas, mas, curiosamente, será das áreas que mais consequências poderá ter. Se se estima que nas próximas décadas a temperatura global possa aumentar cerca de 1,5 °C (Cosentino, Fernandes, and Mateus 2023) e que várias nações estejam a implementar estratégias para mitigar esse acontecimento e respetivas consequências (Galafassi et al. 2018), o que é certo é que os edifícios construídos ou em vias de, não estão a ser projetados para o efeito severo das alterações climáticas, tendo como pressuposto que a temperatura do ar irá aumentar, entre outros efeitos.

Ora importa colocar-se a questão relativamente ao clima de Portugal, acerca da estação considerada mais condicionante. Desta forma, questiona-se se se em projetos de conceção e também de reabilitação, qual das estações (estação de aquecimento ou a estação de arrefecimento) é a condicionante. Considerando que se assume a estação de aquecimento (inverno) como sendo a mais condicionante, o que implica a introdução, cada vez com maior ênfase, de isolamento térmico. Contudo esta análise e opinião pode não estar correta, porque o que, efetivamente, se tem observado e que será uma problemática futura é o aumento significativo da temperatura do ar, tanto no exterior, como também no interior dos edifícios e, com a aplicação excessiva de isolamento térmico, será

praticamente impossível um edifício conseguir regular a sua temperatura interior. A problemática descrita anteriormente tem um termo técnico definido que é o sobreaquecimento dos edifícios e em inglês conhecido como *overheating*.

Este tópico surge relacionado, evidentemente, com o tópico das alterações climáticas. Para além do aumento esperado da temperatura, também é bastante expectável que as ondas de calor apresentem uma frequência mais elevada, o que pode conduzir a um aumento da mortalidade (Parliari, Keppas, and Papadogiannaki 2023). De acordo com a Agência Europeia do Ambiente, o risco de mortalidade pode aumentar entre 0,2 a 5,5% por cada aumento em um grau Celsius da temperatura do planeta (Attia et al. 2023). O sobreaquecimento consiste, portanto, no aumento da temperatura no interior das habitações, afetando o correto funcionamento das mesmas, afetando também negativamente a saúde, o bem-estar e a produtividade dos utilizadores, conduzindo a consumos energéticos cada vez mais elevados (Attia et al. 2023).

4 CASO DE ESTUDO

Pretende-se simular o comportamento do caso descrito de seguida, variando as soluções construtivas, propondo melhorias de modo a satisfazer determinados requisitos no clima interior dos edifícios residenciais em Portugal. A moradia é composta por dois pisos, piso térreo e outro piso elevado, dividida em vários compartimentos (Figura 2).

As duas figuras seguintes representam, em planta, os vários compartimentos e as respetivas áreas. Para a elaboração do modelo geométrico, foi utilizado o *software SketchUp* (Figura 3), recorrendo ainda às plantas originais e visitas in-situ. O programa utilizado para a construção do modelo, é um *software* de construção de modelos tridimensionais, utilizado em várias áreas, desde arquitetura, *design* de interior até à engenharia civil.

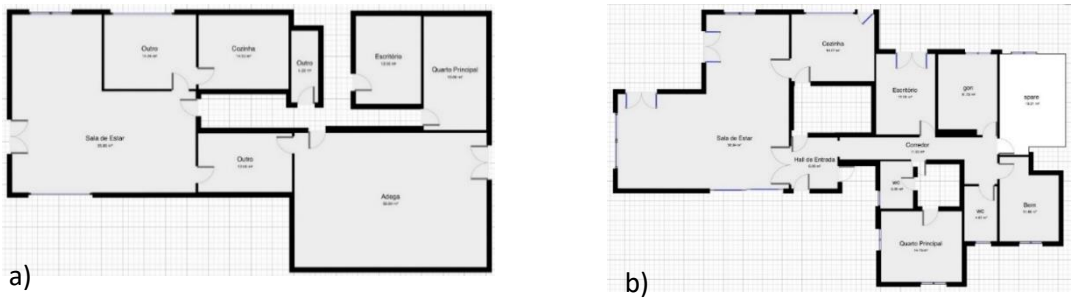


Figura 2. Plantas caso de estudo: piso térreo (a) e piso elevado (b)

A moradia é composta por vinte e sete zonas térmicas (Figura 4). Cada zona térmica não constitui um compartimento individualizado, um quarto ou uma sala, mas sim um espaço, um conjunto de espaços, sujeito a condições de controlo térmico similar. Estas zonas podem interagir estabelecendo trocas de calor através das superfícies que partilham e dos fluxos de ar que movimentam (Curado 2014).

De notar que, apesar da identificação de todas estas zonas térmicas, não se pretende analisar cada uma delas exaustivamente pois tornar-se-ia demasiado moroso e, devido à similaridade de zonas térmicas o processo de análise e simulação iria tornar-se bastante repetitivo e as conclusões seriam idênticas. Assim, optou-se por analisar três zonas térmicas distintas (Figura 4): 1) um espaço comum –

uma sala de estar (zona térmica 11 e 12), situado no piso superior, e 2) um quarto, situado no piso térreo (zona térmica 7).

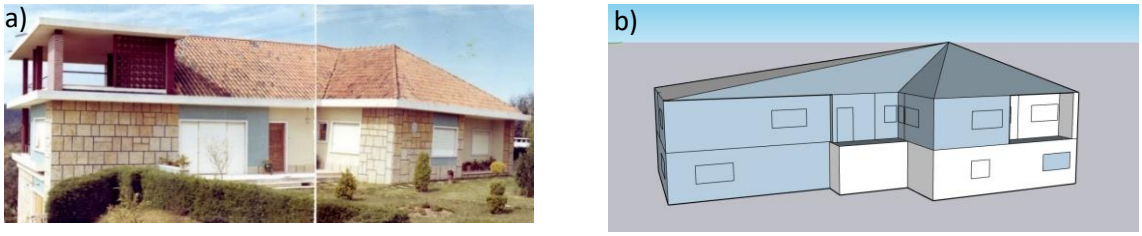


Figura 3. Caso de estudo: Imagem real (a) e modelo computacional (b)

Escolheram-se estas zonas devido às especificidades de cada um destes compartimentos: o primeiro por ser um espaço comum da habitação, onde pode ter uma elevada concentração de utilizadores e o segundo por ter uma taxa de ocupação elevada, nomeadamente para dormir, em que apresentam valores de concentração de dióxido de carbono e humidade mais significativos nesse período. As características geométricas bem como outros fatores das zonas térmicas são apresentadas Tabela 1.

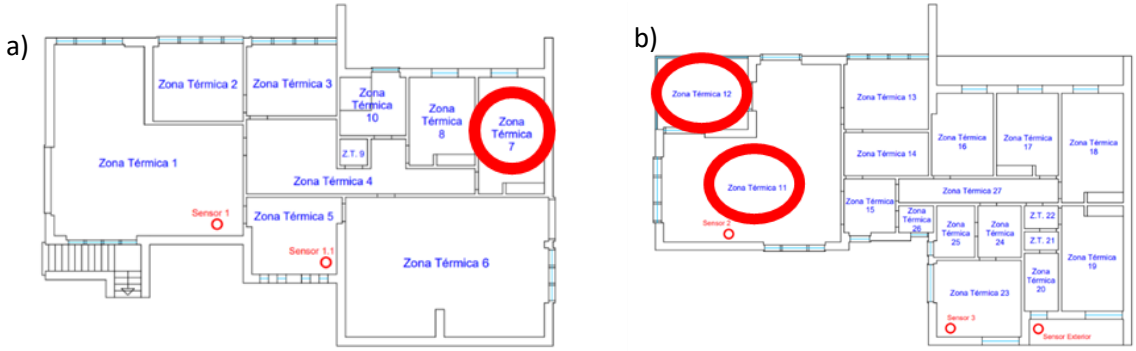


Figura 4. Identificação de zonas térmicas: piso 0 (a) e piso 1 (b)

Em seguida estão apresentadas as simulações realizadas e as respetivas melhorias adotadas, para as zonas térmicas em estudo. O *software* utilizado para a simulação foi o WUFI®Plus. Este *software* pode ser considerado uma poderosa ferramenta de simulação utilizada para avaliar o desempenho higrotérmico de construções, variando para tal, por exemplo, condições de calor, humidade, entre outros. É amplamente utilizado para estudar o comportamento de paredes, coberturas e outros elementos da construção sob condições climáticas variáveis ao longo do tempo.

Tabela 1. Características das zonas térmicas estudadas

	Zona Térmica 7	**Zona Térmica 11**	**Zona Térmica 12**
Área pavimento (m²)	14,0	58,9	15,9
Volume compartimento (m³)	44	189	50
Área envidraçado (m²)	1,20	4,00	22,00
Rácio envidraçado/pavimento	9%	7%	140%

Envolvente envidraçados	Este	Norte e Oeste	Norte e Este

Para se realizar simulações no software referido, foi necessário proceder-se à introdução de vários *inputs*, dos quais se podem destacar os ilustrados na Figura 5. Relativamente às soluções construtivas, o *software* tem acoplada uma base de dados extensa com vários materiais com as respetivas características e propriedades, bastando selecionar de acordo com a solução pretendida; ficheiros climáticos foram utilizados ficheiros (clima contemporâneo) com formato *WAC*; ganhos internos, de acordo com a Figura 6 e Figura 7 e de acordo com a metodologia apresentada por (Coelho, 2020); a ventilação foi definida de acordo com a legislação em vigor e, finalmente, a geometria do edifício conforme referido anteriormente conseguiu-se através da utilização de outro programa, o *Sketchup*.

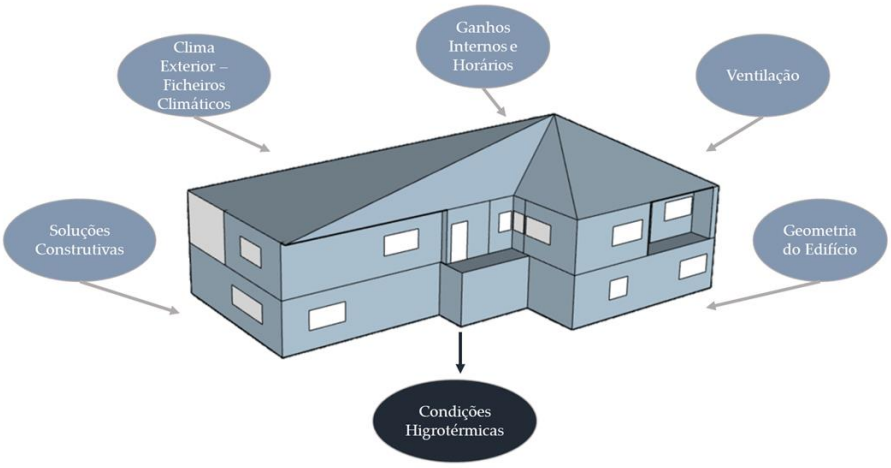


Figura 5. Inputs necessários no programa WUFI®Plus, adaptado de Coelho, 2020

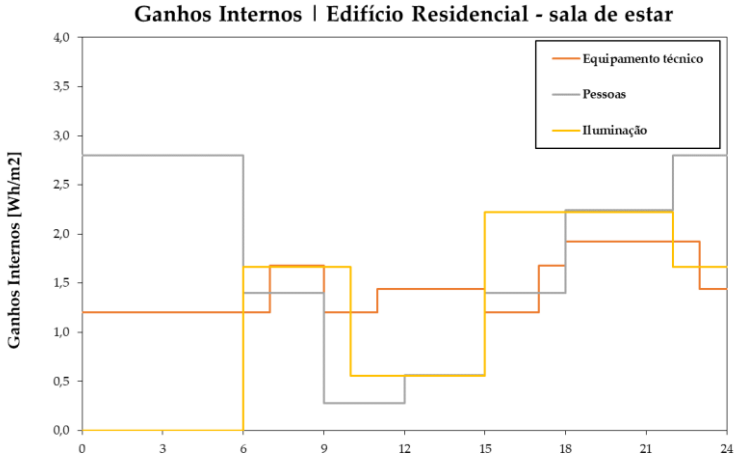


Figura 6. Ganhos internos para edifícios residenciais - equipamento técnico, utilizadores e iluminação (sala de estar).

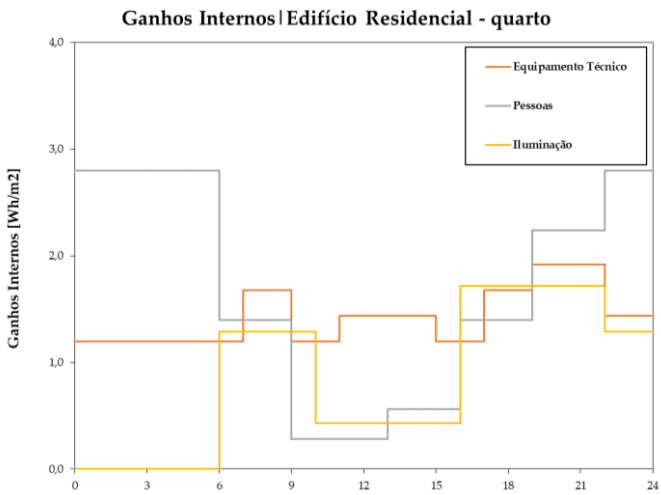


Figura 7. Ganhos internos para edifícios residenciais - equipamento técnico, utilizadores e iluminação (quarto).

4.1 PAREDE SIMPLES – SOLUÇÃO 1.0

A primeira simulação realizada recorrendo ao *software* WUFI®Plus foi uma solução de fachada corrente de parede simples com vinte centímetros de espessura, composta por duas camadas de reboco tradicional (interior e exterior), com uma espessura de dois centímetros e meio e por tijolo maciço de quinze centímetros. Esta solução apresenta um *coeficiente de transmissão térmica* (U) de 1,48 W/(m².°C). Como referido, analisaram-se as três zonas térmicas: 1) quarto principal, 2) sala de estar 3) e marquise.

4.2 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR – SOLUÇÃO 1.1

Neste segundo caso, pretendeu-se realizar uma melhoria inicial à solução 1.0, colocando uma camada de isolamento térmico pelo exterior com dez centímetros. Procedeu-se, do mesmo modo à melhoria das restantes componentes dos compartimentos, colocando isolamento térmico de igual espessura tanto na laje de fundo como também na laje de cobertura e ainda alterando o tipo de envidraçado passando de um envidraçado simples com *U* de 3,0 W/(m².°C) para um envidraçado mais eficiente com um *U* de 1,45 W/(m².°C).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o presente estudo, pretendeu-se apenas simular uma situação corrente de fachada, neste caso, a parede simples. Propôs-se na primeira simulação analisar o comportamento térmico em termos de ganhos e perdas, em kWh/m², dos compartimentos. Na segunda simulação, aplicou-se uma camada de isolamento térmico tanto na fachada como também na laje do piso térreo e na cobertura, podendo comparar esta simulação num exemplo de reabilitação possível em qualquer edifício de modo a melhorar a sua eficiência e o seu comportamento térmico e os níveis de conforto.

Deste modo, concluídas as simulações e apresentados os valores de ganhos e perdas para cada uma das soluções, interessa neste ponto analisar e comparar as simulações em simultâneo. As figuras seguintes ilustram os resultados obtidos de cada simulação para as diferentes zonas analisadas.

Analisando da Figura 8 à Figura 13, pode-se afirmar que existem melhorias significativas de acordo com as simulações realizadas, i.e., comparando os resultados da simulação 1.0 com os da 1.1.

Analisando com maior detalhe a envolvente exterior, ou seja, as paredes de fachada, na zona 1 (quarto principal) dada a sua orientação predominantemente a Sul, é natural o valor de ganhos obtido (189 kWh/m²) contrapondo com a melhoria a esta solução, 1.1, dada a introdução de uma camada de isolamento térmico, como referido anteriormente, apresentando um valor de ganhos de 68 kWh/m², demonstrando deste modo a eficiência desta melhoria (Figura 8). Evidentemente, é expectável que os valores de perdas destas envolventes estejam em consonância com os valores de ganhos, ou seja, também na zona 1 na mesma envolvente exterior, observa-se uma redução muito significativa, cerca de 89%, com a introdução da camada de isolamento térmico (Figura 9).

Analisando as outras zonas simuladas, sala de estar e marquise (zona 2 e zona 3, respetivamente), ao nível da envolvente exterior, mais uma vez observa-se que a introdução de uma camada isolamento conduziu a uma melhoria bastante significativa. De notar que na zona 2 (sala de estar), a solução de melhoria traduziu-se numa redução em cerca de 49% em termos de ganhos (diminui de 78 para 40 kWh/m^2, Figura 10) e cerca de 60% em termos de perdas (reduziu de 50 para 21 kWh/m^2, Figura 11).

Para além da melhoria ao nível da fachada (i.e., introdução de isolamento térmico), também como referido, procedeu-se à melhoria dos envidraçados o que, naturalmente contribuiu para os valores apresentados anteriormente e representados nas figuras seguintes. Contudo, importa ainda referir que a orientação dos vãos envidraçados (ver Tabela 1) é fundamental para o comportamento térmico no interior dos compartimentos. É natural que um vão orientado a Sul tenha um valor de ganhos mais elevado do que um vão orientado a Norte, por exemplo. E em termos de perdas, é expectável que um vão orientado a Norte tenha um valor de perdas mais elevado do que um outro vão orientado a Sul.

Observa-se, a título de exemplo, que comparando a zona 1 (quarto principal), com um vão orientado a Este, com a zona 3 (marquise), com um vão orientado a Norte e Este, os valores sejam bastante diferentes e de acordo com o referido anteriormente, ou seja, um vão orientado a Este apresenta um valor de ganhos de 127 kWh/m² e o vão orientado a Norte e Este, apresenta um valor de ganhos de apenas 2525 kWh/m². Em suma, conclui-se que o incremento de isolamento térmico tanto ao nível da fachada e ainda a mudança do tipo de envidraçado, conduziram a melhorias significativas em termos térmicos e naturalmente também a nível de conforto sentido dentro dos compartimentos. Importa ainda realçar que a análise realizada foi feita para um período de seis anos.

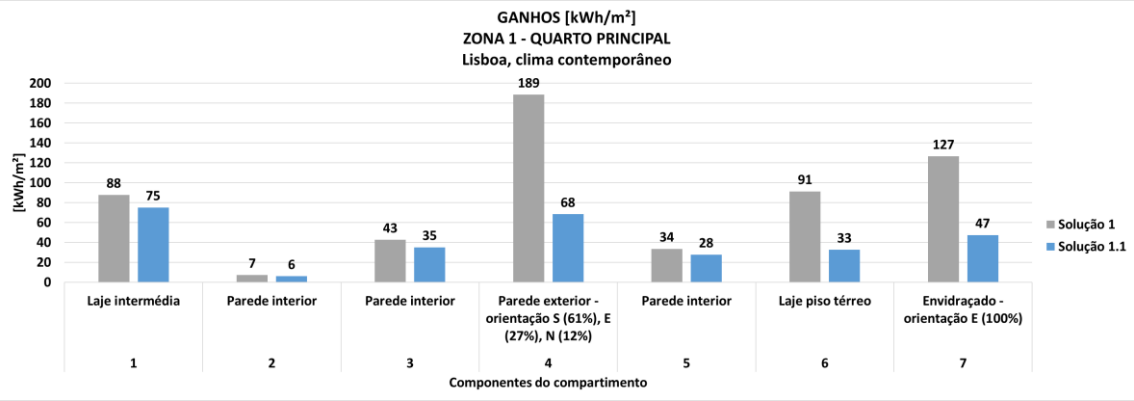


Figura 8. Análise de simulações, zona 1, **ganhos** [kWh/m²]

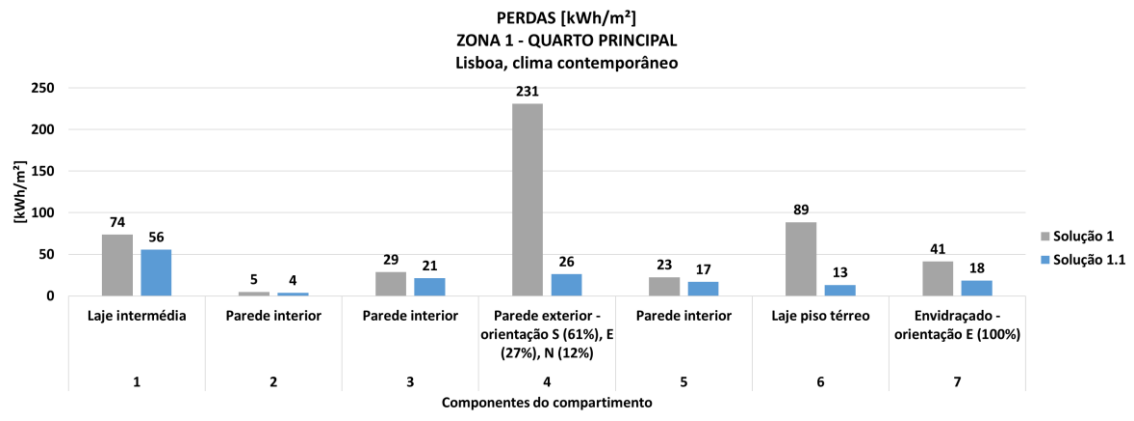


Figura 9. Análise de simulações, zona 1, **perdas** [kWh/m²]

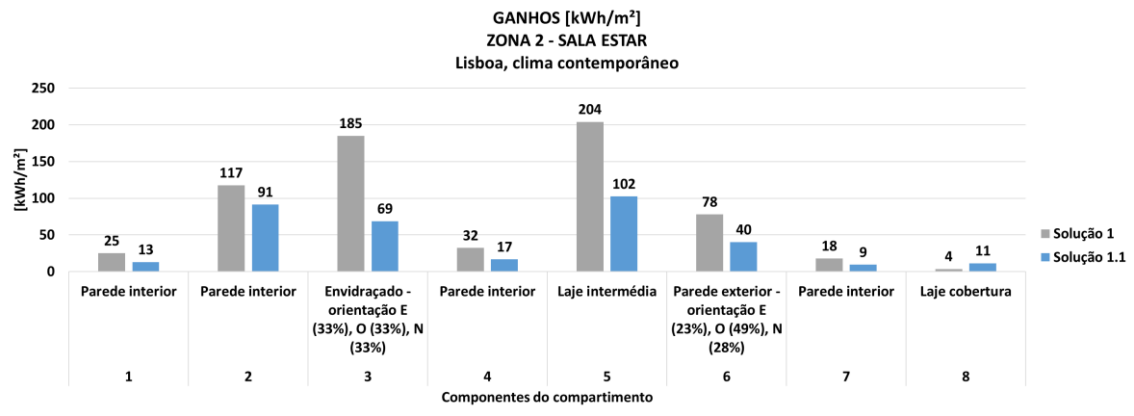


Figura 10. Análise de simulações, zona 2, **ganhos** [kWh/m²]

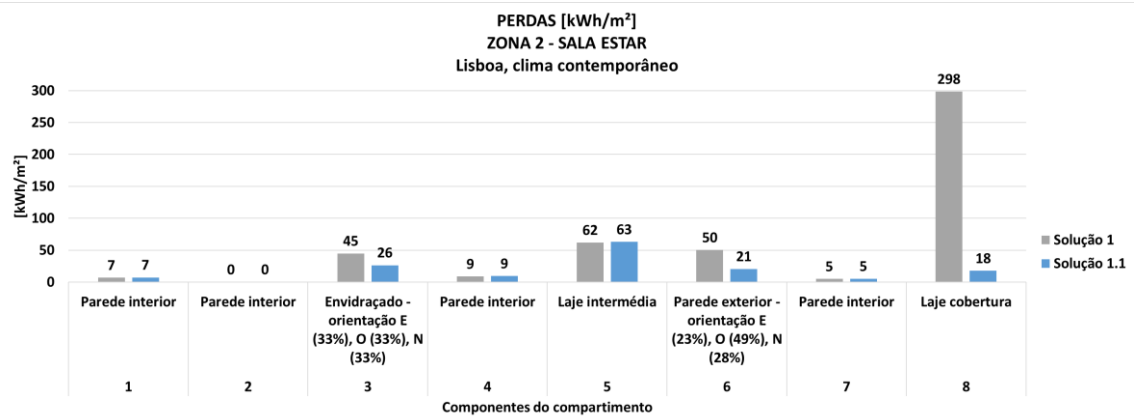


Figura 11. Análise de simulações, zona 2, **perdas** [kWh/m²]

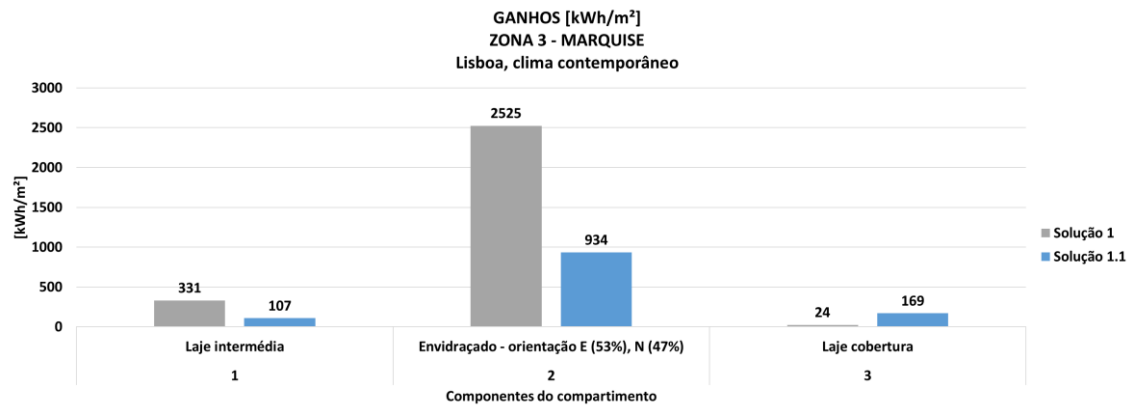


Figura 12. Análise de simulações, zona 3, **ganhos** [kWh/m²]

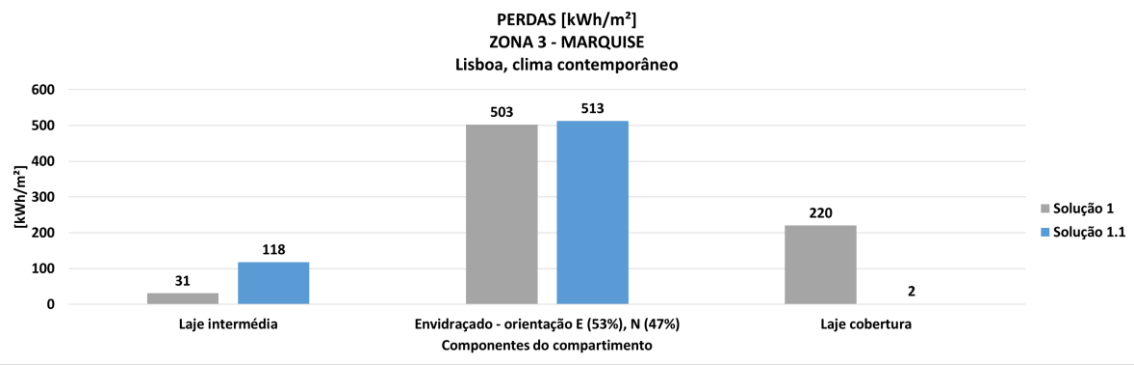


Figura 13. Análise de simulações, zona 3, **perdas** [kWh/m²]

6 CONCLUSÕES

No âmbito do presente estudo pode-se concluir, em primeiro lugar, que a análise e melhoria de soluções construtivas para uma maior eficiência térmica e também em termos de conforto nas habitações, é um trabalho bastante moroso e que exige um elevado número de simulações para se alcançar uma solução construtiva que cumpra tanto a maioria dos requisitos como satisfaça de uma forma geral os utilizadores. Em segundo lugar, considerando a temática das alterações climáticas pode-se concluir que, para satisfazer determinados requisitos, nomeadamente respeitar os valores de coeficiente de transmissão térmica, conduzirá, naturalmente, a um incremento substancial de isolamento térmico, o que conduzirá, certamente, a um sobreaquecimento dos espaços interiores das habitações considerando o aumento da temperatura do planeta, efeito inevitável das alterações climáticas. Referindo as soluções demonstradas anteriormente fruto das simulações realizadas, na sua maioria, as propostas de melhoria conduziram a um resultado positivo tanto em termos de ganhos (melhorias de cerca de 50%) como em termos de perdas (melhorias em cerca de 60%), o que se traduz num edifício termicamente mais eficiente e também a nível do conforto para os utilizadores.

Como proposta de trabalhos futuros, seria interessante analisar, primeiramente, o comportamento dos edifícios para diferentes soluções construtivas e analisar o clima tendo em conta as projeções e estudos para as alterações climáticas, considerando dois cenários de acordo com as emissões, o cenário RCP4.5 e o cenário mais gravoso, o RCP8.5; analisar ainda mais variáveis nas simulações para além da questão térmica referindo os ganhos e perdas, mas também toda a temática do

sobreaquecimento fruto das alterações climáticas, analisar com mais ênfase toda a questão do conforto dos utilizadores habitações e abordar este tema em termos da sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

ASHRAE. 2013. Design *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2013). ASHRAE Handbook - Fundamentals*.

Attia, Shady et al. 2023. "Overheating Calculation Methods, Criteria, and Indicators in European Regulation for Residential Buildings." *Energy and Buildings* 292. 10.1016/j.enbuild.2023.113170

Barabash, Aleksandra et al. 2016. "The Efficiency of the Ventilated Gap of the Double-Skin Facade Systems Using Fire Crosscuts." *MATEC Web of Conferences* 73: 1–10. 10.1051/matecconf/20167302006

Barreira, Eva, and Vasco P. De Freitas. 2014. "External Thermal Insulation Composite Systems: Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour." *Advances in Materials Science and Engineering* 2014. 10.1155/2014/650752

Coelho, Guilherme B. A.. 2020. "Optimization of Historic Buildings That House Artefacts Considering Climate Change." PhD Thesis, NOVA/SST.

Borrego, Carlos, Myriam Lopes, Isabel Ribeiro, and Anabela Carvalho. 2009. "As Alterações Climáticas: Uma Realidade Transformada Em Desafio." *Debater a Europa* (March): 15–40.

Carlucci, S., L. Bai, R. de Dear, and L. Yang. 2018. "Review of Adaptive Thermal Comfort Models in Built Environmental Regulatory Documents." *Building and Environment* 137: 73–89. 10.1016/j.buildenv.2018.03.053

Cosentino, Livia, Jorge Fernandes, and Ricardo Mateus. 2023. "A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials." *Energies* 16(12). 10.3390/en16124676

Galafassi, Diego et al. 2018. "'Raising the Temperature': The Arts in a Warming Planet." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 31(2): 71–79. 10.1016/j.cosust.2017.12.010

Gallego-Schmid, Alejandro, Han Mei Chen, Maria Sharmina, and Joan Manuel F. Mendoza. 2020. "Links between Circular Economy and Climate Change Mitigation in the Built Environment." *Journal of Cleaner Production* 260(March). 10.1016/j.jclepro.2020.121115

Governo Português. 2006. "DL n.º 80/2006, 4 de Abril." *Diário da República* 1ª série-A(67): 2468–2513.

Gradeci, Klodian, Umberto Berardi, Berit Time, and Jochen Köhler. 2018. "Evaluating Highly Insulated Walls to Withstand Biodeterioration: A Probabilistic-Based Methodology." *Energy and Buildings* 177: 112–24. 10.1016/j.enbuild.2018.07.059

INE, and LNEC. 2001. *O Parque Habitacional e a Sua Reabilitação Análise e Evolução*.

Jaysawal, Rajan Kumar, Suprava Chakraborty, D. Elangovan, and Sanjeevikumar Padmanaban. 2022. "Concept of Net Zero Energy Buildings (NZEB) - A Literature Review." *Cleaner Engineering and Technology* 11(August): 100582. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100582.

M. A. Henriques, Fernando. 2011. "Comportamento Higrotérmico de Edifícios.," NOVA/SST.

Santos, Carlos A. Pina, e Luís Matias. 2006. "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Da Envolvente Dos Edifícios." LNEC

Säynäjoki, Antti, Jukka Heinonen, and Seppo Junnila. 2011. "Carbon Footprint Assessment of a Residential Development Project." *International Journal of Environmental Science and Development* (February 2016): 116–23. 10.7763/ijesd.2011.v2.107

Schulte, Maximilian, Iris Lewandowski, Ralf Pude, and Moritz Wagner. 2021. "Comparative Life Cycle Assessment of Bio-Based Insulation Materials: Environmental and Economic Performances." *GCB Bioenergy* 13(6): 979–98. 10.1111/gcbb.12825

Silva, Filipe Manuel Fernandes. 2013. "Estudo de Materiais de Isolamento Térmico Inovadores." FEUP.

Zhang, Xiaoling, Lizi Luo, and Martin Skitmore. 2015. "Household Carbon Emission Research: An Analytical Review of Measurement, Influencing Factors and Mitigation Prospects." *Journal of Cleaner Production* 103: 873–83.

USO DE MADEIRA NA ESTRUTURA E NA ENVOLTÓRIA DE PROPOSTA DE HABITAÇÃO SOCIAL NA FORMA DE DOMO GEODÉSICO E SEU IMPACTO NO DESEMPENHO TÉRMICO

Jerônimo Coura-Sobrinho[a]; Simone Queiroz da Silveira Hirashima [b]; Frank Florez Montes [c]; Rafael Silva Brandão [d]; Júlia Reis Costa Nunes[a]

[a](Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Paraíba 697, 30130-141, Belo Horizonte, Brasil), jeronimocoura@gmail.com

[b](Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG, Avenida Amazonas 7675, 30510-000, Belo Horizonte, Brasil), jeronimo@cefetmg.br

[c](Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, 170003, Manizales, Colômbia), frank.florezm@autonoma.edu.co

[d](Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando 170, 36307-352, São João del-Rei, Brasil), rbrandao@ufsj.edu.br

[a](Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Paraíba 697, 30130-141, Belo Horizonte, Brasil), juliareiscn@gmail.com

RESUMO

O déficit habitacional brasileiro tem se mantido em torno de 6 milhões de unidades, a despeito da iniciativa do governo federal para enfrentamento do problema, por meio do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Esta pesquisa objetiva propor uma alternativa de habitação social na forma de domo geodésico, por sua compacidade e leveza e com vistas ao desempenho térmico. A avaliação do desempenho foi feita com base nas normas brasileiras ABNT NBR 15220:2005, 15220-2:2022 e 15575-2021, pelos procedimentos simplificados. Foram avaliadas: a transmitância térmica de paredes externas e da cobertura; a capacidade térmica, a área de ventilação natural mínima e a área de transparência máxima das paredes. Os resultados mostraram a necessidade de adoção de um sistema construtivo híbrido na parede externa, por meio da utilização de alvenaria de tijolo cerâmico maciço, até a altura de 2,20m, e pela utilização de madeira até completar o pé direito e também na cobertura. Concluiu-se que o sistema construtivo integralmente em madeira não atendeu ao critério de capacidade térmica para paredes, porém atenderia aos demais critérios das normas. Por esta razão, foi necessário adotar o sistema construtivo híbrido para as paredes, constituído de tijolos cerâmicos e madeira.

Palavras-chave: Habitação de interesse social, Uso de madeira em construção, Desempenho térmico, Domo geodésico

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do século XX, o governo federal brasileiro buscou soluções para minimizar o déficit habitacional do país, a exemplo da criação do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação, criados pela ditadura militar (de 1964 a 1985), com recursos da poupança dos assalariados brasileiros. Na ocasião, foram edificadas 2,4 milhões de moradias sociais, quantidade insuficiente para atender a demanda do processo de urbanização. O sistema construtivo adotado recebeu críticas por não incorporar materiais e processos que promovessem a participação de comunidades organizadas, o que poderia contribuir para acelerar o enfrentamento do referido déficit, conforme afirmam Da Silveira Grandi *et al*. 2016, que é da ordem de 6 milhões de unidades, de acordo com o Censo Demográfico de 2022, publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). Esse déficit inclui habitações precárias, coabitação familiar, elevado ônus no aluguel de imóveis e adensamento excessivo. Como forma de enfrentamento dessa carência, o governo brasileiro, por intermédio do Ministério das Cidades (MCid), retomou, em 2023, o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), lançado em 2009 e interrompido nos últimos quatro anos que antecederam ao mandato do governo central iniciado em 1º de janeiro de 2023. O PMCMV tem como objetivo facilitar o financiamento de habitações em áreas urbanas e rurais, para a população de baixa renda, com juros mais atraentes do que os do sistema bancário privado.

Em geral, as habitações financiadas pelo PMCMV apresentam baixo desempenho térmico, com impacto nas condições de conforto e consequentemente na saúde dos ocupantes. Via de regra, trata-se de construções com geometria retangular. Segundo Tubelo *et al*. (2021), o baixo desempenho térmico das unidades entregues pelo PMCMV levam seus moradores a utilizarem sistemas de climatização para garantir o conforto, com impacto no consumo de energia, comprometendo o já restrito orçamento familiar da população de baixa renda.

Nesta pesquisa, busca-se uma alternativa de anteprojeto de residência unifamiliar de interesse social na forma de domo geodésico, que atenda aos requisitos do PMCMV. O anteprojeto busca minimizar as demandas energéticas, garantir o desempenho térmico da edificação e, consequentemente, o conforto do usuário. A forma geodésica visa economia de material construtivo, leveza da edificação e simplicidade construtiva. Propõe-se o uso da madeira na envoltória e na cobertura por ela ser um material resistente, oriundo de fonte renovável e de fácil manuseio. Além disso, conforme asseveram Bavaresco *et al*. 2021, há registros de insatisfação de beneficiados do PMCMV com relação ao desempenho das unidades habitacionais entregues pelo programa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Ao longo do século XX, o uso intenso do concreto na construção civil provocou diminuição do uso da madeira no setor, e passou a ser considerado o grande responsável pelas emissões de CO_2 na atmosfera, com impacto nas mudanças climáticas. É sabido que o uso de madeira em construções pode, ao mesmo tempo, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e para reduzir o esgotamento de recursos primários, além de favorecer a pré-fabricação de elementos, com impacto no crescimento da economia circular (Piccardo e Hughes, 2022).

Barbosa *et al.* (2024) afirmam que as formas e soluções arquitetônicas devem ser orientadas pelos princípios do desenvolvimento sustentável, pela eficiência energética e pelo conforto térmico dos usuários. Esses princípios nortearam a opção por uma proposta de moradia social na forma de domo geodésico, baseando-se no lema do inventor americano Richard Buckminster Fuller que obteve em 1954 o registro da patente dessa estrutura (de Lózar de la Viña 2013; Laila *et al.* 2018). Domos geodésicos são estruturas esféricas, constituídas de faces triangulares organizadas em polígonos, com

arestas que podem ser de aço, alumínio, madeira, bambu etc, apresentando a propriedade de distribuir uniformemente as tensões pela malha. Essas estruturas caracterizam-se pela compacidade, pelo amplo espaço interno e pela leveza. Os principais benefícios dos domos são: espaços internos livres de pilares e vigas, poucas paredes, resistência às ações do vento e às vibrações sísmicas, baixo custo, adequação a *designs* arrojados e beleza estética (Hassan, 1986).

Comparada à forma ortogonal das habitações convencionais, a geometria das geodésicas favorece o fluxo de ar e o aproveitamento da iluminação natural, com impacto na eficiência energética (de Freitas-Soares; Arruda, 2016). Para Soleimani *et al.* 2017, o desempenho térmico das geodésicas depende de vários fatores, sendo que o conforto térmico dos usuários desse tipo de estruturas tem sido pouco pesquisado, deixando, portanto, uma lacuna importante para investigações.

Os domos são recorrentes em construções e monumentos em diversos países, como forma de valorizar esteticamente a edificação e também de se obterem amplos ambientes. A partir dos registros de patentes relativas às geodésicas (Fuller, 1954, 1965), construções dessa forma têm sido edificadas como pavilhões de exposição, cobertura de estádios etc. Apesar do apelo visual, o uso de domos para fins de moradia ainda é escasso. Para Pastukh *et al.* (2021), os domos geodésicos que combinam materiais sustentáveis com novas tecnologias construtivas constituem uma contribuição para o campo das energias renováveis obtidas por fontes naturais. Os autores também reafirmam a importância da definição adequada das conexões entre as barras que constituem a estrutura dos domos, como forma de propiciar a distribuição equitativa das tensões.

Construções na forma de domos geodésicos, em função da geometria racionalizada, têm o potencial de serem produzidas em escala, com impacto nos custos, além de sua estrutura e envoltória possibilitarem a utilização de materiais diversos. O conjunto desses fatores associado às características dos climas dos locais de implantação são importantes para se otimizar a eficiência energética dessas edificações.

Richard Buckminster Fuller prezava pelo uso adequado das formas construtivas e dos materiais, com vistas a otimizar os custos. Seu lema “fazer mais com menos” pode ser verificado pela compacidade da construção, expressa pelo fator de forma e pelo índice de compacidade . O fator de forma da construção diz respeito à relação entre a superfície da envoltória e o volume da edificação. Quanto menor o fator de forma, menores são as trocas de energia entre os ambientes externo e interno. A esfera é a forma geométrica espacial com maior compacidade (Barth *et al.* 2017). Por analogia, uma construção geodésica também apresenta essa característica. O índice de compacidade espacial, questão amplamente discutida por Mascaró (2010), diz respeito à relação entre a superfície de uma esfera (S_{esf}) de igual volume da construção e a superfície da envoltória (S_{env}) do edifício, multiplicada por 100. No caso das esferas, como a S_{esf} é igual à $S_{env.}$, o valor do ICe = 100%. O cubo tem índice de compacidade igual a 80,6%, inferior ao da construção esférica. Em síntese, conforme as formas da construção perdem compacidade, os custos tendem a aumentar. (Moraes *et al.* 2016).

Além da redução do consumo de materiais, a forma esférica de uma construção leva à redução das trocas energéticas do ambiente construído com o entorno, favorecendo a sustentabilidade da edificação e contribuindo para a sua eficiência. Essas perdas e ganhos de calor são influenciadas por diversos fatores, com impacto no desempenho térmico da construção.

Soares e Arruda (2016) consideram ser necessário ampliar o conceito de ergonomia do ambiente construído e inserir nele a questão do consumo de energia, por meio da utilização de materiais oriundos de fontes renováveis a exemplo da madeira. Percebe-se, portanto, que há avanços nas pesquisas em torno dos domos geodésicos (Rebelo *et al.* 2019; Soleimani *et al.* 2017; Soleimani, Calautit, Hughes, 2016). Nas pesquisas consultadas sobre a eficiência energética das construções

geodésicas, observou-se que são investigadas questões relacionadas a: (1) condições climáticas extremas (regiões muito quentes e úmidas; regiões muito frias ou com muita variação de temperatura entre o dia e a noite; regiões sujeitas a ventos muito fortes e a abalos sísmicos); (2) técnicas de ventilação passivas utilizadas e sua eficácia no conforto térmico dos usuários. Nesse sentido, as construções geodésicas podem representar uma alternativa inspiradora para que arquitetos e *designers* projetem soluções de habitação de interesse social (HIS), direcionadas às populações menos favorecidas que padecem da pobreza energética relacionada a fatores como: ausência de fornecimento ou alto custo da energia, baixa renda da população e baixo desempenho energético das edificações e dos equipamentos nelas utilizados. Esses fatores levam os usuários a não terem o conforto ambiental em suas residências, com impacto na qualidade de vida, conforme apontam Rocha *et al.* 2023.

3 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

Na concepção do anteprojeto arquitetônico foi observada a Portaria MCid Nº 725 de 2023 do Ministério Das Cidades (Brasil, 2023), que contém em seu Anexo II - Especificações do projeto do empreendimento habitacional, as recomendações para HIS financiadas pelo governo federal. Foram também observadas as normas ABNT 15220:2005, 15575-2:2021 e o Código de Obras do Município de Contagem, instituído pela Lei Complementar Nº 55, de 23 de dezembro de 2008.

Pelas características da construção em análise, optou-se pelo método simplificado estabelecido pela NBR 15.575-2:2021, no qual são avaliadas as propriedades térmicas dos sistemas construtivos da envoltória (paredes e cobertura). Este procedimento avalia os sistemas de vedações externas quanto aos valores de transmitância térmica (U_{par}), percentual de abertura para ventilação ($P_{V,APP}$), percentual de elementos transparentes ($P_{t,APP}$) e área de superfície dos elementos transparentes ($A_{t,APP}$). Por outro lado, as coberturas são avaliadas quanto à sua transmitância térmica (U_{cob}).

O projeto foi concebido para ser implantado no Campus Contagem do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), localizado na cidade de Contagem, na região metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, Brasil, cidade com 957 metros de altitude; coordenadas geográficas: latitude 19° 56' 19'' Sul, longitude 44° 3' 10'' Oeste e situada na zona bioclimática 3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONCEPÇÃO DO ANTEPROJETO ARQUITETÔNICO

A unidade habitacional proposta tem diâmetro de 7,5m e 44m^2 de área. São três ambientes de permanência prolongada (APP) e um ambiente de permanência transitória (APT): APP_1, dormitório do casal; APP_2, dormitório para duas pessoas; APP_3, sala/cozinha e APT_1, banheiro. A altura máxima é de 4,79m e a superfície da envoltória possui 110,74m$^{2.}$ (Figuras 1 e 2).

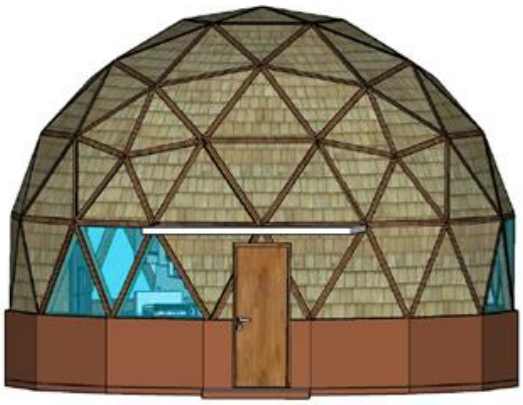


Figura 1 - Vista externa da HIS.

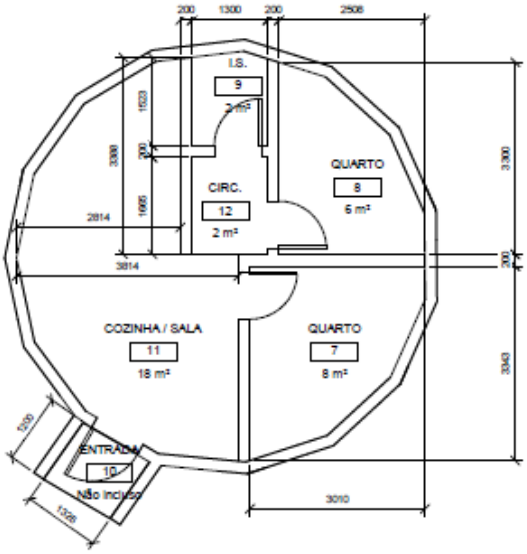


Figura 2 – Planta da HIS.

O sistema construtivo mais utilizado no PMCMV, de acordo com Peixoto e de Souza (2021) , é apresentado em comparação com o sistema proposto, no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação entre o sistema construtivo de unidades habitacionais do PMCMV e da solução proposta

Parte da estrutura	Tipo	Mais utilizados no PMCMV	Proposto para o domo geodésico
Paredes	1	Pintura (α) + Argamassa externa (1,5cm) + Parede em concreto maciço (10cm) + Gesso interno (5mm)	Parte inferior da parede em alvenaria em tijolo cerâmico maciço com dimensões de 12cmx10cmx19cm; parte superior da parede externa: pintura à base de tinta emborrachada (α<60) + compensado naval de 15mm + moldura triangular em madeira maciça de 20x100mm + compensado naval de 10mm na face interna.
	2	Pintura (α) + Argamassa externa (1,5cm) + Bloco cerâmico (9x14x24cm) + Gesso Interno (5mm)	
Coberturas	1	Telha fibrocimento natural (8mm)	Pintura à base de tinta emborrachada (α<60) + compensado naval de 15mm + moldura triangular em madeira de maciça de 20x100mm + compensado naval de 10mm na face interna.
	2	Telha fibrocimento natural (87mm) + manta térmica	

Para facilitar a montagem dos triângulos que compõem os polígonos do domo, optou-se por cortes angulares nas extremidades das barras de madeira, de forma a serem evitadas conexões metálicas.

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS ABERTURAS DE VENTILAÇÃO NATURAL

A norma ABNT NBR 15220-3:2005 recomenda que as aberturas para ventilação médias devem ficar entre 15 e 25% da área do piso de cada ambiente e que o código de obras do local de implantação deve ser também observado. As áreas do piso de cada ambiente do domo geodésico e os valores mínimos de abertura constam no Quadro 2.

Quadro 2 - Área e tipos dos ambientes dos domos e limites normativos para ventilação

Ambiente	Tipo	Área (m2)	Limites normativos mínimos para abertura e ventilação em relação à área do piso			Limites a serem observados
			Município de Contagem (abertura)	ABNT NBR 15575-4:2021 (ventilação)	ABNT NBR 15220-3:2005	
Quarto 1	Permanência prolongada (APP1)	7,57	**1/6 = 1,26m²**	7% = 0,53m²	15 a 25% = 1,14 a 1,89m²	1/6 da área
Quarto 2	Permanência prolongada (APP2)	6,42	**1/6 = 1,07m²**	7% = 0,45m²	15 a 25% = 0,96 a 1,60m²	
Sala / cozinha	Permanência prolongada (APP3)	19,46	**1/6 = 3,24m²**	7% = 1,36m²	15 a 25% = 2,92 a 5,87m²	
Banheiro	Permanência transitória (APT1	2,31	1/8 = 0,28m²	7% = 0,16m²	15 a 25% = **0,35** a 0,58m²	15% da área

Os limites estabelecidos pela Câmara Municipal de Contagem (2008) para os APP são maiores do que os recomendados pelas normas; porém, no caso do APT, o limite estabelecido pela ABNT NBR 15220:2005 é maior. No entanto, para o cálculo da área efetiva de abertura para ventilação, é necessário levar em conta a área de livre circulação do ar, descontadas as áreas dos perfis que estruturam a esquadria. No domo geodésico, as janelas serão de giro (ou abrir 90°), protegidas por sombreamento com ângulo de 30°. A área de livre circulação de ar nas aberturas é regulamentada pelo Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO (2012), no ANEXO II – Tabela de Desconto das esquadrias. Para esse tipo de janela, o INMETRO estabelece que o percentual tanto de abertura para iluminação natural quanto para ventilação natural é de 90%. O Quadro 3 contém informações sobre as janelas de cada ambiente do domo e as respectivas áreas de ventilação.

Quadro 3 - Dimensões das janelas e áreas de ventilação dos ambientes do domo

Ambientes	Área de abertura de cada janela	Qtde. de janelas	Tipo da janela	Área total (m^2)	% ventilação	Área de ventilação (m^2)
APP1	0,61	3	De giro	1,83	0,9	1,65
APP2	0,61	2	De giro	1,22	0,9	1,10
APP3	0,61	6	De giro	3,67	0,9	3,30
APT1	0,61	1	De giro	0,61	0,9	0,55
SOMA				7,33		6,60

Os índices de ventilação, tomados pela razão entre a área de ventilação e a área do ambiente, são representados no Quadro 4.

Quadro 4 - Percentual de ventilação por ambiente do domo geodésico

Ambientes	Área (m2)	Área de ventilação (m^2)	Percentual de ventilação (%)
APP1	7,57	1,65	22
APP2	6,42	1,10	17
APP3	19,46	3,30	17
APT1	2,31	0,55	23

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS TRANSPARENTES

Os elementos transparentes das paredes externas ou das coberturas têm impacto significativo na troca de calor entre os ambientes externo e interno das construções. A Tabela 16 da ABNT NBR 15575-4:2021 estabelece a proporção de referência dos elementos transparentes ($P_{t,APP}$), em função das áreas de cada APP. Sendo assim, para os ambientes de até $20m^2$, caso do domo geodésico em análise, o $P_{t,APP}$ deve ser ≤ 20% da área do piso. No caso de APP com área superior a $20m^2$, a Norma estabelece que o $P_{t,APP}$ deve ser ≤ $4,0m^2$, o que não é o caso do domo geodésico. As informações sobre os elementos transparentes do domo geodésico são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Percentual de elementos transparentes por ambiente do domo geodésico

Ambientes	Área (m2)	Área de elementos transparentes (m^2)	Percentual de transparência (%)
APP1	7,57	1.65	22
APP2	6,42	1.10	17
APP3	19,46	3.30	17
APT1	2,31	0.55	23

4.4 Dimensionamento do Processo Construtivo da Parede Externa e da Cobertura

A parede externa da edificação é constituída por um processo construtivo híbrido, sendo a parte inferior em alvenaria de tijolo cerâmico maciço e a parte superior em madeira, sendo as faces externa e interna em compensado naval e a moldura em madeira maciça com de seção transversal. Foram calculadas quatro alternativas de processos construtivos, com variação na altura da parede em alvenaria, de forma a se encontrar o sistema que atendesse aos parâmetros de desempenho térmico. O primeiro sistema construtivo com parede de 1,00m de altura é apresentado na Figura 3.

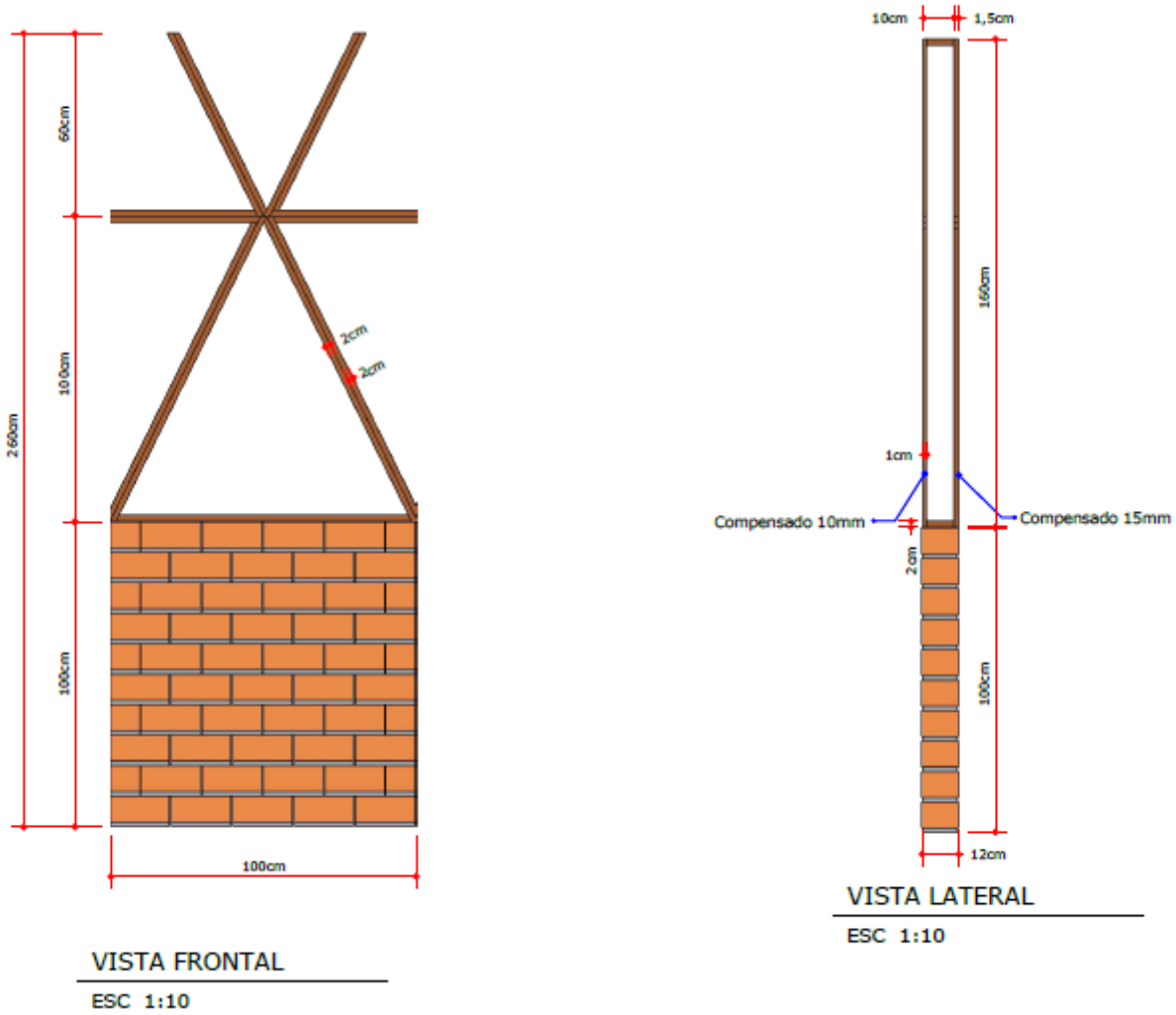


Figura 3 - Primeira versão do processo construtivo da parede externa.

Verificou-se, por meio do modelo matemático para cálculo dos parâmetros de desempenho, que o sistema construtivo 1 (Figura 3) resulta em 61 KJ/m^{2}K de capacidade térmica, valor abaixo do normativo (130 KJ/m^{2}K). Outras três alternativas foram analisadas e apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Comparação dos parâmetros normativos de desempenho térmico dos quatro sistemas construtivos

PARÂMETROS DE DESEMPENHO TÉRMICO		Valores				
		Normativos	Calculados			
			Sistema construtivo			
			1	2	3	4
			Parede h=1,0m	Parede h=2,0m	Parede h=2,6m	Parede h=2,2m
Transmitância térmica (U) - W/m²K	Paredes (U_{par})	Para α < 60, T ≤ 3,7	2,44	2,62	2,31	2,75
	Cobertura (U_{cob})	Para α < 60, T ≤ 2,5	1,09	1,09	1,09	1,09
Capacidade térmica das paredes (Ct_{par}) - KJ/m²K		≥ 130	61	117	264	144,1
Percentuais de ventilação natural (Pv) para cada ambiente	$P_{v,APP1}$	≥ 1/6 da = área (17%)	22%	22%	22%	22%
	$P_{v,APP2}$		17%	17%	17%	17%
	$P_{v,APP3}$		17%	17%	17%	17%
	$P_{v,APT}$	≥ 15%	23%	23%	23%	23%
Percentuais de transparência (Pt) para cada ambiente	$P_{t,APP1}$	≤ 22%	22%	22%	22%	22%
	$P_{t,APP2}$		17%	17%	17%	17%
	$P_{t,APP3}$		17%	17%	17%	17%
	$P_{t,APT}$	N/C	23%	23%	23%	23%

Conforme Quadro 6, os sistemas construtivos 1 e 2 não atendem ao parâmetro de capacidade térmica das paredes. Por outro lado, os sistemas construtivos 3 e 4 apresentam respectivamente os valores de 264 e 144,1 KJ/m²K, e portanto atendem ao limite normativo para a capacidade térmica. O sistema construtivo 4, constituído por parede de alvenaria de tijolo maciço até a altura de 2,20m, que serve de apoio para o domo geodésico e completa a parede externa até atingir o pé-direito de 2,60m e também a cobertura, atendeu a todos os parâmetros normativos.

Os resultados dos cálculos dos parâmetros de desempenho térmico elaborados com base no modelo matemático, baseado nas normas brasileiras ABNT NBR 15575 e 15220, apontam para a viabilidade de se edificar habitação social unifamiliar na forma de domo geodésico. O sistema construtivo híbrido da parede externa da habitação, combinando alvenaria em tijolo cerâmico maciço e domo em madeira, mostrou-se satisfatório para as condições climáticas típicas da região de implementação da obra.

O sistema construtivo híbrido, por respeitar as recomendações das normas de desempenho, contribui para a eficiência energética da habitação, com possível impacto no conforto do usuário. Conforme Rocha *et. al* (2023), essas questões não têm sido levadas em conta nos empreendimentos financiados pelo governo brasileiro, que buscam enfrentar o déficit habitacional. Vale salientar que o conforto ambiental é um direito de todos, incluindo, naturalmente, a classe menos favorecida.

A combinação de materiais construtivos na envoltória de domos geodésicos é defendida por Pastukh *et. al.* (2021), o que foi confirmado por esta pesquisa, na medida em que propõem paredes em sistema construtivo não homogêneo, composto por tijolos maciços e madeira. Diferentemente das alternativas sugeridas por esses autores, nesta pesquisa optou-se por simplificar o tipo de conexão entre as barras que constituem a parte de madeira da envoltória, com vistas a minimizar os custos de construção, simplificando sobremaneira a montagem do domo.

A simplicidade na configuração da parte em madeira, na envoltória do domo, facilita a pré-fabricação de peças, fato identificado por Piccardo e Hughes (2022) como estimulador da economia circular que pode envolver mão-de-obra local no setor construtivo. No caso da proposta de moradia aqui apresentada, as dimensões das peças constitutivas do domo favorece também a reutilização de madeira na estrutura dos triângulos estruturantes da envoltória.

A cor da envoltória, em associação com as características dos materiais dela constituintes, tem impacto na troca de calor entre o ambiente externo e interno, conforme apontam *Hong et. al* (2022). Levando em conta que a cor branca da cobertura reflete mais a energia solar incidente, optou-se pela utilização de tinta emborrachada clara sobre a madeira, o que, ao mesmo tempo, impermeabiliza e protege a envoltória e minimiza a troca de calor com o ambiente construído.

4 **CONCLUSÕES**

Nesta pesquisa, levou-se em conta a manutenção do déficit habitacional brasileiro ao longo dos anos, preocupação do governo federal, que busca minimizar o problema por meio da implementação de políticas públicas, mais especificamente o PMCMV. Por se tratar de uma situação que envolve instâncias governamentais e a sociedade civil, buscou-se, uma solução arquitetônica de HIS, inspirada no programa de necessidades do PMCMV, na forma de domo geodésico com estrutura e envoltória de madeira, apresentado, portanto, simplicidade estrutural, resistência e leveza.

Especial atenção foi dada às condições de habitabilidade (desempenho térmico, conforto do usuário, qualidade da iluminação natural e da ventilação), em busca de uma solução arquitetônica adequada à zona bioclimática brasileira 3, mais precisamente no município de Contagem/MG. As normas ABNT 15220:2005, 15575:2021 e o Código de Obras do Município de Contagem, instituído pela Lei Complementar Nº 55, de 23 de dezembro de 2008, serviram de base para avaliação do nível mínimo de desempenho térmico, por meio do procedimento simplificado.

Os resultados evidenciaram que o sistema construtivo das paredes não pode ser totalmente em madeira, uma vez que o parâmetro de capacidade térmica não seria atingido. Por isso, optou-se por um sistema construtivo híbrido para as paredes, sendo que a parte inferior (até a altura de 2,20m) seja em tijolo cerâmico maciço e, a partir daí e em toda a cobertura, a estrutura e a envoltória em madeira atenderam aos critérios de desempenho térmico exigido pela norma brasileiras. Como continuidade da pesquisa, sugere-se fazer ajustes no sistema construtivo de forma a adaptá-lo a outras zonas bioclimáticas.

5 **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 15220:2005 - Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 15575:2021 - Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro.

Barbosa, E. F.; Labaki, L. C.; Castro, A. P.; Lopes, F. S. (2024). Energy Efficiency and Thermal Comfort Analysis in a Higher Education Building in Brazil. *Sustainability*, *16*(1), 462.

Barth, F.; Luiz, H. M.; Vasconcelos, C. (2017). Compacidade dos Espaços Arquitetônicos. Mix Sustentável, v. 3, n. 5, p. 100–108.

Bavaresco, M. V., Cuchivague, H. Y. O., Schinazi, A., Ghisi, E. (2021). Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. *Ambiente Construído*, *21*, 263-292.

Brasil. Ministério das Cidades (2023). Portaria MCid Nº 725.

da Silveira Grandi, M.; de Almeida, R. G.; Moreira, M. F. (2016). Habitação social e mobilizações por moradia no brasil. Quadro geral e atualidade. Working paper series CONTESTED CITIES. Serie (V) Políticas y luchas por la vivienda. WPCC-16004.

de Freitas Soares, T. L.; de Arruda, A. J. V. (2016). As estruturas Geodésicas do Ecocamp na Patagônia: Um estudo sobre seus aspectos ergonômicos e sustentáveis. *Blucher Engineering Proceedings*, *3*(3), 216-227.

de Lózar de la Viña, M. (2013). Casa cúpula en Carbondale, Illinois. RB Fuller, 1960. *ARQ (Santiago)*, (84), 14-27.

Fuller, R. B. 1954. Building Construction Patent 2682235. United States Patent Office

Fuller, R. B. 1965. Laminar Geodesic Dome Patent 3203144. United States Patent Office.

Hassan, F. (1986). Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates. Chicago: The University of Chicago Press.

Hong, Chao *et al.* (2022). Is the design guidance of color and material for urban buildings a good choice in terms of thermal performance? Sustainable Cities and Society, v. 83, p. 103927.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Censo Demográfico. Disponível em https://censo2022.ibge.gov.br/sobre/conhecendo-o-brasil.html

Laila, Theska et al. (2018). The Constructive Advantages of Buckminster Fuller's Geodesic Domes and Their Relationship to the Built Environment Ergonomics. In: Advances in Ergonomics in Design: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Ergonomics in Design, 2017, Los Angeles. Springer International Publishing, p. 357-368.

Mascaró, J. L. (2010). O Custo das Decisões Arquitetônicas. 5ª ed. Porto Alegre.

Moraes, A. F. S.; Picchi, F.; Granja, A. D. (2016). Variáveis e índices geométricos de projeto arquitetônico relacionados ao custo de empreendimentos. Anais do XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo: ANTAC. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308607804>

Pastukh, O. *et al.* (2021). The use of modern polymer materials and wood in the construction of buildings in the form of geodesic domes. v. 01024.

Peixoto, L. B.; de Souza, R. V. G. (2021). Desempenho térmico pela ABNT NBR 15575: versões 2013 e 2021. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, v. 16, p. 840-849.

Piccardo, C.; Hughes, M. (2022). Design strategies to increase the reuse of wood materials in buildings: Lessons from architectural practice. *Journal of Cleaner Production*, *368*.

Rebelo, H. B.; Cismasiu, C.; Santos, D. (2019). Exploratory study on geodesic domes under blast loads. International Journal of Protective Structures.

Rocha, L.; Póvoas, R. F.; Restivo, J. (2023). The Right to Comfort in Social Housing: Energy and Thermal Performances as Parameters of a Systemic Analysis. Buildings, v. 13, n. 5, p. 1173.

Soares, T. L. de F.; Arruda, A. J. V. de. (2016). As Estruturas Geodésicas do Ecocamp na Patagônia: Um Estudo Sobre Seus Aspectos Ergonômicos e Sustentáveis. n. 1, p. 216–227.

Soleimani, Z.; Calautit, J. K.; Hughes, B. R. (2016). Computational Analysis of Natural Ventilation Flows in Geodesic Dome Building in Hot Climates. Computation, v. 3, n. 4.

Soleimani, Z. *et al.* (2017). Climatic analysis of ventilation and thermal performance of a dome building with roof vent. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability, v. 171, n. 8, p. 411–424.

Tubelo, R.; Rodrigues, L.; Gillott, M.; Zuneet, M. (2021). Comfort within budget: Assessing the cost-effectiveness of envelope improvements in single-family affordable housing. Sustainability, v. 13, n.7, p. 3054.

Agradecimentos

Os autores agradecem: à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG pelo apoio técnico e financeiro.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ARQUITECTURA POPULAR PORTUGUESA – ASPECTOS BIOCLIMÁTICOS

Jorge Mascarenhas[a]; Lurdes Belgas[b]; Fernando G. Branco[c]

[a] Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal, jmascarenhas@ipt.pt

[b] Instituto Politécnico de Tomar, ISISE, ARISE, Tomar, Portugal, lbelgas@ipt.pt

[c] Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, fjbranco@dec.uc.pt

RESUMO

O território continental de Portugal é relativamente pequeno quando comparado com outros países europeus. No entanto, apresenta uma grande diversidade de regiões com características orográficas, climáticas, sociais e culturais bastante distintas. Essa diversidade reflete-se também na grande variedade de estilos de construção característicos da arquitetura popular. Em cada região, as construções foram concebidas para se adaptarem melhor às diferentes condições locais e erigidas por habitantes locais, utilizando recursos limitados e evidenciando um notável conhecimento empírico. Esse saber sobre como adequar-se às condições climáticas regionais, mediante o uso de técnicas simples de construção, foi transmitido e refinado de geração em geração.

Num momento em que as preocupações com a sustentabilidade e a ecoeficiência são constantes, torna-se essencial conhecer, entender e divulgar os aspetos bioclimáticos dessas construções. Este trabalho apresenta exemplos da arquitetura popular de diversas regiões de Portugal, destacando suas principais características bioclimáticas. O conhecimento das particularidades da arquitetura popular contribuirá para uma melhor adaptação das construções às distintas condições regionais do país e para a sustentabilidade do ambiente construído, podendo promover sua aplicação tanto em novas edificações quanto em intervenções de reabilitação.

Palavras-chave: Construções, arquitetura bioclimática, técnicas de construção.

1 INTRODUÇÃO

A arquitetura bioclimática tem como princípios fundamentais a sustentabilidade ambiental e o conforto térmico (Widera, 2015). Possui uma ligação à Natureza, pois tem em especial atenção o respeito pela paisagem existente e pela integração dos edifícios no seu seio, atendendo ao clima e condições ambientais no sentido de permitir alcançar o conforto térmico no interior (Manzano-Agugliaro *et al*., 2015) e simultaneamente evitar a dependência total de sistemas mecânicos, que são considerados como suporte.

Os edifícios bioclimáticos caracterizam-se pela utilização dos elementos de construção, incluindo paredes, janelas, coberturas e pavimentos para recolher, armazenar e distribuir a energia solar térmica e evitar o sobreaquecimento (Ozarizov e Altan, 2023) (Kapur, 2017). Os fluxos de calor ocorrem principalmente através dos mecanismos naturais de convecção, condução e radiação.

Os principais fatores que entram em linha de conta na conceção de um edifício bioclimático, que influenciam as suas características térmicas e de conforto, são: o clima, a localização (em meio urbano, rural ou outro), o tipo de coberto vegetal da região (presença/ausência), as características geomorfológicas, a orientação dos ventos, a exposição e orientação solar ou sombreamento,

proximidade de cursos de água (Faria, 2010). Assim, um edifício bioclimático apresenta uma maior eficiência energética, levando a um menor impacto ambiental (Bugenings e Kamari, 2022).

Em Portugal Continental, fatores como a latitude, a altitude, a proximidade do mar, a distância do mesmo e a concordância do relevo em relação à linha da costa concorrem para que, no conjunto, exista alguma diversidade climática, podendo identificar-se quatro conjuntos climáticos: o norte litoral, de clima mediterrânico, com influência marítima, caracterizado por amplitudes térmicas anuais baixas, verões quentes e invernos amenos, mas com a maior parte dos meses a apresentar um elevado teor de humidade e com precipitação elevada ao longo de praticamente todo o ano; o norte interior possui também um clima mediterrânico, mas com influência continental, apresentando a maior amplitude térmica anual do país, com invernos rigorosos, precipitação fraca ao longo do ano, por vezes sob a forma de neve. No verão, o clima torna-se quente e seco; nas regiões montanhosas, o clima é de altitude, com verões frescos e húmidos, invernos rigorosos e precipitação elevada ao longo do ano, assumindo-se como neve na mais fria estação do ano; a Sul, o clima é tipicamente mediterrânico, com verões longos e maior calor, apresentando cinco a seis meses secos por ano. Já o inverno é ameno e pouco chuvoso, com menor precipitação do que no resto do país.

Esta realidade reflete-se na grande diversidade de tipologias de construções da arquitetura popular portuguesa. Em cada uma das regiões, as construções foram concebidas de forma a melhor se adaptarem às diferentes condições climatéricas locais, sendo construídas de forma simples com materiais locais e integrando os principais aspetos bioclimáticos. A arquitetura popular mostra exemplos extraordinários de sabedoria e de conhecimento e de adaptação (Mateus, *et al.,* 2015)

A crescente consciencialização da importância do ambiente e do impacto das alterações climáticas tem levado, por todo o mundo, a adotar abordagens de conceção de edifícios sustentáveis para melhorar a qualidade dos edifícios. A conceção bioclimática é uma dessas abordagens que visa criar edifícios confortáveis e energeticamente eficientes, utilizando recursos naturais e dados climáticos locais (Elaouzy *et al.*, 2022). Esta abordagem tem em conta vários fatores, como a configuração da forma do edifício, a orientação, a disposição do espaço interior, a conceção da fachada, a utilização da vegetação, a ventilação natural e a utilização da massa do edifício para reduzir a energia de forma passiva e diminuir a dependência de sistemas ativos (Varmora e Jain 2022, Ávalos *et al*. 2021), nas intervenções de reabilitação (Tundrea e Budescu, 2013, Casasnovas e Graus, 2007, Olgayay, 2016, Couvelas, 2020, Ozarisoy e Atan, 2021, Ferreira, *et al*,. 2013, Oliveira *et al*., 2013).

Verifica-se, atualmente, o desenvolvimento de estratégias bioclimáticas para aplicação a diferentes tipos de edifícios (Bestara, 2021) (Krivenco *et al.,* 2023, Fernandes, *et al*.,2013) e a diversos países com climas distintos (Bugenings e Kamari, 2022, Elbakheit, R. A. 2012). tanto em obras novas, como em obras de reabilitação (Matos, 2023).

O conhecimento adquirido no estudo dos princípios bioclimáticos das construções da arquitetura popular portuguesa poderá constituir mais um contributo importante neste domínio, a fim de se obter maior conforto (Cruz *et al*., 2011, Fernandes *et al*., 2019), a sustentabilidade do ambiente, procurar resolver o consumo de energia, dada a maior eficiência energética (Bajcinovci e Jerliu, 2016) que a sua integração confere aos edifícios, com impacto positivo nas alterações climáticas (El-Sayed, 2023, Diana *et al.*, 2020, Sheliahovich, 2011, Suliman, 2014, Maciel, 2007, Košir, 2019).

O presente trabalho apresenta diferentes tipos de construções da arquitetura popular portuguesa, salientando-se as suas principais particularidades e caraterísticas bioclimáticas, com o objetivo de incentivar a sua aplicação.

2 EXEMPLOS DE CONSTRUÇÕES DA ARQUITETURA POPULAR PORTUGUESA

As construções da arquitetura popular materializam de forma particular uma pluralidade de condicionalismos — climáticos, geológicos, económicos e culturais — dos locais onde se inserem. A sua construção é em geral realizada de maneira simples, com materiais locais tradicionais (madeira, pedra, palha, argila, lama, etc.), o que se reflete regionalmente em modos de construir ímpares e numa riqueza de variados tipos de manifestações arquitetónicas. As soluções arquitetónicas que apresentam, associadas aos tipos de materiais que utilizam, conferem melhor isolamento térmico e acústico a estas construções, contribuindo para uma melhoria de conforto e de eficiência energética.

De um modo geral, estas construções integram um conjunto de caraterísticas comuns, de acordo com a região climática onde se inserem. Assim, nas regiões com clima quente e seco, as construções assentam diretamente sobre o solo, utilizam materiais pesados e paredes espessas, possuem coberturas planas, fachadas em cores claras e com aberturas pequenas, pátios interiores com fontes ou espelhos de água (para arrefecimento) e apresentam proximidade entre as edificações. Nas regiões com clima húmido, as construções têm estruturas elevadas do solo, utilizam materiais leves, paredes de pouca espessura (que minimizam o efeito da humidade), fachadas com aberturas (que permitem a ventilação), têm telhados com grande inclinação, possuem varandas e as edificações encontram-se afastadas umas das outras. Já as construções nas regiões com clima frio, têm estruturas elevadas, utilizam materiais de baixa emissividade térmica (o calor mantém-se mais tempo no interior), possuem paredes espessas, fachadas orientadas a sul com aberturas amplas, telhados com inclinação média e proximidade entre edificações (Guerreiro e Guarda, 2012).

As referidas disposições construtivas integram as principais caraterísticas da conceção bioclimática que são: isolamento térmico adequado da envolvente exterior do edifício e estruturas estanques ao ar; utilização da energia solar para aquecimento no inverno, que pode ser conseguido através de um sistema de aquecimento solar passivo adequado; eliminação do calor do edifício através de sistemas de arrefecimento passivo e de ventilação natural; proteção do edifício contra o sobreaquecimento através de soluções adequadas de sombreamento e vegetação no verão; utilização da energia solar para a iluminação natural durante todo o ano; proporcionar um ambiente interior e exterior agradável e confortável para os habitantes (Faia, 2017, Pulido, 2012).

Na presente comunicação descrevem-se e ilustram-se as características particulares de alguns edifícios da arquitetura popular portuguesa, no que respeita à forma, materiais utilizados e técnicas construtivas, que permitiram a sua adaptação ao clima, garantindo ao mesmo tempo um adequado nível de conforto nas habitações (AAVV, 1980). Escolheram-se oito tipos distintos de construções do continente de Portugal, nomeadamente: Casa do Minho Litoral; Casa de Trás-os-Montes; Casa das Dunas do Litoral Centro; Casa das Beiras; Casa do Alentejo; Casa do Moleiro do Rio Guadiana; Casa das Serras Algarvias e Casa do Litoral Algarvio. Estas casas foram escolhidas porque, apesar da diversidade de tipologias da arquitetura popular existentes em Portugal, as regiões em que se inserem constituem grandes unidades naturais, com idênticas formas de relevo, de clima, de revestimento vegetal e da própria atividade humana (Moutinho, 1995).

2.1 CASA DO MINHO LITORAL

O Minho Litoral é uma região do norte de Portugal que possui um clima suavizado pela influência oceânica, caracterizado pela existência de verões amenos e de invernos frios com grande pluviosidade, devido às sucessivas vertentes das montanhas, densamente arborizadas, que condensam a humidade vinda do mar. As casas tradicionais possuem paredes de alvenaria de granito, material impermeável e de grande resistência, com piso sobradado, onde o rés-do-chão resguarda os animais (Almeida, 2021).

Estas edificações apresentam pés-direitos baixos, para maior facilidade de aquecimento. Os tetos, sobretudo os das salas de estar, são em masseira, para melhorar o isolamento térmico (Figura 1). Possuem palheiros adossados aos quartos que também melhoram o isolamento. O forno encontrava-se localizado no lado norte da cozinha. No piso inferior, por baixo das zonas habitadas, eram alojados os animais, que promoviam o aquecimento. A adega era enterrada, para maior frescura no verão.

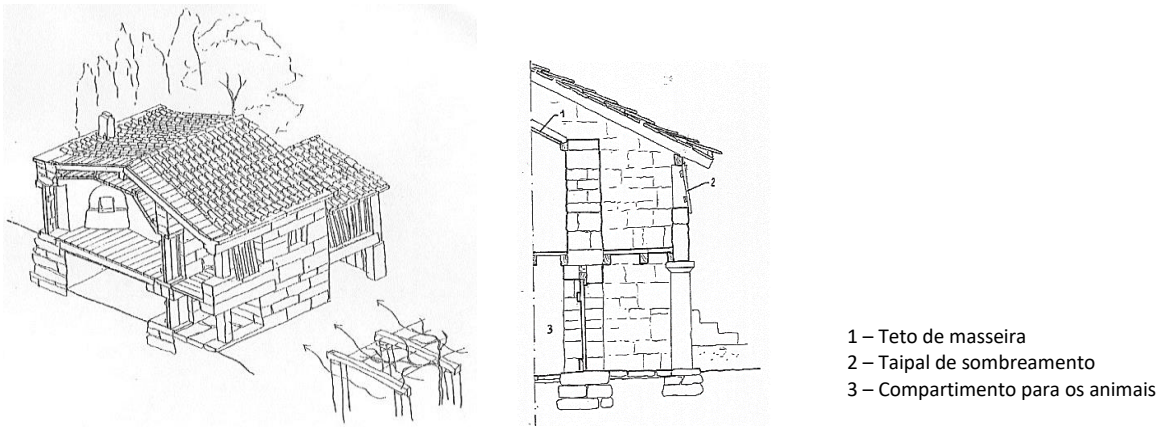


Figura 1 – Casa do Minho Litoral: corte em perspetiva e corte pormenorizado

O lado norte da casa encontra-se por vezes semienterrado e protegido por floresta. O lado sul é sombreado pela verdura das latadas e pelo sombreamento das varandas. As varandas estão orientadas entre a direção sul e a direção oeste, a fim de captarem a maior quantidade possível de radiação solar e evitar, simultaneamente, a direção predominante dos ventos no inverno. Estas varandas, com painéis de sombreamento amovíveis, providenciam zonas de amortecimento que funcionam como termorreguladores, aumentando os ganhos solares no inverno e reduzindo as perdas de calor.

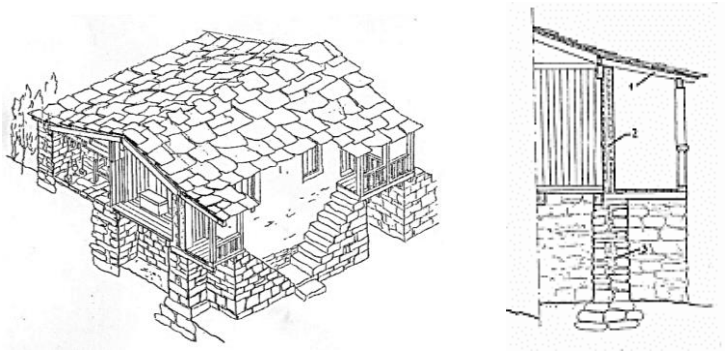
2.2 CASA DE TRÁS-OS-MONTES

Nesta região do nordeste de Portugal, a influência do mar é muito reduzida pelas sucessivas montanhas do Minho, com orientação norte-sul. Por esse motivo, o clima tem caraterísticas do tipo continental, com invernos frios, verões muito quentes e secos, registando-se grandes amplitudes térmicas quer diárias, quer sazonais. Em regiões de clima frio é necessário que as habitações tenham uma forma compacta, a fim de reduzir as superfícies em contacto com o ambiente exterior, e assim diminuir as perdas de calor pela envolvente. Nestas regiões, o fator mais importante prende-se com a necessidade de manter o calor no interior das habitações.

As habitações são construídas em banda, acompanham o relevo para aproveitarem a inércia do terreno, sendo integradas nas encostas com maior exposição solar, a fim de aumentar os ganhos solares e obter proteção contra os ventos frios. As casas possuem dois pisos sobrepostos, mas independentes, marcando uma clara distinção de funções (Figura 2). A varanda e a escada exterior paralela à habitação são também típicas destas construções.

Nestas casas, as paredes são executadas com dois panos de pedra, de elevada espessura e possuindo terra entre elas, o que confere grande inércia térmica à parede. Algumas paredes exteriores do piso superior eram executadas com entrançado de madeira coberto de terra (tabique) para conferir maior inercia e isolamento térmico face às grandes amplitudes térmicas. A cobertura, habitualmente de duas águas, com a vertente mais extensa virada a sul, está revestida com lâminas ardósia ou xisto para melhor absorver a radiação, captando e armazenando o calor. A ardósia favorece ainda o

escorregamento da neve. Podem ser dotadas de uma varanda, com estrutura variável, que corre a fachada mais comprida parcialmente ou na sua totalidade, tendo como funções o sequeiro e arrumações. O telheiro das varandas proporciona o sombreamento no verão. Os celeiros e sótãos são utilizados como barreira ao calor, através do armazenamento de palha no seu interior, e serviam também para aumentar a capacidade de isolamento.



1 – Cobertura da varanda
2 – Parede exterior de tabique fasquiado
3 – Parede de alvenaria de xisto ou de granito, com dois panos de pedra

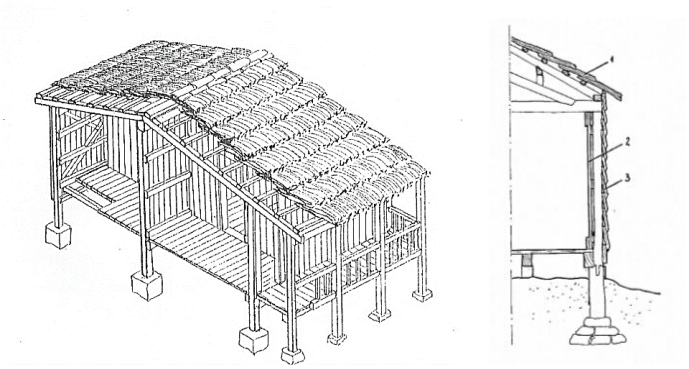
Figura 2 – Casa de Trás-os-Montes: corte em perspetiva e corte pormenorizado.

A fachada norte, de menores dimensões encontra-se protegida da geada com vegetação. A cozinha está colocada no lado mais frio e húmido, de forma a aproveitar o aquecimento gerado na confeção dos alimentos para aquecimento dos espaços interiores. Nesta região são também colocados os estábulos por baixo das zonas habitadas, de forma a aproveitar o calor dos animais (Ferreira *et al*., 2015). Nessas casas, as janelas e portas para o exterior têm dimensões bastante reduzidas e em número muito reduzido, para limitar as perdas de calor.

2.3 CASA DO LITORAL CENTRO

A região centro litoral, situa-se numa faixa junto ao mar, pelo que algumas casas são construídas sobre o extenso areal das praias. Devido a forte influência do oceano Atlântico, os invernos têm temperaturas amenas, mas são ventosos e húmidos. Nos verões, as temperaturas são elevadas. Como as amplitudes térmicas diárias e anuais são bastante reduzidas, a inércia térmica dos edifícios não oferece muita vantagem. Nestas zonas, a radiação solar é bastante intensa, pelo que as construções devem incluir, na sua arquitetura, formas de evitar o aquecimento dos espaços interiores, quer pela incidência da radiação solar direta, quer pela incidência da radiação difusa.

As construções características (Figura 3) das regiões com clima quente e húmido normalmente são leves, muito ventiladas e amplamente protegidas da radiação solar, oriunda de todas as direções. A ventilação dos espaços interiores é um fator muito importante neste tipo de clima, como forma de dissipar o calor, reduzir o nível de humidade e proporcionar conforto pelo aumento da velocidade do ar. Para tal, eram criadas grandes aberturas nas paredes exteriores dos edifícios, protegidas da radiação solar com recurso a dispositivos de sombreamento. Estas aberturas estão muitas vezes protegidas com grelhas feitas com ramos ou canas escuras com pequenos intervalos entre si, com o objetivo de reduzir o excesso de luminosidade no interior das habitações, os tetos eram depois pintados de branco para que refletissem a luz, distribuindo-a uniformemente pelo interior das habitações (Coch, 1998).



1 – Cobertura em palha de estorno
2 – Paramento interior de tabuado para isolamento
3 – Paramento exterior de tabuado para sombreamento

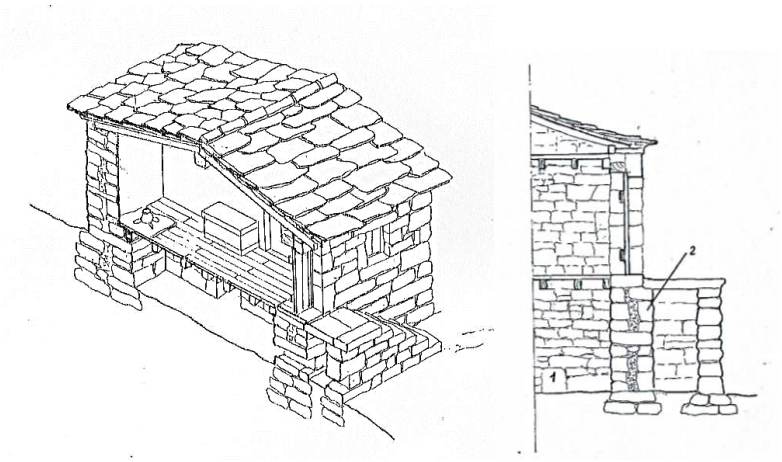
Figura 3 – Casa do Litoral Centro: corte em perspetiva e corte pormenorizado.

Os edifícios eram implantados afastados uns dos outros, de forma a não serem criadas barreiras à circulação do ar entre eles. A cobertura dos edifícios, que funciona como barreira à entrada da radiação solar e da chuva, era normalmente executada com materiais leves, como a palha de estorno, colocados de maneira a permitir a permeabilidade ao ar, evitando assim o armazenamento de calor e as condensações.

2.4 CASA DAS BEIRAS

Esta região, com alguma altitude, possui um clima caracterizado por frio intenso durante o inverno, com dias consecutivos de chuva e neve nas zonas altas, e calor no verão, amenizado pela altitude. Verifica-se ainda a ocorrência de calor ou de frio em curtos espaços de tempo nas estações intermédias. Desta forma, a arquitetura destas regiões incorpora sistemas flexíveis, que se possam adaptar às condições que se vão verificando no exterior.

Os aglomerados urbanos concentram-se nos locais de menor exposição, em encostas voltadas a sul. As casas (Figura 4), de pequena dimensão, são austeras de paredes de alvenaria aparente de xisto ou de granito. Têm coberturas de duas águas frequentemente associadas a um único piso térreo com sobrado sob o qual se situam as *lojas* para os animais (Salvado, 2021).



1 – Compartimento (loja) para os animais
2 – Parede de alvenaria com dois panos de pedra, travada.

Figura 4 –Casa das Beiras: Corte em perspetiva e corte pormenorizado

Verifica-se a inexistência de chaminés, o que permitia conservar o calor e, através do fumo, preservar as madeiras das estruturas contra infestantes. Possuem aberturas na envolvente, que podem ser abertas na totalidade, permitindo a máxima passagem de ar e luz solar quando necessário, mas com

dispositivos de sombreamento que permitam controlar convenientemente a entrada de radiação solar e a ventilação dos espaços interiores, que permitam aumentar a resistência térmica dessas aberturas e com isso reduzir o fluxo de calor para o exterior das habitações durante a estação de aquecimento.

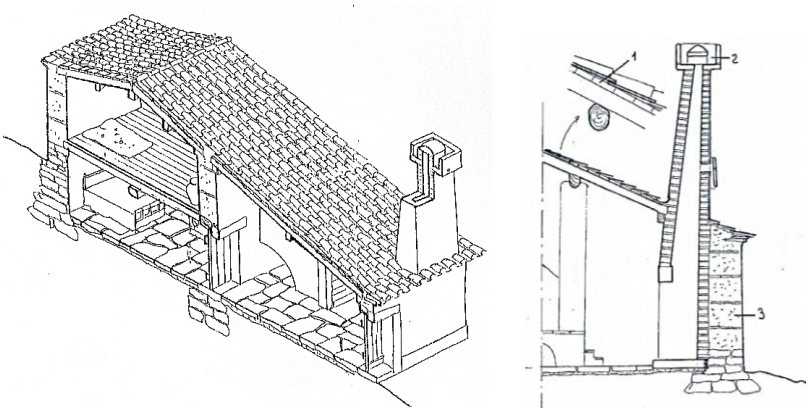
2.5 CASA DO ALENTEJO

O Alentejo é uma vasta região de Portugal, relativamente plana e não suficientemente elevada para condensar a humidade vinda do mar. A secura torna a vegetação escassa, e esta escassez acentua as amplitudes térmicas diurnas. Os verões são longos e registam temperaturas muito elevadas e os invernos são suaves nas zonas em que se sente a influência do oceano.

Nesta região, as casas (Figura 5) possuem paredes espessas de terra, predominando a construção em taipa, para tirarem partido da maior inércia térmica. Face à espessura das paredes, os vãos são quase sempre de pequenas dimensões, têm um aspeto de concavidade, de profundidade, muito acentuado, produzindo um efeito de sombra muito marcado. As fachadas são pintadas com cal branca, dada a abundância de calcários na região, o que contribui para a frescura do interior das casas, uma vez que a cor clara reflete a radiação. Para além das portas e janelas existe também uma profusão significativa de óculos e frestas, cuja finalidade é a de iluminar e/ou arejar determinados compartimentos interiores (normalmente zonas de escadas). A cor também está presente na casa alentejana, não só na cor terrosa dos telhados, como nas cores azul, verde, amarelo ocre e vermelho *sangue de boi*, resultantes de pigmentos que se adicionam à cal, para emoldurar os vãos, assinalar os socos e as sancas dos beirados.

As casas são construídas em banda, em aglomerados compactos, com pouco espaço de separação entre elas e com grande pé-direito. Os lotes são estreitos e profundos. Esta disposição criava sombreamento, reduzindo a exposição das paredes à radiação solar, e aumentava a inércia térmica do conjunto. Alguma separação entre casas permitia a circulação de ar fresco durante o período noturno, ajudando ao arrefecimento das habitações.

As coberturas são em telha cerâmica, de canudo, quase sempre de uma ou duas águas pouco inclinadas. O desvão é alto, de forma a permitir a estratificação do ar no interior das habitações, com o ar quente no topo, onde se situavam os arrumos e o ar mais frio junto das zonas de estar.



1 – Guarda-pó de tijolo lambaz
2 – Chaminé "balão", com entrada de ar lateral
3 – Parede espessa de taipa

Figura 5 – Casa do Alentejo: Corte em perspetiva e corte pormenorizado.

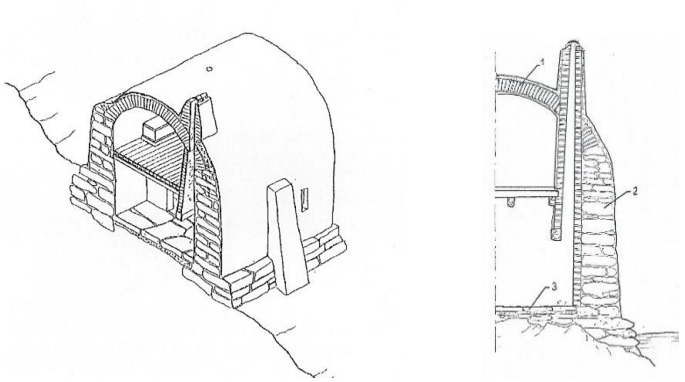
A chaminé é um elemento indissociável da composição da casa alentejana. Nestas casas, as chaminés são altas, possuindo a forma de um paralelepípedo alongado, com a face maior voltada para o lado mais exposto. Por estar colocada na zona mais baixa da vertente do telhado mais exposta à radiação, favorece a circulação do ar o que permite melhorar a ventilação quando a lareira está apagada. Por vezes existem as chaminés do tipo "balão", que reforçam a circulação do ar. Os pavimentos exteriores

são geralmente em pedra, podendo ser molhados nos dias quentes, para promover algum arrefecimento evaporativo.

2.6 CASA DO MOLEIRO JUNTO AO RIO GUADIANA

A região do Alentejo junto ao rio Guadiana é uma zona demasiado interior para que a influência do oceano se possa sentir. O rio Guadiana corre encaixado nas suas margens, havendo pouca brisa, constituindo-se aí um microclima. Os verões são quentes e secos, as chuvas são escassas, mas quando ocorrem são muito intensas.

Nesta zona, as casas (Figura 6) têm uma configuração mais compacta. São constituídas por paredes de alvenaria de pedra e cobertura em abóbada de tijolo, o que confere maior inércia às construções. As aberturas são escassas, para evitar a humidade dos nevoeiros no inverno e a entrada de ar quente no verão. No inverno, a parte inferior das casas é humedecida pela água das levadas. Estas casas possuem contrafortes, para melhor resistirem às torrentes intempestivas (Figura 6).



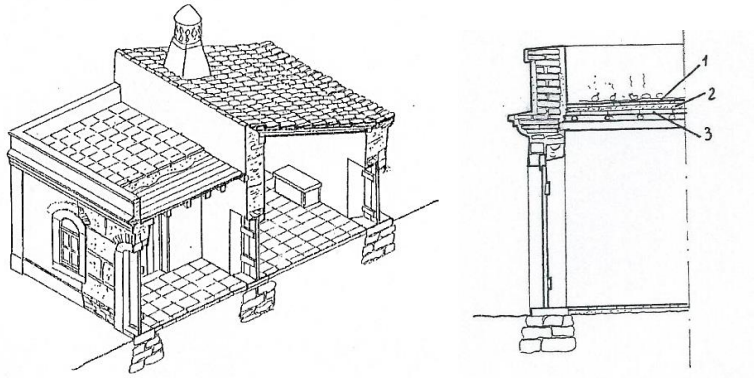
1 – Abóbada de alvenaria de tijolo
2 – Parede grossa de alvenaria de pedra
3 – Pavimento com lajedo de pedra

Figura 6 – Casa do moleiro junto ao Rio Guadiana.

2.7 CASA DO ALGARVE

O Algarve situa-se na região sul do país, sendo o seu clima de fortemente influenciado pelo oceano Atlântico. Trata-se de uma região de clima quente e seco, com temperaturas médias elevadas. No verão a temperatura é elevada, existe forte luminosidade, grande insolação e ausência de chuva. Nesta região é, portanto, essencial reduzir os ganhos solares durante o verão.

As construções têm paredes de grande espessura, executadas com materiais que lhes conferem uma elevada inércia térmica, tais como a terra (taipa ou adobe), a alvenaria de pedra, ou a conjugação dos dois materiais (Figura 7). As paredes são tipicamente pintadas de branco ou de outras cores claras, ficando dotadas de uma elevada capacidade de reflexão da radiação solar. O pé-direito é elevado, especialmente nas zonas de maior uso durante o dia, para atenuar o calor e estratificar o ar interior. As janelas são pequenas, em número reduzido e estão colocadas em pontos altos das paredes. Este aspeto permite minimizar a entrada de energia solar incidente nas habitações e facilitar a saída de ar quente do seu interior (Fernandes e Janeiro, 2008).



1 – Revestimento de placas cerâmicas
2 – Camada de argamassa impermeabilizada com gordura
3 – Estrutura de suporte em tabuado

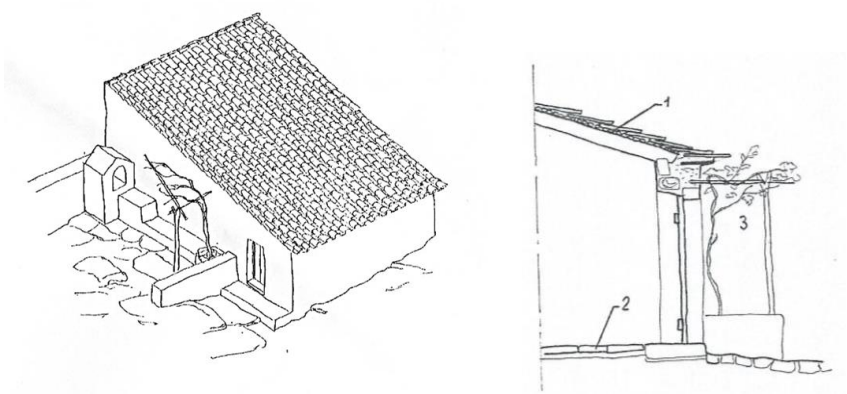
Figura 7 – Casa do Algarve.

Relativamente à cobertura dos edifícios, no lado mais exposto à radiação, existe um terraço geralmente construído sobre uma estrutura de madeira, para conferir melhor isolamento térmico. Os terraços (açoteias) e as suas platibandas, com arquitetura de influência árabe, eram assentes em estruturas abobadadas, tinham como função a seca do peixe, dos figos e de outros produtos alimentares, e promovem algum arrefecimento através da mudança de fase da água das chuvas, que inicialmente continham. No lado menos exposto, a cobertura é inclinada, de uma só água, com pé direito elevado. O isolamento da cobertura é feito com canas colocadas sob as telhas cerâmicas. Uma das caraterísticas da casa algarvia é a existência de chaminés, com formas cilíndricas ou prismáticas, que exibem grande exuberância decorativa, sendo coroadas com elementos cerâmicos de desenhos vazados, cujas aberturas em todas as direções ampliam a ventilação natural. O forno era construído afastado da construção.

2.8 CASA DAS SERRAS ALGARVIAS

A zona das serras algarvias é uma zona de transição entre o Alentejo e o Algarve. É caracterizada pela existência de um clima com verões quentes e secos e invernos com fortes ventos húmidos vindos do mar. Nesta região as casas são construídas com paredes de taipa (Figura 8). As coberturas apresentam apenas uma água, com a vertente voltada a norte para melhor desempenho em relação aos ventos e chuvas dominantes.

Os vãos são pouco numerosos e encontram-se normalmente protegidos por dispositivos de sombreamento, tais como portadas, que permitem reduzir a entrada da radiação solar durante as horas mais quentes do dia e ventilar as habitações durante o período da noite.



1 – Guarda pó feito de caniço
2 – Pavimento em lajedo de pedra
3 – Latada para sombreamento

Figura 8 – Casa das serras algarvias.

É ainda frequente a utilização de vegetação, habitualmente em latadas situadas à entrada, para fins de sombreamento. A cozinha localiza-se no exterior da habitação para evitar o excessivo calor no verão.

3 CONCLUSÕES

O território continental de Portugal possui grande diversidade de regiões com características orográficas, climáticas, sociais e culturais muito distintas. Em cada região as construções foram concebidas de modo a se adaptarem às condições locais. Daí resulta a grande diversidade de tipos de construções, no que se refere nomeadamente à arquitetura bioclimática, tipologia, funcionalidade, implantação e materiais usados que podem ser observados.

Nas regiões do norte de Portugal, com invernos rigorosos surgem habitações em que é necessário aproveitar ao máximo os ganhos de calor quer através do isolamento das casas, quer o calor gerado na confeção de alimentos ou o calor resultante da colocação de animais no piso inferior. Os aglomerados de casas surgem frequentemente nas encostas dos vales orientadas a sul, a fim de aumentar os ganhos solares e obter proteção contra os ventos frios. As casas são de dois pisos independentes, com funções distintas.

Já no Sul do país, onde os verões são quentes, as casas são dispostas em aglomerados compactos, com reduzido número de superfícies expostas à radiação solar devido ao efeito de sombreamento proporcionado pelos edifícios, o que permite reduzir os ganhos solares pela envolvente dos edifícios. As ruas são sinuosas e estreitas, o que permite reduzir o efeito dos ventos fortes e contribuem positivamente para a inércia térmica do conjunto, mantendo as ruas frescas durante grande parte do período da manhã. As casas são rebocadas e caiadas a branco e as aberturas são escassas, servindo como mecanismos de defesa contra a luz e altas temperaturas. Ao contrário das casas do Norte, estas casas eram habitualmente de um só piso, porque a resistência dos materiais empregues não permitia construções elevadas, e também porque no sul a função da casa era apenas de habitação.

A localização do forno altera-se, à medida que se vai de norte para sul do país. O forno passa do interior para o exterior das construções e termina, mais a sul, afastado da casa. Quanto ao lugar da lareira para a confeção de alimentos, na região sul os apanha fumos são maiores.

Verifica-se que as construções tradicionais, para além de utilizarem materiais naturais e locais, o seu dimensionamento e conceção arquitetónica, demonstram a preocupação de criar aquecimento e arrefecimento passivos, sem recurso a meios mecânicos convencionais.

Foram apresentados alguns exemplares da arquitetura popular de várias regiões de Portugal, apontando-se as principais características bioclimáticas destas construções, algumas das quais poderão ser transpostas para novas construções e intervenções de reabilitação, em várias zonas do país. As técnicas bioclimáticas podem ser consideradas a versão moderna das técnicas tradicionais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, sob a referência LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

AAVV. 1980. Arquitectura Popular em Portugal. 2.ª ed. Lisboa: Associação dos Arquitectos Portugueses. Lisboa.

Almeida, M. (2021). Arquitetura Popular de Entre-Douro-e-Vouga. Tese de Mestrado em Arquitetura. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Ávalos, J, Villarreal, R., Cárdena, V., Romero, L. (2021). Bioclimatic Architecture. The 3rd ETLTC International Conference on Information and Communications Technology. SHS Web of Conferences 102, 03002. https://doi.org/10.1051/shsconf/202110203002

Bajcinovci, B., Jerliu, F. (2016). Achieving Energy Efficiency in Accordance with Bioclimatic Architecture Principles. Environmental and Climate Technologies. 18, 54–63. doi: 10.1515/rtuect-2016-0013

Bestara, A.K. (2021). Bioclimatic Architecture as a Design Approach for High School in Gedebage, Bandung City. Advances in Social Science, Education and Humanities Research, volume 671, 270-273.

Bugenings, L. A., Kamari, A. (2022). Bioclimatic Architecture Strategies in Denmark: A Review of Current and Future Directions *Buildings* 2022,*12*(2), 224. https://doi.org/10.3390/buildings12020224.

Casasnovas, X., Graus, R. (2007), Bioclimatic values in the rehabilitation of Traditional Mediterranean Architecture. Semantic Scholar, CoupusID:179062602. p78-86 https://api.semanticscholar.org/CorpusID:179062602.

Coch H. (1998). Bioclimatism in vernacular architecture in Architecture, Comfort and Energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2: 67-87. ISBN 0-080-43004-X.

Couvelas, A. (2020). Bioclimatic building design theory and application. 1st International Conference on Optimization-Driven Architectural Design (OPTARCH 2019), Procedia Manufacturing 44:326–333. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095.

Cruz, N, Torres, I.M., Silva, J.M. (2011). Bioclimatic Architecture Potential in Buildings Durability and in their Thermal and Environmental Performance.in conference proceedings of the XII DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, 8p. Porto. ISBN: 9727521320.

Diana, W., Setijanti, P, Cahyadini, S. (2020). Application of Bioclimatic Architecture Concept in Novotel Suite Surabaya. 6th International Seminar on Science and Technology, IPTEK Journal of Preccedings Series nº 6, Indonesia. ISSN: 2354-6026.

Elaouzy, Y., El Fadar, A. (2022). Impact of key bioclimatic design strategies on buildings' performance in dominant climates worldwide. Energy for Sustainable Development. 68:532-549, https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.05.006.

Elbakheit, R. A. (2012). Why Tall Buildings? The Potencial of Sustainable Technologies in Tall Buildings. International Journal of High-Rise Buildings. 1(2): 117-123.

El-Sayed, R. M. (2023). Review and Analysis of Bioclimatic Design Approach. Engineering Research Journal, 52(4): 111-121. ISNN: 3009-6049.

Faia, D.W. (2017). Bioclimatic design. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition. Springer. Robert A. Meyers (ed.) Second Edition. ISSN: 2629-2378.

Faria, P. (2010). A arquitectura bioclimática mediterrânica: um equilíbrio entre duas estações. AE... Revista Lusófona de Arquitectura e Educação, 3 (179- 192).

Fernandes, J. M., Janeiro, A. (2008). A Casa Popular do Algarve- Espaço rural e urbano, evolução e atualidade. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. ISBN: 978-989-8208-00-2.

Fernandes, J. P., Mateus R., Bragança L. (2013). Arquitetura Vernácula Portuguesa: Lições de sustentabilidade para a arquitetura contemporânea. 1st. International Colloquium of Popular Architecture, pp. 773-789, ISBN:978-972-9136-78-8.

Fernandes, J., Mateus, R., Gervásio H., Silva, S., Bragança, L. (2019) Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance. DOI: Reference: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.098.

Ferreira, D., Fernandes, S., Luso, E. (2015). Soluções Bioclimáticas da Arquitetura Vernacular na Região Transfronteiriça entre Bragança e Castela-Leão. Atas do Seminário rever: Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído, 63-72. ISBN: 978-989-20-5615-9.

Ferreira, D., Luso, E., Vaz, J. F., Fernandes, S., Ferreira. A.J., Moreno, C., Correia, R. (2013). Bioclimatic solutions existing in vernacular architecture. Rehabilitation techniques. PORTUGAL SB13 - Contribution of Sustainable Building to meet EU 20-20-20 targets. Guimarães - Portugal. ISBN 978-989-96543-7-2. p. 639-645.

Guerreiro, M., Guarda, I. (2012). Bioclimatic Urbanism and Regional Design in Portugal: The Atlantic and the Mediterranean Contexts. Journal of Civil Engineering and Architecture. 6 (8), (Serial No. 57), pp. 963–973. ISSN 1934-7359.

Kapur, S. H. (2017) Bioclimatic Design In Traditional Architecture For Hot Dry Climate (Ethos Of Past, Viability In Present). International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(5): 1401–1410.

Košir, M. (2019). Climate Adaptability of Buildings Bioclimatic Design in the Light of Climate Change. Springer Nature Switzerland AG, Switzerland. ISBN 978-3-030-18455. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18456-8.

Krivenko, O., Pylypchuk, O., Venedyktova, G., Shevchenko, L. (2023) Optimization of the Process of Designing High-rise Bioclimatic Buildings Using Renewable Energy. AIP Conference Proccedings,2490, 030005. https://doi.org/10.1063/5.0122966.

Maciel, A. A. (2007). Bioclimatic Integration into the Architectural Design. Published Phd. Thesis. University of Nottingham, United Kingdom.

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Sabio-Ortega, A., Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49:736–755.

Mateus, R. et al., 2015. Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído. Seminário ReVer. Universidade do Minho.

Matos, I. G. (2023). Por uma Reabilitação Bioclimática: O caso da fábrica do Kamionek, Varsóvia. Dissertação de Mestrado em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto. Porto.

Moutinho, M. (1995). Arquitetura Popular Portuguesa. Teoria da Arte 14, 3ª Edição, Editorial Stampa. ISBN 972-33-1054-6.

Olgayay, V. (2016). Design with Climate – Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. – New and expanded Edition. Price Town University, New Jersey. ISBN: 9780691169736.

Oliveira, R., Bragança, L., Abreu, M. I. (2013) The integration of sustainable solutions in Portuguese old building architecture. Proceedings of the PORTUGAL SB13 CONTRIBUTION OF SUSTAINABLE BUILDING TO MEET EU 20-20-20 TARGETS. p.547-574. ISBN 978-989-96543-7-2.

Ozarisov, B., Altan, H. (2021). Systematic Literature Review of Bioclimatic Design Elements: Theories, Methodologies and Cases in the South-eastern Mediterranean Climate. Energy and Buildings. 250(3):11128. DOI:10.1016/j.enbuild.2021.111281.

Pulido, L. G. (2012). Bioclimatic Devices of Nasrid Domestic Buildings studies in ARCHITECTURE, HISTORY & CULTURE, papers by the 2011-2012 AKPIA@MIT. Cap. 6, 34-59.

Salvado, JP. (2021). Arquitectura Popular em Portugal Tecnologias Construtivas Tradicionais na Contemporaneidade. Tese de Mestrado em Arquitetura. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Sheliahovich, N. (2011), Bioclimatic Architecture: Brief history and future of the phenomenon. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110400300.

Suliman, A. (2014). Bioclimatic Architecture: Housing and Sustainability. Journal of Environment and Earth Science, .4 (22) 184-195. ISSN 2224-3216.

Tundrea, H., Budescu, M. (2013). Bioclimatic Climatic Architecture, a Sensible and Logical Approach Towards the Futures of Buildings Development. Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi, Romenia, p. 110-117.

Varmora, Z., Jain, C. (2022). Bioclimatic Architecture In High Rise Buildings. International Journal of Scientific and Research Publications. 12 (4): 216-224. DOI: 10.29322/IJSRP.12.04.2022. p12432. ISSN 2250-3153.

Widera, B. (2015). Bioclimatic Architecture. Journal of Civil Engineering. Architecture Research. 2(4) 567-578.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS DE BETÃO PARA A CONSTRUÇÃO MODULAR DE EDIFÍCIOS

Raquel Sarmento[a]; Henriqueta Teixeira[a]; Maria da Glória Gomes[a]

[a]CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal,

RESUMO

Os painéis pré-fabricados sanduíche têm vido a ser utilizados como solução de envolvente na construção modular de edifícios. Estas soluções devem aliar as características de leveza, facilidade e rapidez de instalação às propriedades mecânicas e de isolamento térmico e acústico.

O presente trabalho incide sobre o comportamento térmico de painéis sanduíche em betão com núcleo de material isolante. Neste estudo foram analisadas diferentes espessuras e tipos de materiais, tendo sido selecionados sete tipos diferentes de materiais de núcleo: 1) poliestireno extrudido; 2) poliestireno expandido; 3) lã de vidro; 4) lã de rocha; 5) aglomerado de cortiça expandida (ICB); 6) espuma de politereftalato de etileno; e 7) espuma rígida de poliuretano. Com base nas propriedades térmicas dos diferentes materiais constituintes das lâminas de betão e núcleo (material isolante) e temperaturas na estação de inverno e de verão, foi calculada a perda total de calor, o coeficiente de transmissão térmica global e a transmitância linear das zonas de ligação entre painéis, avaliando-se assim o efeito de ponte térmica, recorrendo-se ao software THERM. Os resultados mostraram, do ponto de vista térmico, que, dependendo das exigências, podem ser utilizadas diferentes combinações de materiais e espessuras como soluções de envolvente em edifícios de construção modular.

Palavras-chave: Construção modular, Painéis sanduíche de betão, Comportamento térmico, Pontes térmicas

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção tem vindo a industrializar-se com a intenção de tornar todas as etapas envolvidas no processo da construção de edifícios mais eficiente, diminuindo os custo e tempos de execução, incrementando a sustentabilidade, a segurança dos trabalhadores e facilitando a comunicação de todas as partes envolvidas. Deste modo, surgiu a construção modular que através do fabrico do edifício em módulos, num ambiente controlado (fabril), permite prevenir erros de construção, evitar situações onde a segurança fica comprometida e controlar as quantidades de materiais necessárias para os diversos elementos, resultando na diminuição de desperdícios que comprometem o ambiente. Assim, o desenvolvimento desta nova abordagem à construção demonstra ser uma alternativa aliciante, mas com diversos aspetos ainda por melhorar.

Adicionalmente, diversas iniciativas governamentais têm vindo a ser desenvolvidas com o intuito de responder às circunstâncias ambientais que se têm observado nos últimos anos (United Nations, 2016; European Council, 2021; European Comissions, 2021). Neste contexto, têm sido impostas diretivas que promovem regras mais restritas sobre o conforto térmico e eficiência energética de edifícios. Sendo a envolvente uma das grandes condicionantes para o comportamento térmico de edifícios, é necessário promover soluções construtivas com um bom desempenho. Deste modo, torna-se imperativa a compreensão sobre o comportamento térmico dos edifícios para responder às necessidades impostas.

O presente estudo incide sobre o comportamento térmico de painéis pré-fabricados sanduíche de betão, em desenvolvimento no projeto "*R2UTechnologies – Modular Systems*". Este tipo de painéis sanduíche de betão é comumente utilizado em construção modular (Sah, *et al.,* 2024). Através do programa THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024) será realizada uma análise do comportamento térmico dos painéis, utilizando o método de elementos finitos, que irá permitir observar o efeito das pontes térmicas nas zonas de ligação dos painéis em estudo e de zonas de heterogeneidades de materiais. Serão ainda testados diferentes materiais de isolamento térmico do núcleo, cujas propriedades termofísicas serão obtidas através de uma campanha experimental, com o intuito de avaliar quais as combinações que apresentam melhores comportamentos térmicos e espessuras de isolamento térmico adicional necessárias para cumprir os requisitos térmicos em vigor em diferentes países Europeus.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Painéis prefabricados têm vindo a ser desenvolvidos no decorrer dos anos com o propósito de atender às diversas necessidades do setor da construção. Assim sendo, diversos tipos de painéis já foram desenvolvidos, sendo os painéis prefabricados sanduíche de betão os mais utilizados e investigados pois apresentam elevada resistência mecânica, térmica e ao fogo, assim como baixo custo de manutenção, baixa emissão de carbono operacional e elevada durabilidade (Sah, *et al.,* 2024). Deste modo, devido às vantagens apresentadas, dando foco sobre o comportamento térmico e estrutural, estes painéis têm vindo a ser bastante utilizados em paredes exteriores de várias infraestruturas e de edifícios com vários pisos (Amran, et al., 2020). Os painéis prefabricados sanduíche de betão são constituídos por duas lâminas de betão, que conferem resistência às ações mecânicas, e um núcleo com material isolante, cuja principal função é conferir resistência térmica ao painel (Sah, *et al.,* 2024; Fernandes 2014). As lâminas poderão ser ligadas ao núcleo através de conectores com a intenção de garantir a conexão entre as camadas assim como de possibilitar a transferência de tensões (Oliveira, et al., 2022).

Contudo, sendo os painéis prefabricados sanduíche de betão uma escolha preferencial para garantir melhores condições térmicas dos edifícios, há ainda diversas melhorias por implementar. Entre as diversas zonas onde podem ocorrer pontes térmicas, as conexões entre painéis são um dos locais cruciais onde ocorrem uma maior concentração de perdas de calor, considerando que ocorrem sistematicamente ao longo de toda a envolvente do edifício (Sorensen, 2017). Adicionalmente, é espectável verificar perdas de calor em zonas de heterogeneidades, que contêm diferentes materiais, devido à variabilidade de propriedades térmicas que promovem a criação de pontes térmicas (Fernandes, 2014).

Deste modo, torna-se imperativo desenvolver estudos sobre o desempenho térmico de painéis pré-fabricados, com análise mais detalhada nestas zonas onde ocorrem pontes térmicas estudando diferentes soluções e desenvolvendo meios que promovam a mitigação da ocorrência de perdas de calor.

Adicionalmente, para a determinação das espessuras mínimas necessárias para a solução em estudo, foram consultadas a legislação em vigor em diferentes países europeus, nomeadamente Portugal (Diário da República, 2021), Espanha (Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, 2022), França (JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2010), Dinamarca (The Danish Transport and Construction Agency, 2015), Alemanha (Federal Law Gazette, 2013) e Inglaterra (HM Government, 2021), de modo a obter os valores de referência dos coeficientes de transmissão térmica (U [W/$m^2.°C$]) de cada país que são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de transmissão térmica de referência de diferentes países (Diário da Républica, 2021; Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, 2022; JOURNAL OFFICIAL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2010; The Danish Transport and Construction Agency, 2015; Federal Law Gazette, 2013; HM Government, 2021).

U_{ref} [W / (m2.°C)]		
País	Cobertura	Paredes
Portugal	0,30	0,35
Espanha	0,33	0,37
França	0,36	0,36
Dinamarca	0,12	0,15
Alemanha	0,20	0,28
Inglaterra	0,16	0,26

3 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

No âmbito do projeto "*R2UTechnologies – Modular Systems*" está a ser desenvolvido um painel pré-fabricados sanduíche de betão. O presente estudo irá incidir sobre o painel representado na Figura 1 que é constituído por ligações laterais de duas chapas metálicas, cada uma com 12mm de espessura, sendo estas envolvidas por material de isolamento térmico. Junto às zonas de ligação encontram-se zonas maciças de betão de 0,30x0,16m, e entre elas uma zona vazada constituída por duas lâminas de betão com 0,06m de espessura e um núcleo constituído por material de isolamento térmico que é interrompido a meio do painel por um maciço de betão de 0,10x0,04m.

Os materiais considerados para o núcleo dos painéis são: 1) poliestireno extrudido (XPS); 2) poliestireno expandido (EPS); 3) lã de vidro; 4) lã de rocha; 5) ICB; 6) espuma de politereftalato de etileno (PET); e 7) espuma rígida de poliuretano (PUR). O painel tem uma espessura total de 0,16m e um comprimento total de 2,90m. Será ainda estudado a espessura mínima de isolamento a colocar pelo exterior para que sejam cumpridos os requisitos mínimos de qualidade térmica em diferentes países europeus.

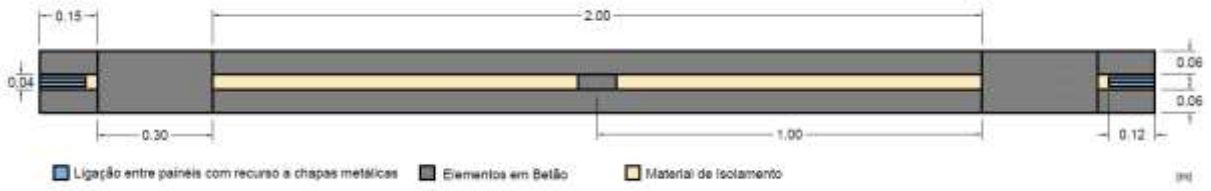


Figura 1 - Esquema representativo da solução de painel prefabricado de betão em estudo (vista em planta).

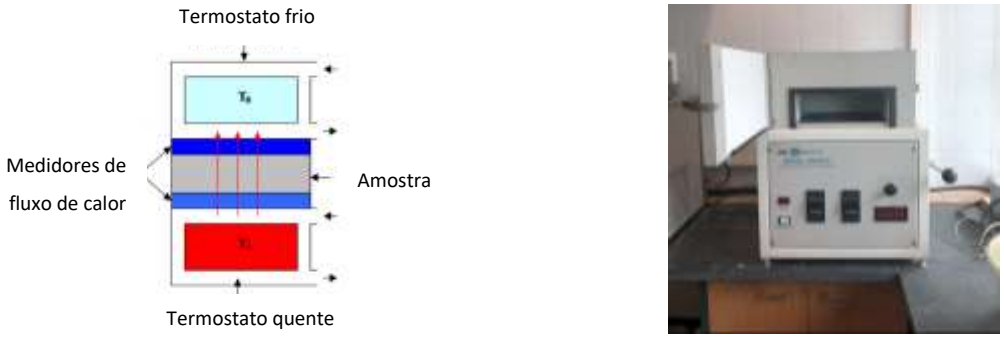
4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para realizar as simulações térmicas das soluções em estudo, é necessário determinar as propriedades termofísicas dos materiais estudados, nomeadamente a condutibilidade térmica. Para tal foram utilizados métodos estacionários e métodos transientes para a obtenção das condutibilidades térmicas dos materiais EPS, XPS, lã de rocha, lã de vidro, ICB, PET e PUR com espessuras de aproximadamente 0,02m, 0,03m, 0,06m, 0,04m, 0,03m, 0,02 e 0,09m respetivamente.

Este capítulo descreve numa primeira parte os métodos estacionários e transientes e por último são apresentados e discutidos os principais resultados de condutibilidade térmica obtidos para os diferentes materiais.

4.1 MÉTODO ESTACIONÁRIO

Para a obtenção da condutibilidade térmica de materiais, podem ser utilizados métodos estacionários tais como o método do medidor de fluxo de calor (*heat flow meter* – HFM) e o de placa quente (*guarded hot plate* – GHP), cujas medições devem ser feitas em materiais no estado seco. Segundo Clarke e Yaneske, (2009), o uso do método de placa quente pode levar a erros que rondam os 3%, dependendo do tipo de equipamento e do utilizador. Para o presente trabalho, foi utilizado o método do medidor de fluxo de calor, cujo esquema se encontra representado na Figura 2 a), através do equipamento Rapid-k da Holometrix, apresentado na Figura 2 b).



a) b)

Figura 2 - a) Representação do esquema de funcionamento do método de fluxo de calor (Franco, 2007) ; b) equipamento Rapid-k da Holometrix.

Para determinar as condutibilidades térmicas dos materiais isolantes, é necessário, primeiramente, colocar uma amostra de calibração de lã mineral cujo comportamento térmico é conhecido. A calibração é necessária pois permite obter um parâmetro de calibração (N) em função da sua temperatura quando se atinge um gradiente térmico em equilíbrio. Para o presente trabalho, os gradientes térmicos considerados foram de 10°C, 20°C e 30°C, obtidos para temperaturas da placa superior (u) e inferior (i) respetivamente de: 40°C (u) - 30°C (i); 50°C (u) - 30°C (i); 60°C (u) – 30°C (i). O processo de calibração é realizado sempre que se altera o gradiente de temperaturas. Após a calibração, cada amostra de estudo é colocada no equipamento, sendo necessário as amostras terem dimensão de 0,30x0,30m e espessuras compreendidas entre 0,005 e 0,10m. Segundo o manual de operação e manutenção do equipamento (Holometrix), a área analisada encontra-se na zona central da amostra com dimensões de cerca de 0,10x0,10m. Os erros de medição encontram-se compreendidos entre os 2 e os 5%, permitindo medir gamas de condutibilidade térmica entre os 0,015 e os 0,43W/m.K.

Conhecido o parâmetro de calibração (N), a amostra do material a testar é colocada no aparelho e inicia-se o processo de obtenção dos valores das condutibilidades térmicas. Foram realizadas leituras em mV do fluxo de calor (Q) e das temperaturas das placas superior (Tu) e inferior (Ti) do aparelho. Para os ensaios realizados neste trabalho, após a colocação da amostra, aguardou-se pelo menos 30 minutos para se realizar uma primeira medição, de modo que o fluxo de calor através do material seja estabelecido sendo as restantes medições realizadas de 15 em 15 minutos até se verificar uma variação

inferior a 1% de Q/(Tu-Ti) entre duas leituras seguidas, significando que a amostra chegou a um estado de equilíbrio térmico.

4.2 MÉTODO TRANSIENTE

Os métodos transientes são outro tipo de métodos que permitem obter a condutibilidade térmica dos materiais, sendo este tipo menos moroso face aos métodos estacionários. Para este método, a amostra encontra-se em equilíbrio térmico com o ambiente, sendo sujeita a um impulso de calor através de uma sonda. Enquanto o ensaio decorre, as mudanças de temperatura e a condutibilidade térmica são registadas ao longo do tempo do ensaio (Anis-ur-Rehman & Maqsood, 2002). Existem diversos métodos, sendo os mais utilizados o método de fonte plana *(transient plane source* - TPS), o método de fonte linear (*transient line source* – TLS) e o método de fonte plana modificado (*modified transient plane source* – MTPS) (Fernandes, 2014). Para o presente estudo foi utilizado o método de fonte plana modificado (MTPS), cujo esquema pode ser observado na Figura 3 a), assim como o equipamento utilizado, Isomet 2114 da Applied Precision, Ltd (Figura 3 b)).

a) b)

Figura 3 - a) Esquema do método de fonte plana modificado (Fernandes, 2014); b) fotografia de um ensaio de MTPS em curso.

No método transiente, utilizando o equipamento Isomet 2114, não é necessário especificar a temperatura a que o ensaio tem de ocorrer, pois o material a ensaiar tem de se encontrar em estado de equilíbrio com o ambiente em que se encontra. Para prevenir trocas de calor entre a amostra e a superfície onde esta se encontra colocada, colocou-se uma segunda camada de material de isolamento térmico na parte inferior da amostra a ensaiar. É acoplada uma sonda plana ao equipamento, sendo esta posteriormente colocada no centro da amostra a ensaiar. A partir do próprio equipamento é possível definir a gama de medição, tendo esta sido escolhida para uma gama compreendida entre os 0,04 e os 0,3W/m.°K.

Apesar de no presente trabalho apenas se apresentarem os valores da condutibilidade térmica (λ [W/m.K]) e temperatura média de ensaio (Tmean [°C]), foram também registados os valores de capacidade térmica volumétrica (cρ [J/m³.K]) e difusidade térmica (a [m²/s]).

4.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

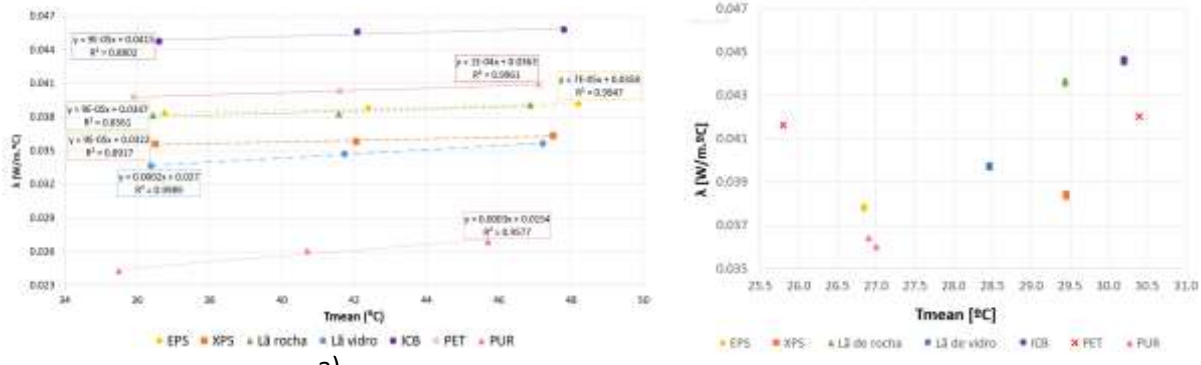
Os métodos descritos no subcapítulo anterior foram realizados para 3 amostras de cada tipo de material de isolamento. Para o método estacionário foram sujeitas a três gradientes de temperatura: 10°C; 20°C e 30°C. Foi feita uma média aritmética das três amostras para a condutibilidade térmica, para a temperatura média medida e para o gradiente de temperatura de cada material, sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 2. Relativamente aos ensaios com o método transiente, foram realizadas três medições para cada amostra de cada material,tendo sido obtidos os valores da condutibilidade térmica e da temperatura média de cada medição que são apresentados naTabela 2.

Tabela 2 - Valores médios de condutibilidade térmica, temperatura de ensaio e gradiente térmico entre placas obtidos através do método estacionário (Rapid-k) e valores obtidos para a

condutibilidade térmica e temperatura média para cada amostra de cada material pelo método transiente (Isomet 2114).

Material	Método estacionário (Rapid-k)			Método transiente (Isomet 2114)		
	Gradiente Rapid-k (ºC)	λ Rapid-k (W/m.ºC)	Tmean Rapid-k (ºC)	Medição Isomet	λ Isomet [W/m. ºC]	Tmean Isomet [ºC]
EPS	10	0,0385	36,8	1	0,0377	26.8
	20	0,0388	42,4	2	0,0379	26.8
	30	0,0392	48,2	3	0,0379	26.8
XPS	10	0,0356	36,5	1	0,0383	29.5
	20	0,0358	42,1	2	0,0384	29.5
	30	0,0366	47,5	3	0,0384	29.5
Lã de rocha	10	0,0375	36,5	1	0,0436	29.4
	20	0,0384	41,6	2	0,0437	29.4
	30	0,0392	46,9	3	0,0437	29.4
Lã de vidro	10	0,0337	36,4	1	0,0396	28.5
	20	0,0347	41,7	2	0,0397	28.5
	30	0,0357	47,2	3	0,0397	28.5
ICB	10	0,0448	36,6	1	0,0445	30.2
	20	0,0456	42,1	2	0,0446	30.2
	30	0,0458	47,8	3	0,0446	30.2
PET	10	0,0398	35,9	1	0,0416	25,8
	20	0,0403	41,6	2	0,0420	30,4
	30	0,0409	47,1	-	-	-
PUR	10	0,0243	35,5	1	0,0360	27,0
	20	0,0261	40,7	2	0,0364	26,9
	30	0,0269	45,7	-	-	-

A partir da Figura 4 a), pode-se averiguar que para o aumento do gradiente de temperatura, a condutibilidade térmica também aumenta, tratando-se de um comportamento expectável para materiais de isolamentos térmico. Também é possível verificar que os resultados experimentais obtidos através do Rapid-k têm coeficientes de determinação elevados (R^2), correspondendo à lã de rocha o valor mais baixo. Quanto aos resultados obtidos através do Isomet 2114 (Figura 4 b), pode-se averiguar que para as temperaturas médias registadas, os valores obtidos para a condutibilidade térmica de cada material encontram-se próximos, não existindo disparidade entre medições.



a) b)

Figura 4 – a) Resultados obtidos da condutibilidade térmica de cada tipo de material a partir do Rapid-k; b) Resultados obtidos da condutibilidade térmica de cada tipo de material a partir do Isomet 2114.

Adicionalmente, os valores obtidos pelo método estacionário e o método transiente para o T_{mean} dos materiais, determinado através do Isomet 2114 (**Error! Reference source not found.**), foram comparados. A Figura 5 apresenta a relação entre os valores de condutibilidade térmica obtidos através de ambos os métodos. Os valores de condutibilidade térmica obtidos por ambos os métodos

para os materiais EPS e ICB encontram-se bastante próximos, sendo observada uma certa dispersão para os restantes materiais, como a lã de vidro, a lã de rocha e o PUR, que apresentam uma maior diferença entre métodos. Isto pode ser explicado porque é aconselhado usar materiais sólidos e homogéneos para o equipamento Isomet 2114.

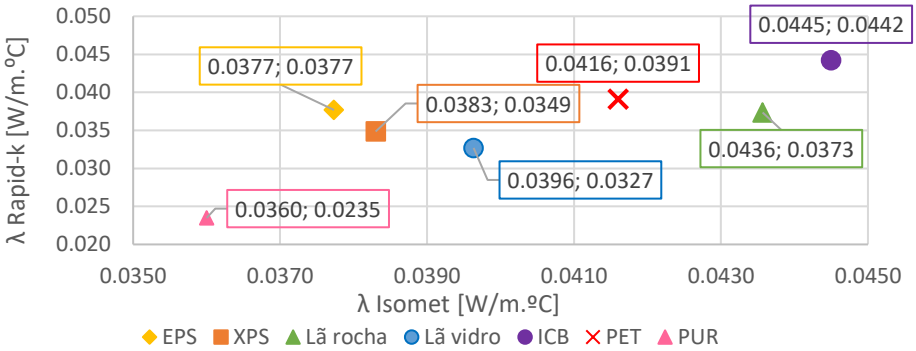


Figura 5 - Relação entre os valores de condutibilidade térmica obtidos pelo método estacionário (Rapid-k) e transiente (Isomet 2114).

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Concluída a campanha experimental, através da qual foram obtidas as condutibilidades térmicas de cada material, é possível proceder às simulações do comportamento térmico da solução em estudo apresentada anteriormente na Figura 1, com o intuito de determinar as espessuras mínimas necessárias para cumprir os requisitos definidos anteriormente na Tabela 1. Este capítulo irá descrever as condições definidas para os painéis sanduíche no programa THERM 7.8 (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024) assim como a metodologia adotada para definir as soluções finais.

5.1 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para a construção da geometria da solução em estudo no programa THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024), foram consideradas as dimensões descritas no Capítulo 3, seguindo o esquema representado anteriormente na Figura 1. A solução construída no programa THERM é apresentada na Figura 6. Após a definição da solução, foi necessário definir quais os materiais correspondentes às geometrias desenhadas. Para tal, criou-se no próprio programa os materiais de aço, betão, caixa de ar, PET, PUR, EPS, XPS, lã de rocha, lã de vidro e ICB e adicionou-se a condutibilidade térmica correspondente de cada material. Como o modelo proposto ainda se encontra em estudo, a constituição do betão e da ligação em aço ainda não é conhecida, tendo-se consultado tabelas elaboradas pelo LNEC (Santos & Matias, 2008). Foram considerados valores de condutibilidades de 2,0 W/m.°C e de 50 W/m.°C para o betão e para o aço, respetivamente. Para os materiais isolantes, EPS, XPS, lã de rocha, lã de vidro e ICB, PET e PUR para uma temperatura média de 10°C, foram considerados valores de condutibilidade térmica de 0,0370 W/m.°C, 0,0331 W/m.°C, 0,0336 W/m.°C, 0,0290 W/m.°C, 0,0424 W/m.°C, 0,0373 W/m.°C e de 0,0184 W/m.°C, respetivamente para 10°C obtidos através das regressões lineares da Figura 4 a), pois apresentam elevados graus de confiança para a determinação das condutibilidades térmicas para diferentes temperaturas face ao método transiente, cujos resultados que dependem das características dos materiais e apresentam resultados mais dispares.

Figura 6 - Representação em planta da secção da solução em estudo no programa THERM.

De seguida, foi necessário definir as condições de fronteira, tendo-se considerado o cenário de Inverno, correspondente ao pior cenário, com valores de temperatura interior de 20°C e de temperatura exterior de 0°C (International Organization for Standardisation, 2003), e valores de resistência superficial interior e exterior de 0,13 m².°C/W e 0,04 m².°C/W, respetivamente (Diário da República, 2021). Na Figura 6, a linha superior (a azul) é considerada como fronteira para o exterior, enquanto a linha inferior (a vermelho) é considerada como fronteira para o interior. Nas extremidades das ligações, as condições de fronteira foram consideradas adiabáticas, ou seja, zonas onde não ocorrem trocas de calor.

5.2 COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U) E LINEAR (PSI)

Para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (U [W/m².°C]), a solução foi analisada por diferentes zonas: 1) zona das chapas metálicas; 2) zona entre as chapas metálicas e o maciço de betão de 0,30x0,16m; 3) zona do maciço de betão; 4) zona do painel sanduíche entre os maciços de betão; 5) zona de maciço de betão de 0,10x0,16m. Estas zonas foram definidas para se proceder ao cálculo do U de cada zona segundo a Equação 1.

$$\mathrm{U_{zona}} = \frac{1}{\mathrm{R_{si}} + \mathrm{R_{se}} + \sum \frac{e}{\lambda}} \tag{1}$$

Onde, $\mathrm{U_{zona}}$ é o coeficiente de transmissão térmica superficial da zona [W/m².°C], $\mathrm{R_{si}}$ e $\mathrm{R_{se}}$ as resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente, que tomam o valor de 0,13 e 0,04 [m².°C/W], respetivamente (Diário da República, 2021), e a espessura do material [m] e λ a condutibilidade térmica do material [W/m.°C]. De seguida, procedeu-se ao cálculo de U da solução em estudo através da Equação 2.

$$\mathrm{U_{med}} = \frac{\sum \mathrm{U_{zona}} \times \mathrm{A_{zona}}}{\sum \mathrm{A_{zona}}} \tag{2}$$

Onde, $\mathrm{U_{med}}$ é o coeficiente de transmissão térmica superficial do modelo [W/m².°C], $\mathrm{U_{zona}}$ é o coeficiente de transmissão térmica superficial da zona [W/m².°C] e $\mathrm{A_{zona}}$ [m²] a área da zona correspondente ao $\mathrm{U_{zona}}$. Após a determinação do $\mathrm{U_{med}}$, foi possível calcular o fluxo de calor unidirecional que atravessa o modelo através da Equação 3.

$$Q_{\mathrm{calc}} = \mathrm{U_{med}} \times L_m \times \Delta T \tag{3}$$

Onde, Q_{calc} é o fluxo de calor unidirecional que atravessa o modelo por metro de profundidade [W/m], L_m a largura do modelo [m] e ΔT o gradiente térmico estabelecido para o modelo [°C].

A partir do programa THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024), simulou-se o comportamento térmico do modelo e obteve-se o valor de U, permitindo, assim, determinar o fluxo de calor unidirecional que atravessa o modelo do THERM recorrendo-se à Equação 4.

$$Q_{\mathrm{THERM}} = \mathrm{U_{tot}} \times L_m \times \Delta T \tag{4}$$

Onde, Q_{THERM} é o fluxo de calor unidirecional que atravessa o modelo calculado através dos resultados obtidos a partir do THERM [W/m], $\mathrm{U_{tot}}$ o coeficiente de transmissão térmica superficial total do modelo obtido a partir do THERM [W/m².°C], L_m a largura do modelo [m] e ΔT o gradiente térmico estabelecido para o modelo [°C].

Finalmente, determinou-se o coeficiente de transmissão linear (ψ [W/m.°C]) através da Equação 5. O Q_{THERM} tem em conta os fluxos de calor originados pelas pontes térmicas, sendo que Q_{calc} não, pois

é uma fórmula de cálculo simplificada, desta forma, a partir da Equação (5, subtraindo os dois termos e dividindo pelo gradiente de temperaturas, é possível obter ψ [W/m.°C].

$$\psi = \frac{Q_{\mathrm{THERM}} - Q_{\mathrm{calc}}}{\Delta T} \quad (5)$$

Este processo de cálculo (Equações 1 a 5) foi realizado para o modelo em estudo considerando todos os materiais de isolamento térmico previamente mencionados. Posteriormente, adicionou-se uma placa de isolamento pelo exterior tendo-se considerado valores de espessura entre 0,02m e 0,10m. O processo de cálculo foi repetido para avaliar quais os valores de espessura que permitiam cumprir os requisitos previamente mencionados (Tabela 1) e colmatar o efeito das pontes térmicas.

Adotou-se como valor inicial a espessura de 0,02m pois para novos edifícios o $\mathrm{U_{max}}$ pode tomar um valor igual ou inferior a 0,90 W/m².°C, desde que seja garantido o cumprimento dos requisitos de conforto térmico (Diário da Républica, 2021). Assim, através do programa THERM, realizaram-se simulações para se obter o U da solução em estudo para cada material de isolamento térmico e, através da Equação 6, concluiu-se que a maioria dos materiais de isolamento necessitam de cerca de 0,02m de espessura para cumprir o requisito máximo.

$$U_{max} = \frac{1}{\frac{1}{U_{THERM}} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}}} \quad (6)$$

Através da Tabela 3 é possível observar que o $\mathrm{U_{max}}$ é cumprido para todos os materiais de isolamento, considerando uma espessura de 0,02m, exceto para o ICB. Observando a Figura 7, em parceria com a Tabela 3, conclui-se que o material de isolamento PUR é o primeiro a cumprir os requisitos de cada país (Tabela 1), sendo o material de isolamento ICB o último. Para Portugal, Espanha e França, correspondentes a países com climas amenos, poderão ser consideradas espessuras entre os 0,06m e os 0,10m dependendo do tipo de material, à exceção do isolamento PUR que atinge espessuras inferiores. Para Alemanha e Inglaterra, que apresentam climas frios, é necessário considerar valores de espessura mais elevados, entre 0.08m e 0.14m, para cumprir os requisitos de referência para todos os materiais de isolamento considerados. No caso da Dinamarca, em que os requisitos são mais exigentes, as espessuras variam bastante dependendo do material, para o material de isolamento PUR, os requisitos encontram-se em cumprimento para espessuras de 0,11m sendo que para os restantes materiais, as espessuras variam entre os 0,18m e os 0,26m, concluindo que para países com maiores exigências térmicas, a escolha do material terá muita prevalência na espessura final da solução construtiva a adotar.

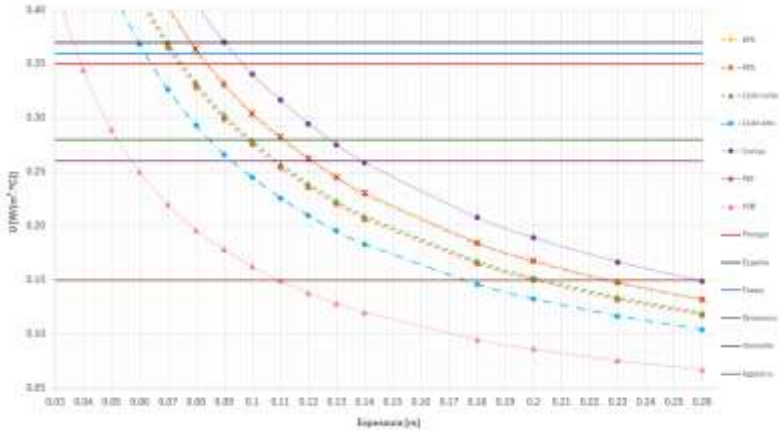


Figura 7 - Valores de U [W/m².°C] obtidos a partir do THERM para cada espessura e material considerando os $\mathrm{U_{ref}}$ de cada país em estudo.

Tabela 3 - Coeficientes de transmissão térmica superficial médios (U_{med}), coeficientes de transmissão térmica superficial obtidos através do programa THERM (U_{tot}) e coeficientes de transmissão térmica linear (ψ).

Material	Esp. [m]	U THERM [W/(m2.ºC)]	U_med [W/m2ºC]	Ψ [W/m.ºC]	Material	Esp. [m]	U THERM [W/(m2.ºC)]	U_med [W/m2ºC]	Ψ [W/m.ºC]
EPS	0,02	0,8901	0,7391	0,4379	EPS	0,11	0,2809	0,2449	0,1045
XPS		0,8275	0,6762	0,4387	XPS		0,2545	0,2332	0,0618
Lã de rocha		0,8357	0,6844	0,4387	Lã de rocha		0,2579	0,2365	0,0620
Lã de vidro		0,7578	0,6071	0,4387	Lã de vidro		0,2261	0,2058	0,0590
ICB		0,9715	0,8220	0,4370	ICB		0,3168	0,2941	0,0660
PET		0,8948	0,7438	0,4337	PET		0,2829	0,2609	0,0637
PUR		0,5532	0,4120	0,4095	PUR		0,1495	0,1330	0,0479
EPS	0,04	0,5983	0,5268	0,2073	EPS	0,12	0,2610	0,2286	0,0939
XPS		0,5493	0,4782	0,2062	XPS		0,2362	0,2176	0,0539
Lã de rocha		0,5557	0,4845	0,2064	Lã de rocha		0,2394	0,2207	0,0542
Lã de vidro		0,4957	0,4256	0,2034	Lã de vidro		0,2097	0,1919	0,0516
ICB		0,6632	0,5919	0,2069	ICB		0,2947	0,2747	0,0580
PET		0,6020	0,5305	0,2074	PET		0,2629	0,2436	0,0560
PUR		0,3447	0,2815	0,1832	PUR		0,1383	0,1239	0,0419
EPS	0,06	0,4505	0,3825	0,1972	EPS	0,14	0,2288	0,2019	0,0779
XPS		0,4111	0,3659	0,1312	XPS		0,2068	0,1920	0,0429
Lã de rocha		0,4162	0,3709	0,1314	Lã de rocha		0,2096	0,1948	0,0430
Lã de vidro		0,3683	0,3242	0,1278	Lã de vidro		0,1832	0,1692	0,0406
ICB		0,5033	0,4569	0,1346	ICB		0,2588	0,2428	0,0464
PET		0,4535	0,4075	0,1333	PET		0,2305	0,2151	0,0446
PUR		0,2502	0,2121	0,1106	PUR		0,1202	0,1090	0,0325
EPS	0,07	0,4012	0,3434	0,1676	EPS	0,18	0,1834	0,1638	0,0568
XPS		0,3653	0,3281	0,1080	XPS		0,1654	0,1556	0,0285
Lã de rocha		0,3700	0,3326	0,1084	Lã de rocha		0,1677	0,1578	0,0286
Lã de vidro		0,3265	0,2904	0,1048	Lã de vidro		0,1462	0,1369	0,0269
ICB		0,4495	0,4109	0,1121	ICB		0,2080	0,1972	0,0313
PET		0,4039	0,3659	0,1101	PET		0,1848	0,1745	0,0299
PUR		0,2201	0,1892	0,0895	PUR		0,0953	0,0879	0,0214
EPS	0,08	0,3617	0,3118	0,1447	EPS	0,20	0,1669	0,1497	0,0498
XPS		0,3288	0,2976	0,0905	XPS		0,1504	0,1421	0,0240
Lã de rocha		0,3331	0,3017	0,0909	Lã de rocha		0,1525	0,1442	0,0241
Lã de vidro		0,2933	0,2631	0,0875	Lã de vidro		0,1328	0,1250	0,0225
ICB		0,4061	0,3735	0,0945	ICB		0,1894	0,1803	0,0263
PET		0,3642	0,3323	0,0926	PET		0,1681	0,1595	0,0250
PUR		0,1965	0,1710	0,0740	PUR		0,0864	0,0802	0,0179
EPS	0,09	0,3294	0,2857	0,1268	EPS	0,23	0,1470	0,1326	0,0417
XPS		0,2990	0,2724	0,0771	XPS		0,1323	0,1258	0,0188
Lã de rocha		0,3029	0,2762	0,0773	Lã de rocha		0,1342	0,1277	0,0190
Lã de vidro		0,2662	0,2407	0,0741	Lã de vidro		0,1168	0,1106	0,0179
ICB		0,3704	0,3425	0,0808	ICB		0,1670	0,1598	0,0208
PET		0,3317	0,3044	0,0792	PET		0,1481	0,1412	0,0199
PUR		0,1786	0,1561	0,0654	PUR		0,0757	0,0709	0,0140
EPS	0,10	0,3023	0,2637	0,1120	EPS	0,26	0,1313	0,1191	0,0355
XPS		0,2757	0,2513	0,0709	XPS		0,1181	0,1129	0,0151
Lã de rocha		0,2794	0,2548	0,0713	Lã de rocha		0,1198	0,1145	0,0152
Lã de vidro		0,2452	0,2218	0,0678	Lã de vidro		0,1042	0,0992	0,0144
ICB		0,3405	0,3164	0,0699	ICB		0,1493	0,1435	0,0168
PET		0,3045	0,2810	0,0683	PET		0,1323	0,1268	0,0160
PUR		0,1628	0,1436	0,0557	PUR		0,0674	0,0635	0,0113

6 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho sobre o comportamento térmico de painéis pré-fabricados sanduíche em betão, para o presente modelo em estudo do projeto "*R2UTechnologies – Modular Systems*" é possível concluir que:

- As pontes térmicas lineares são uma grande influência no desempenho térmico das soluções em estudo, levando a grandes trocas de calor e promovendo a um mau desempenho dos painéis. A partir do programa THERM foi possível concluir que este fenómeno ocorre em diversas zonas dos painéis e que para maiores espessuras de isolamento, os coeficientes de transmissão térmica linear diminuem;
- Devido aos fenómenos descritos no ponto anterior, foi realizado um estudo experimental a diversos materiais com o intuito de caracterizar as espessuras necessárias para cumprir os regulamentos sobre o comportamento térmico de alguns países europeus, levando à conclusão de que para países com climas frios, algumas das soluções não são as mais adequadas, sendo o ICB o que apresenta piores resultados e o PUR os melhores. Adicionalmente, para países com exigências ainda mais elevadas, como o caso da Dinamarca, o resultado da espessura final da solução construtiva a adotar poderá ser significativamente diferente consoante o tipo de material de isolamento selecionado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho está a ser desenvolvido no âmbito do Pacto de Inovação "R2UTechnologies | Modular Systems" (C64487810-00000019), pelo Consórcio "R2UTechnologies" cofinanciado pelo NextGenerationEU, através do investimento "Agendas para a Inovação Empresarial" do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). O primeiro autor gostaria de agradecer ao projeto o financiamento da bolsa de doutoramento referência C644876810-00000019. Os autores agradecem ainda o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia FCT pelo financiamento ao CERIS - *Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability* (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

7 REFERÊNCIAS

International Organization for Standardisation. (2003). ISO 15099:2003, Thermal performance of windows, doors and shading devices - detailed calculations.

Amran, Y. M., El-Zeadani, M., Lee, Y. H., Lee, Y. Y., Murali, G., & Feduik, R. (2020). Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review. *Structures, 27*, 1358-1379. doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.044.

Anis-ur-Rehman, M., & Maqsood, A. (2002). A modified transient method for an easy and fast determination of thermal conductivities of conductors and insulators. 2040. doi: 10.1088/0022-3727/35/16/320.

Clarke, J., & Yaneske, P. (2009). A rational approach to the harmonisation of the thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 2046-2055. doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.008.

Diário da República. (2021). *Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho.* Lisbon: Diário da República.

Diário da República. (2021). *Portaria n.º 138-I/2021, de 1 de Julho.* Lisboa: Diário da República.

European Comission. (24 de Fevereiro de 2021). *EU Adaptation Strategy*. Obtido em 04 de May de 2024, de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en

European Council. (14 de Julho de 2021). *Council of the European Union, Fit for 55*. Obtido em 04 de May de 2024, de https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55/

Federal Law Gazette. (2013). *Federal Law Gazette, Volume 2013, Part I No. 67.* Bonn.

Fernandes, P. M. (2014). Caracterização térmica de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP). Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Orientadores: Gomes, Maria da Glória; Moret Rodrigues, António.

Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 2495-2504. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.02.008.

HM Government. (2021). *The Building Regulations 2010, Volume 1: Dwellings, Requirement L1: Conservation of fuel and power.*

Holometrix. (s.d.). Operation & maintenance maual of Holometrix model Rapid-k - heat flow meter thermal conductivity instrument, Bedford, MA.

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. (2010). *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.*

Lawrence Berkeley National Laboratory. (2024). LBNL, THERM 7.8, Disponível para descarga em: https://windows.lbl.gov/therm-software-downloads.

Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. (2022). *Documento Básico HE - Ahorro de energía.*

Oliveira, T. F., de Carvalho, J. M., Mendes, J. C., Souza, G. Z., Carvalho, R. V., & Peixoto, R. A. (2022). Precast concrete sandwich panels (PCSP): An analytical review and evaluation of CO2 equivalent. *Construction and Building Materials, 358*, 129424. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129424.

Sah, T. P., Lacey, A. W., Hao, H., & Chen, W. (2024). Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering, 89*, 109391. doi: 10.1016/j.jobe.2024.109391.

Santos, P. C., & Matias, L. (2008). ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Versão atualizada 2006. Lisboa: LNEC.

Sorensen, T. &. (2017). Thermal Evaluation of Common Locations of Heat Loss in Sandwich Wall Panels. 17th International Conference on Cold Regions Engineering. pp. 173-184. doi: 10.1061/9780784481011.017.

The Danish Transport and Construction Agency. (2015). *Danish Building Regulations 2015 (BR15).*

United Nations. (1 de Janeiro de 2016). *The 17 Goals*. Obtido em 04 de May de 2024, de https://sdgs.un.org/goals

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DA INTENSIDADE DO USO DE ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

Adriana Portugal Branco[a]; Ana Ferreira[b]; Júlia Pereira[b,c]; Maria da Glória Gomes[c]

[a] Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, adriana.portugal@tecnico.ulisboa.pt

[b] NEW EDP, Rua Particular à R. Cidade de Goa 2, 2685-039 Sacavém, Portugal, ana.ferreira@edp.pt, julia.oliveirapereira@edp.com

[c] CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Dados recentes mostram que o setor residencial representa 28% do consumo final de energia da União Europeia, enquanto em Portugal, este valor é de 17.9%. Este dado evidencia que qualquer potencial aumento na eficiência energética pode resultar numa redução do consumo de energia. O presente artigo, que incide apenas nos consumos de energia elétrica, do tem como objetivo analisar a intensidade do uso de energia elétrica (IUE_E) no sector residencial em Portugal, em kWh/m²/ano, e analisar o potencial de otimização de sistemas inteligentes que contribuam para o aumento da eficiência energética. Para isso, analisou-se um ano de dados de consumo de eletricidade de vinte e duas frações autónomas de habitação no Seixal, Portugal. Os dados de medição foram obtidos através do sistema EDP re:dy, que inclui contadores inteligentes, tomadas elétricas inteligentes (tanto normais como de ar condicionado) e gateways centrais. Após análise dos dados e deteção e correção de anomalias, foi obtida uma mediana da IUE_E de 20.38 kWh/m²/ano. Para além disso, foi analisado o Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ), que permite avaliar a correlação entre a IUE_E e os parâmetros das habitações, nomeadamente, a tipologia, o número de ocupantes, a área útil e o ano de construção, e os resultados revelaram que apenas o número de ocupantes teve uma forte correlação positiva (ρ = 0.54).

Palavras-chave: Eficiência energética, setor residencial, a intensidade do uso de energia elétrica, consumo de energia elétrica

1 INTRODUÇÃO

Em 2022, de acordo com os dados do Eurostat (2024a) e da DGEG (2023), o setor doméstico foi responsável por 25.8% e 17.9% do consumo total de energia na União Europeia (UE) e em Portugal, respetivamente. Estes dados mostram a importância que os edifícios residenciais representam na vida quotidiana das pessoas, especialmente quando uma parte significativa do nosso tempo é passado no interior destes edifícios, seja no trabalho, em casa ou na escola, entre outros locais. No consumo total de energia, um estudo recente (Eurostat 2024a) mostra que o aquecimento dos edifícios é a maior fonte de procura energética na UE, representando 63.5% do consumo energético doméstico. Em contraste, Portugal está entre os países que consome menos energia para o aquecimento das habitações, com esta atividade a contribuir com apenas 23.2% (Instituto Nacional de Estatística 2021). Essa disparidade de consumo deve-se sobretudo ao clima ameno de Portugal, que possui um dos invernos menos frios da Europa, resultando em menores necessidades de energia para aquecimento, e à escassa instalação e utilização de sistemas de aquecimento nas habitações portuguesas, apenas em cerca de 18.4% das habitações portuguesas (Instituto Nacional de Estatística 2021). Muitas famílias portuguesas não dispõem de recursos para investir em sistemas de aquecimento eficientes, melhorar o isolamento térmico das suas casas, ou pagar faturas de eletricidade associadas a consumos com aquecimento. Esta realidade motiva a contínua investigação em tópicos relacionados com desconforto térmico e pobreza energética em Portugal (Palma e Gouveia 2022; European Commission 2023), como é o caso do presente estudo.

A pobreza energética é um fator transversal à população portuguesa, considerando-se uma situação de pobreza energética quando um agregado familiar não tem acesso a serviços energéticos essenciais por falta de condições financeiras. As causas principais estão relacionadas com baixos rendimentos, fraco desempenho energético das habitações e elevados custos energéticos. Em situação de pobreza energética, alguns agregados familiares gastam uma parte considerável do seu rendimento no consumo de energia, enquanto outros limitam conscientemente a utilização de energia a níveis significativos de desconforto térmico para evitar pagar despesas excessivas (Zadaiannaia 2023).

A utilização de estatísticas existentes sobre o rendimento e as condições de vida na UE (EU-SILC) tornou-se numa ferramenta de referência para monitorizar a pobreza energética na Europa. De acordo com o EU-SILC, Portugal registou, em 2023, a taxa mais elevada da UE de famílias que consideravam não ter capacidade para manter as suas habitações devidamente aquecidas (Filippidou et a.l 2019). O nível nacional de 20.8% é muito superior à média de 10.6% da UE (Eurostat 2024b). No mesmo ano, cerca de 3.8% das famílias portuguesas não conseguiram pagar atempadamente as faturas dos serviços domésticos devido a dificuldades financeiras, sendo este valor inferior à taxa média da EU (6.9%) (Eurostat 2024c).

Se analisarmos a realidade do edificado português e o seu papel na pobreza energética em Portugal, é possível verificar que 14% dos edifícios foram construídos antes de 1945, e mais de 60% foram construídos anteriormente a 1990 (Matos et al. 2022), antes da entrada em vigor da primeira versão do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) (Diário da República 1990). Os edifícios mais antigos, que muitas vezes carecem de isolamento térmico, de equipamentos energeticamente eficientes e de sistemas de climatização, têm um fraco desempenho energético, o que os torna mais suscetíveis a perdas de calor no inverno e ganhos de calor no verão. De facto, em junho de 2024, a base de dados pública da ADENE (2024), tinha quase 1,8 milhões de certificados energéticos de edifícios de habitação, sendo que 22% destes edifícios estavam nas piores classes energéticas (13.8% com E, e 8.2% com F, sendo a classe F a mais baixa e a classe A^+ a mais alta nesta escala de desempenho energético).

Neste contexto, uma reabilitação profunda para efeitos de desempenho energético é vista como uma oportunidade para aumentar o conforto térmico dos agregados familiares, especialmente dos agregados mais vulneráveis, através da adaptação dos edifícios existentes com implementação de medidas de eficiência energética. Estas medidas englobam um conjunto de intervenções, como o isolamento térmico da envolvente do edifício (isolamento de paredes, telhados e pavimentos, substituição de janelas ou portas de entrada), a integração de energias renováveis e melhorias nos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) (SocialWatt 2023). Isto resulta em melhorias significativas no conforto, bem-estar e qualidade interior das habitações (Sousa et al. 2012).

Na implementação de soluções de melhoria de eficiência energética através de reabilitação de edificado existente é essencial estabelecer valores de referência, ou *benchmarks,* e de baseline, como limiares para classificar os edifícios com base no seu desempenho energético. Um *benchmark* é um valor de uma métrica de desempenho, definido como um ponto de referência normalizado em relação ao qual se pode comparar ou avaliar (Khoshbakht et al. 2018). Em contrapartida, uma *baseline* é um ponto de partida utilizado para comparações, frequentemente com *benchmarks* (Wilde 2018). No contexto da gestão da energia, a determinação do desempenho energético dos edifícios é amplamente reconhecida como um método para avaliar a atual eficiência energética dos edifícios, comparando-a com um cenário energético padrão. Um *benchmark* é normalmente criado a partir de um conjunto de edifícios com a mesma tipologia, tais como escritórios, hotéis ou habitações dentro da mesma zona climática (Huang et al. 2023; Li et al. 2018; Vaise et al. 2023).

Os modelos de referência energética de edifícios são frequentemente utilizados para a medição e verificação (M&V) das poupanças de eficiência energética. De acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho (IPMVP), a M&V envolve a utilização de medições para determinar com precisão as poupanças reais decorrentes da execução de um programa de gestão de energia num edifício ou instalação individual. No IPMVP, são estabelecidas *baselines* para avaliar o impacto de uma medida de conservação de energia (MCE). O consumo real de energia é medido durante um período de referência antes da implementação da MCE. Após a implementação da MCE, o consumo de energia é medido durante um período de reporte. Os padrões de utilização de energia observados durante o período de referência criam uma *baseline* ajustada que é depois extrapolada para o período de referência. A diferença entre o consumo medido durante o período de reporte e a *baseline* ajustada representa a poupança alcançada pelas iniciativas de eficiência energética (Wilde 2018; Efficiency Valuation Organization (EVO) 2022).

Dada a heterogeneidade entre os edifícios residenciais, a intensidade de uso energético (IUE), em kWh/m²/ano, ou seja, a energia final consumida anualmente numa fração autónoma por metro quadrado de área útil de pavimento, destaca-se com uma métrica fundamental para a análise e comparação da eficiência energética de diferentes edifícios (Salmeron-Manzano et al. 2020). Ferreira et al. (2018) propuseram a classificação do desempenho energético em três níveis de referência definidos pelos quartis 25, 50 e 75, correspondentes, respetivamente, a "Melhor Prática", "Prática Convencional " e "Pior Prática". A "Melhor Prática" corresponde ao limite superior do primeiro quartil (Q1), que representa o limite dos 25% de valores mais baixos. Assim, os edifícios com um valor de IUE inferior a este intervalo são considerados os mais eficientes do ponto de vista energético. Em contrapartida, os edifícios que se situam acima do limite inferior do terceiro quartil (Q3), que corresponde ao limite dos 75% dos valores mais elevados, são considerados de baixa eficiência energética. Os edifícios com uma IUE entre Q1 e Q3 têm um desempenho energético convencional.

O projeto iBroad do programa Horizonte 2020 (iBroad 2018) indicou que a IUE média para edifícios de habitação na Europa era de 188 kWh/m², enquanto em Portugal era de 70 kWh/m². No entanto,

quando se considera a intensidade do uso de energia elétrica (IUE_E), os *benchmarks* são diferentes. O projeto EURECO (2002), que analisou 92 frações autónomas de habitação em Lisboa, Portugal, concluiu que a IUE_E médio era de 28 kWh/m².

Embora existam estudos sobre a IUE_E na literatura, o nosso conhecimento atual ainda é limitado. Por conseguinte, o presente estudo tem como objetivo calcular a IUE_E de 22 frações autónomas de habitação localizadas no Seixal, Portugal, integradas no projeto Horizonte 2020 SATO (SATO 2020), e comparar os valores de IUE_E com *benchmarks* a nível europeu. Pretende-se dar resposta a duas questões: i) Qual é a distribuição do desempenho energético no atual parque de edifícios residenciais em Portugal e como se compara com os valores de referência estabelecidos?; ii) Como é que o desempenho energético varia entre diferentes tipologias de habitação, períodos de construção, área útil e número de habitantes?

2 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta as 22 habitações do concelho do Seixal, Portugal, que constituem o caso de estudo. O Seixal situa-se a 5 km a Sul de Lisboa, na margem Sul do rio Tejo. O Seixal tem um clima Mediterrânico, classificado como Csa segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, com invernos moderados e chuvosos e verões quentes e secos (Peel et al. 2007; Rodrigues et al. 2019).

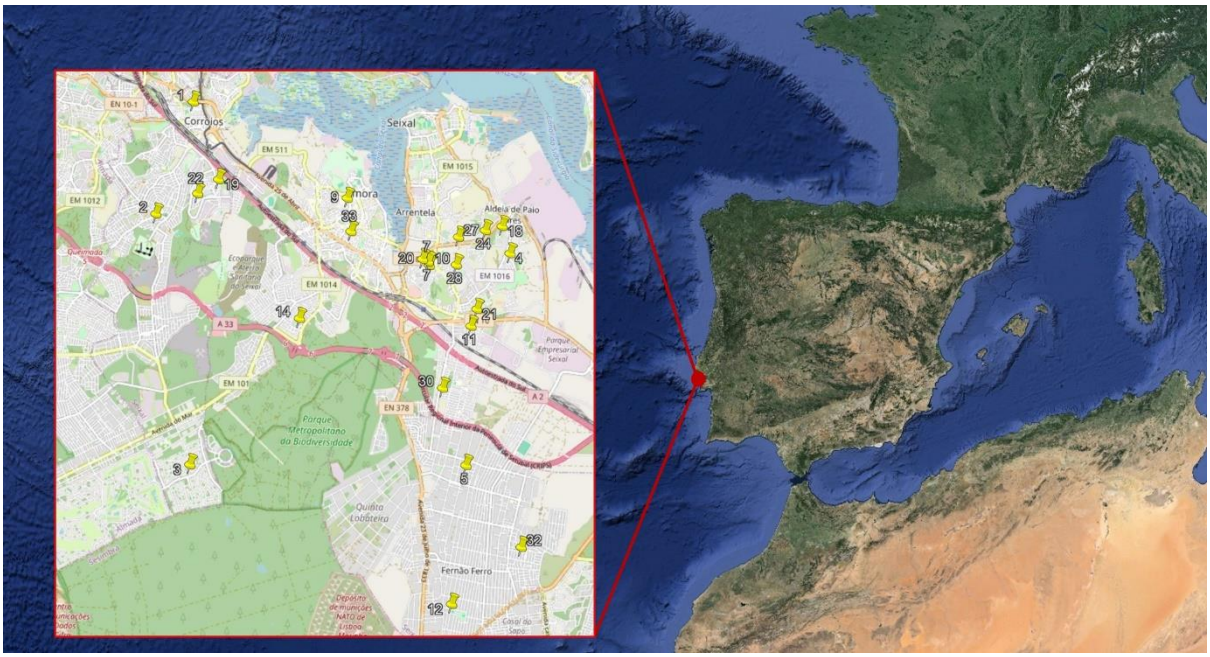


Figure 1 – Localização e distribuição das habitações do caso de estudo

As frações autónomas de habitação consideradas no presente estudo fazem parte de um dos pilotos de demonstração do projeto SATO (Self Assessment Towards Optimisation of Building Energy) financiado pelo programa Horizonte 2020 da UE (SATO 2020). Este projeto de investigação, com a duração de quatro anos, tem como objetivo melhorar a qualidade de vida dos ocupantes dos edifícios através do aumento da eficiência energética e da redução do consumo de energia, garantindo sempre o comprimento de condições de conforto interior de acordo com a legislação em vigor (SATO 2020).

O projeto SATO inclui oito pilotos de demonstração que irão implementar e testar os benefícios de melhorar o ecossistema tradicional de gestão de energia através de uma autoavaliação e otimização de consumos energéticos. Um dos pilotos do projeto localiza-se no Seixal do qual fazem parte 48

habitações. No entanto, para o presente estudo, foram selecionadas apenas 22 destas habitações devido à falta de informação sobre as restantes e à qualidade e granularidade dos dados recolhidos. Entre as 22 habitações, 10 são moradias e 10 são apartamentos, com tipologias que variam entre T2 (2 quartos) e T4 (4 quartos). Nos apartamentos, a tipologia mais comum é o T2, enquanto nas moradias prevalecem os T4. O número de ocupantes por edifício varia entre 2 e 6, refletindo a ocupação típica dos alojamentos. A área útil varia de 60 a 225 m^2, o que permite analisar as necessidades energéticas para diferentes tipologias de frações de habitação, por unidade de área construída. O objetivo do presente estudo é mostrar a variabilidade e os padrões do consumo doméstico de eletricidade para diferentes características das habitações (tipologia, número de habitantes, ano de construção e área útil de pavimento). Um resumo das características das habitações do presente estudo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das habitações agrupadas por apartamento e moradia

Tipo de habitação	Apartamento	Moradia
Tipologia	T2 ou T3	T3 ou T4
Número de habitantes	2 – 6	2 – 4
Ano de construção	1960 - 2005	1995 - 2011
Área útil	60 m^2 < T2 < 84 m^2 97 m^2 < T3 < 225 m^2	100 m^2 < T3 < 113 m^2 107 m^2 < T4 < 220 m^2

3 METODOLOGIA DE MONITORIZAÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RECOLHA DE DADOS

Para monitorizar e controlar o consumo de eletricidade das habitações foi utilizado o sistema EDP re:dy (*Remote Energy Dynamics)*. O sistema re:dy permite aos clientes a visualização de dados em tempo real, quer agregados quer ao nível dos equipamentos, e simultaneamente disponibiliza funções de gestão de energia, como o controlo remoto e a automatização dos equipamentos associados ao serviço. O sistema EDP re:dy oferece dados de alta resolução, com sensores que monitorizam o consumo com uma frequência de um minuto. Este facto permite uma visão granular dos padrões de consumo de energia ao longo do dia. O sistema EDP re:dy é composto por quatro elementos: i) o contador de energia elétrica inteligente re:dy; ii) a tomada inteligente re:dy normal; iii) a tomada inteligente re:dy de ar condicionado (AC); iv) e uma re:dy box.

A re:dy box, que funciona como uma *gateway* central, regista os dados de consumo, medidos pelos restantes equipamentos re:dy instalados na habitação e estabelece ligação ao router de internet. Esta gateway é responsável pela transmissão de dados para a plataforma SATO. No presente estudo são utilizados os dados obtidos do circuito geral, que mede o consumo global de eletricidade de toda a habitação. No entanto, os dados de consumo devem ser pré-processados e limpos antes de serem analisados, tal como descrito no subcapítulo seguinte.

3.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

A linguagem de programação utilizada para a análise de dados neste estudo foi o *Python*. O pré-processamento envolveu a remoção de linhas duplicadas, a identificação de habitações de baixo consumo energético, o tratamento de valores omissos, a deteção de valores anómalos e a normalização dos dados. Os edifícios de habitação com um consumo mensal inferior a 20 kWh foram

classificados como habitações de baixo consumo e subsequentemente retirados da análise. Este limiar baseou-se na premissa de que uma habitação com apenas aparelhos básicos, como um frigorífico, consumiria pelo menos esta quantidade de eletricidade por mês. Assim, consumos inferiores a este limiar indicam possíveis falhas na medição ou dados incorretos. Os valores omissos no conjunto de dados foram tratados utilizando a imputação linear, que estima os valores com base em pontos de dados vizinhos. As anomalias, como picos ou quedas inesperadas no consumo que não correspondiam a padrões de utilização normais, foram identificadas como potenciais falhas dos equipamentos de monitorização ou erros de registo de dados. Estes valores anómalos foram corrigidos substituindo-os pela leitura válida anterior. Os dados foram posteriormente agregados numa base horária a partir da soma dos registos efetuados a cada minuto.

Embora todas as habitações tenham iniciado a monitorização em maio de 2022, as datas de início variaram, sendo o primeiro dia de registo 9 de maio de 2022 e o último dia de registo comum 9 de maio de 2023. Para garantir um ano completo de dados para cada habitação, o dia 9 de maio de 2022 foi selecionado como a data de início comum para o período de análise. Para colmatar eventuais lacunas entre a data real de monitorização inicial e 9 de maio de 2022, foi utilizado um método de imputação baseado nos dias de semana. O processo de imputação envolveu a identificação de períodos não monitorizados nos dados agregados por hora. Para cada valor em falta, foram utilizados dados da mesma hora no mesmo dia da semana seguinte para preencher essa lacuna. Este método foi escolhido porque o consumo residencial de eletricidade segue normalmente um padrão semanal devido às atividades domésticas regulares e à utilização dos eletrodomésticos. Consequentemente, o período de análise foi definido de 9 de maio de 2022 a 9 de maio de 2023, permitindo um ano completo de análise e comparável de dados de consumo de eletricidade para todas as habitações.

Por fim, para estabelecer comparações precisas entre habitações de diferentes dimensões, os dados relativos ao consumo de eletricidade foram normalizados em função da área útil de pavimento de cada habitação.

3.3 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE *BASELINES*

A metodologia proposta para a avaliação do desempenho energético de habitações assenta em duas vertentes. Em primeiro lugar, foram definidos *benchmarks* para os edifícios residenciais em Portugal e na UE. De seguida, foram calculadas *baselines* utilizando o consumo real da amostra.

A maioria dos *benchmarks* na literatura incluem todas as fontes de energia utilizadas num edifício para diversos fins, como o gás natural e a eletricidade. No entanto, tendo em conta que os dados recolhidos, no presente estudo, são apenas relativos à eletricidade, é essencial dispor de *benchmarks* da IUE especificamente para o consumo de eletricidade. Os estudos existentes são limitados ou desatualizados, pelo que esta métrica não está amplamente disponível na literatura. A título ilustrativo, o último *benchmark* da IUE_E para Portugal data de um estudo efetuado em 2000 (EURECO 2002), que indicava um valor médio de IUE_E de 28 kWh/m².

Para estimar os *benchmarks*, o método envolveu a recolha de dados para Portugal e para a UE sobre a área útil total (A_U) dos edifícios residenciais em m², e o consumo total de eletricidade do setor doméstico (E_D) em kWh. A IUE_E é calculada dividindo o E_D pela A_U. De acordo com os dados do Eurostat de 2020 (Eurostat 2024c), o consumo total de eletricidade para o setor residencial em Portugal foi de 13 655 992 000 kWh, enquanto a UE consumiu 712 514 729 000 kWh. Em 2020, o Observatório do Parque Imobiliário da UE (European Commission 2024) indicou que a área útil total do setor residencial em Portugal era de 537 163 228 m², enquanto na UE era de 18 408 352 827 m². A Tabela 2 indica os parâmetros e valores utilizados para calcular a IUE_E. Os resultados demonstram

que o setor residencial na UE apresenta uma IUE_E de 38.71 kWh/m², enquanto o valor de referência nacional é de 25.42 kWh/m².

Tabela 2 - Análise comparativa das IUE_E para o setor doméstico em Portugal e na UE em 2020

Parâmetro	Portugal	União Europeia
E_D (kWh)	13 655 992 000	712 514 729 000
A_U (m²)	537 163 228	18 408 352 827
IUE_E (kWh/m²)	25.42	38.71

Estes valores estimados irão servir de referência para a comparação com o desempenho real das habitações em estudo. A IUE_E é calculada para cada habitação, dividindo o seu consumo total de eletricidade pela respetiva A_U. Uma vez determinadas as *baselines* individuais, são utilizadas medidas estatísticas para analisar a distribuição dos valores da IUE_E na amostra. Especificamente, são calculadas a mediana, o Q1 e o Q3. Para classificar as habitações com base nestes quartis, é estabelecido o seguinte sistema de classificação de desempenho energético:

- "Melhor Prática": O Q1 representa o nível de consumo de energia mais baixo. As habitações com a IUE_E abaixo do limite superior do Q1 apresentam as melhores práticas de eficiência energética da amostra.
- "Prática Convencional": A mediana da IUE_E serve como *benchmark* para a amostra. As habitações com a IUE_E entre Q1 e Q3 representam o desempenho típico do grupo.
- "Pior Prática": O Q3 representa o nível de consumo mais elevado. As habitações com o IUE_E acima do limite inferior do Q3 são as menos eficientes.

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O CONSUMO DE ELETRICIDADE

Recorreu-se ao Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ) para avaliar o grau de correlação entre as características das habitações e a IUE_E. As variáveis consideradas para esta análise foram a tipologia, o número de ocupantes, o ano de construção e a área útil de pavimento. O coeficiente ρ varia entre -1 e 1 (Ahemaitihali e Dong 2022), apresentando-se na Tabela 3 os níveis de correlação correspondentes a cada valor de ρ.

Tabela 3 - Níveis de correlação de acordo com o valor de ρ (Ahemaitihali e Dong 2022)

Valores de ρ	Correlação
$\rho = 0$	Nula
$0 < \lvert\rho\rvert < 0.25$	Muito fraca
$0.25 < \lvert\rho\rvert < 0.5$	Fraca
$0.5 < \lvert\rho\rvert < 0.75$	Forte
$0.75 < \lvert\rho\rvert < 1$	Muito forte
$\lvert\rho\rvert = 1$	Perfeita

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 DESEMPENHO ENERGÉTICO DA AMOSTRA

A Figura 2 apresenta a IUE_E, expressa em kWh/m², para uma habitação específica (cada barra), identificada pelo seu ID, tal como foi identificada no projeto SATO.

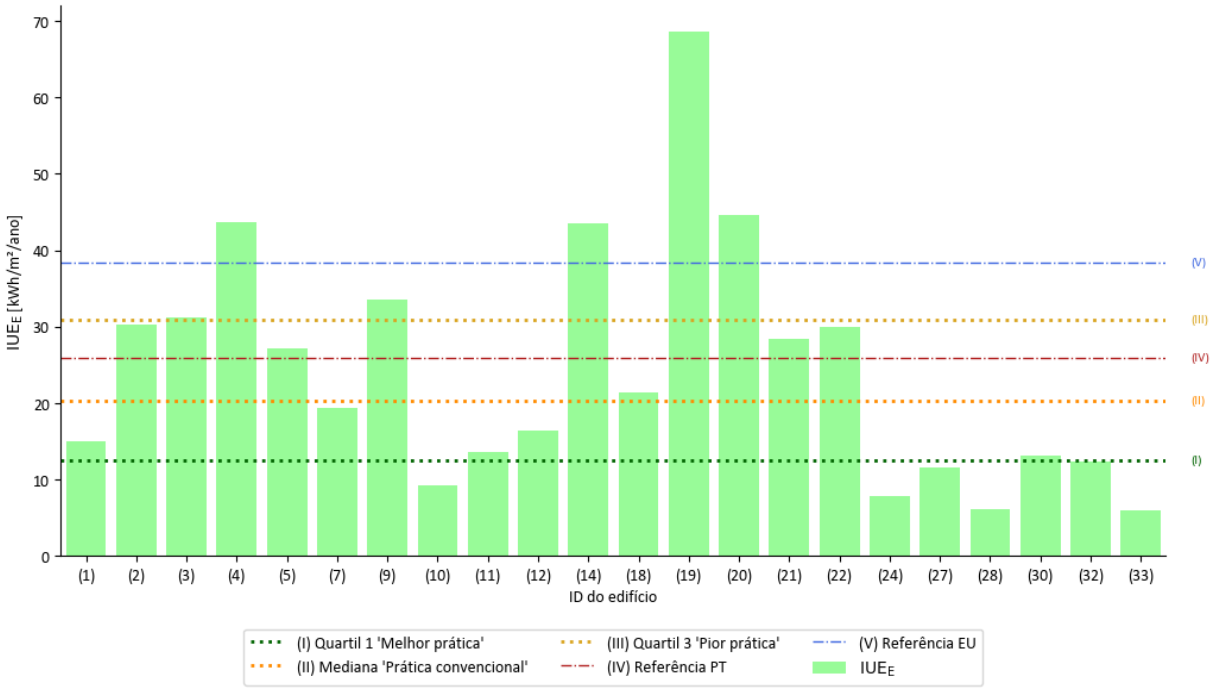


Figura 2 – IUE_E das habitações da amostra

A Figura 2 inclui linhas horizontais correspondentes a diferentes *benchmarks* e práticas para comparação:

- Linha I - Esta linha representa o Q1 – "Melhor Prática" - da amostra, com um valor de 12.60 kWh/m². As habitações abaixo deste limiar estão entre as que apresentam melhores resultados em termos de eficiência energética, constituindo uma referência para a utilização ótima da energia no contexto residencial em Portugal.
- Linha II - Com um valor de 20.39 kWh/m², representa a mediana da "Prática Convencional", i.e. o desempenho energético típico das habitações da amostra. A mediana da IUE_E da amostra serve como *benchmark* para o consumo típico de energia dentro deste grupo de habitações.
- Linha III - As habitações acima desta linha, que corresponde ao Q3 com um valor de 30.98 kWh/m² são menos eficientes em termos energéticos do que a maior parte do grupo da amostra.
- Linha IV – Esta linha representa o *benchmark* de Portugal (25.42 kWh/m²).
- Linha V – O *benchmark* da UE (38.71 kWh/m²) é apresentado pela linha V.

A eficiência energética das habitações pode ser avaliada com maior precisão ao comparar-se os dados da amostra com os *benchmarks* da UE e de Portugal. Na Figura 2 pode observar-se que apenas quatro habitações (IDs 4, 14, 19 e 20) excedem a linha V, mostrando que a maioria das habitações da amostra é mais eficiente em termos energéticos do que o *benchmark* da UE. No entanto, quando comparadas com o *benchmark* português, dez habitações (IDs 2, 3, 4, 5, 9, 14, 19, 20, 21 e 22) excedem a linha IV.

Isto demonstra que, embora uma parte significativa dos alojamentos tenha um consumo de energia mais baixo, a restante metade continua a ter um desempenho acima do valor de referência nacional, o que evidencia a necessidade de melhorias específicas.

Por outro lado, as habitações com uma IUE_E acima da Linha III (correspondente ao Q3, Figura 2) são consideradas as menos eficientes em termos energéticos. Estas incluem habitações com IDs 3, 4, 9, 14, 19 e 20. Os elevados valores da IUE_E são indicativos de oportunidades de melhoria no desempenho energético destas habitações. As intervenções de reabilitação energética poderiam incluir a melhoria do isolamento térmico, a atualização dos sistemas de climatização e o incentivo a comportamentos de poupança de energia entre os ocupantes. A melhoria da eficiência energética nestas habitações poderia reduzir significativamente o seu consumo, aproximando-o mais da mediana da amostra.

Para além disso, as habitações com os IDs 10, 24, 27, 28, 32 e 33 são as mais eficientes, com valores de IUE_E inferiores à da Linha I (correspondente ao Q1, Figura 2). Estas habitações representam as melhores práticas de utilização de energia da amostra. Os baixos valores da IUE_E indicam uma melhor eficiência energética, que pode estar relacionada com fatores como um melhor isolamento térmico da envolvente, eletrodomésticos mais eficientes e habitações mais pequenas ou com menos ocupantes. O impacto de diferentes características das habitações no IUE_E será analisado no subcapítulo seguinte. Estas habitações podem servir como referência, fornecendo exemplos de medidas eficazes que podem ser implementadas noutras habitações.

4.2 ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM CONSUMO DE ELETRICIDADE

A Figura 3 mostra quatro gráficos de dispersão, cada um com o respetivo coeficiente de correlação, ρ, ilustrando o impacto da tipologia, número de habitantes, ano de construção e área útil na IUE_E.

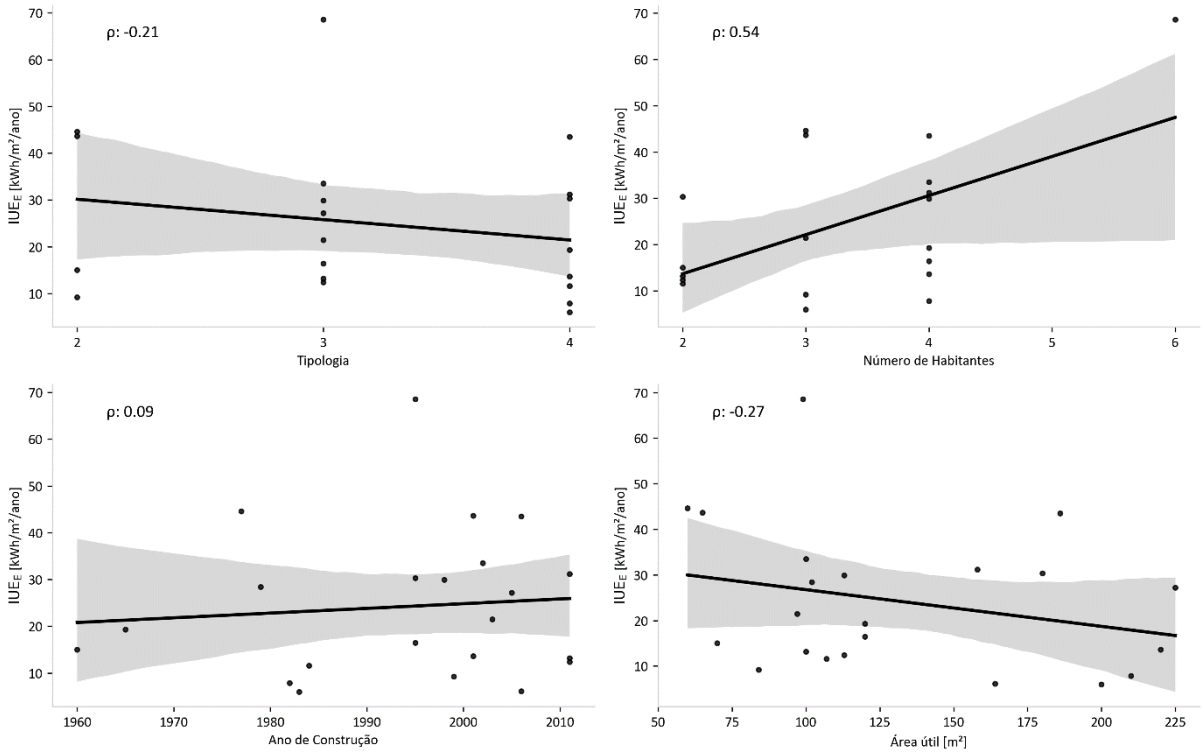


Figura 3 – Gráfico de dispersão e coeficiente de correlação (ρ) para a análise de correlação da tipologia, número de habitantes, ano de construção e área útil com a IUE_E

Tal como se pode observar na Figura 3, existe uma correlação negativa muito fraca entre a IUE_E e a tipologia (ρ = - 0.21). O gráfico de dispersão mostra uma ligeira tendência descendente, indicando que, à medida que a tipologia aumenta de T2 para T4 (ou seja, de 2 para 4 quartos), há uma pequena diminuição da IUE_E. No entanto, o impacto da tipologia na IUE_E é mínimo.

Em contrapartida, a análise de correlação revelou uma forte correlação positiva entre a IUE_E e o número de ocupantes (ρ = 0.54). Pode concluir-se que a dimensão do agregado familiar influencia significativamente (correlação forte, Tabela 3) o consumo de eletricidade. À medida que o número de habitantes aumenta, também aumenta a IUE_E. As famílias mais numerosas têm um maior consumo total de eletricidade devido à utilização mais frequente de eletrodomésticos como frigoríficos, máquinas de lavar roupa, máquinas de lavar louça, fogões e fornos. Estes aparelhos são mais utilizados à medida que aumenta o número de residentes que deles dependem. Além disso, o número médio de aparelhos tende a aumentar com o número de membros do agregado familiar. Outra razão para a forte correlação entre o número de ocupantes e a IUE_E reside nos diferentes padrões de comportamento e estilos de vida das famílias. As necessidades energéticas variam ao longo do dia, uma vez que as pessoas utilizam a eletricidade para aquecimento, arrefecimento e entretenimento em alturas diferentes.

Por outro lado, verificou-se (Figura 3) que o ano de construção e a IUE_E têm uma correlação positiva muito fraca (ρ = 0.09). A linha de regressão é quase horizontal, mostrando que, neste conjunto de dados, o ano de construção não tem um impacto significativo na IUE_E. Esta correlação contraria as expectativas, uma vez que era expectável que as habitações mais antigas fossem as menos eficientes do ponto de vista energético, resultando num aumento da IUE_E ao longo dos anos. Normalmente, os edifícios mais antigos consomem mais energia devido a uma envolvente térmica com menor resistência térmica, maiores infiltrações de ar e mais ganhos solares e a sistemas de AVAC e outros eletrodomésticos energeticamente pouco eficientes. No entanto, esta discrepância pode ser explicada pela implementação de medidas de reabilitação nas habitações mais antigas, reduzindo assim o seu consumo energético.

Por último, existe uma correlação negativa fraca entre a área útil e a IUE_E (ρ = - 0.27). Esta correlação indica que as habitações maiores tendem a ter uma IUE_E ligeiramente inferior. No entanto, a correlação não é forte, o que significa que a área útil, por si só, não é responsável por elevadas variações na IUE_E.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo analisou a IUE_E de 22 habitações localizadas no Seixal, Portugal, e comparou os seus valores com *benchmarks* ao nível europeu e nacional. Após o pré-processamento e análise de dados, recorrendo-se à linguagem de programação *Python,* esta métrica foi calculada utilizando valores agregados de consumo de eletricidade, obtidos a partir de contadores inteligentes instalados nas habitações. É de notar que no presente artigo apenas foram monitorizados os consumos de energia elétrica.

A mediana da amostra é de 20.39 kWh/m², um valor inferior aos *benchmarks* de Portugal e da UE, que são 25.42 kWh/m² e 38.71 kWh/m², respetivamente. Embora a mediana da amostra seja semelhante ao valor de referência português, o estudo foca-se numa região específica, o Seixal, proporcionando uma representação mais precisa do consumo energético local. Foram ainda estabelecidos quartis para classificar os edifícios em categorias de “Prática Convencional”, “Melhor Prática” e “Pior Prática”. O limite superior do primeiro quartil representou a fronteira para os 25% valores mais baixos (Q1), indicativos de melhores práticas, enquanto o limite inferior do terceiro quartil (Q3) delimitou os 75%

valores mais altos, representando as piores práticas. As habitações com "Prática Convencional" apresentaram valores de IUE_E entre 12.60 kWh/m²/ano e 30.98 kWh/m²/ano, com as habitações classificadas como "Melhor Prática" localizadas no limite inferior a 12.60 kWh/m²/ano.

Verificou-se também que existe uma forte correlação positiva entre os valores da IUE_E e o número de ocupantes (ρ = 0.54), bastante mais significativa da encontrada com os restantes fatores analisados (tipologia, ano de construção e área útil de pavimento).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020). Agradecem também o apoio do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia e de vários parceiros através do projeto de investigação "Self-Assessment Towards Optimization of Building Energy" (SATO, https://www.sato-project.eu/), acordo de subvenção n.º 957128.

REFERÊNCIAS

ADENE. (2024). *Estatística do sistema de certificação energética dos edifícios*. Obtido de https://www.sce.pt/estatisticas/

Ahemaitihali, A., & Dong, Z. (2022). Spatiotemporal characteristics analysis and driving forces assessment of flash floods in altay. *Water, 14*(3). doi:https://doi.org/10.3390/w14030331

Amber, K. P., Saeed, M. U., Aslam, M. W., Hussain, I., & Khan, M. S. (2018). Effect of different factors on the electricity consumption and electricity usage intensity (EUI) of residential buildings in Pakistan. *Revista de la construcción, 17*(3), 473-483. doi:http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.17.3.473

DGEG. (2023). Balanço Energético Nacional 2022. *Direção-Geral de Energia e Geologia, 227*.

Diário da República. (1990). Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro. Obtido de https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/40-1990-334611

Efficiency Valuation Organization (EVO). (2022). *The International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)*. Obtido de https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp

EURECO. (2002). Demand-side MANAGEMENT, end-use metering campaign in 400 households of the European Community, assessment of the potential electricity savings. *Project EURECO*. Obtido de https://www.eerg.it/resource/pages/it/Progetti_-_MICENE/finalreporteureco2002.pdf

European Commission. (2023). Porto Energy ElevatoR (PEER). *Energy Poverty Advisory Hub*. Obtido de https://portoenergyhub.pt/

European Commission. (2024). *EU Building Stock Observatory - Factsheets*. Obtido de https://building-stock-observatory.energy.ec.europa.eu/factsheets/

Eurostat. (2024a). *Energy consumption in households*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use

Eurostat. (2024b). *Inability to keep home adequately warm - EU-SILC survey*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ilc_mdes01/default/table?lang=en

Eurostat. (2024c). *Arrears on utility bills - EU-SILC survey*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ilc_mdes07/default/table?lang=en

Eurostat. (2024c). *Supply, transformation and consumption of electricity*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_cb_e__custom_10533737/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=8528822a-7441-4d2b-8bab-548cb6ad92a4

Ferreira, A., Pinheiro, M. D., Brito, J., & Mateus, R. (2018). Combined carbon and energy intensity benchmarks for sustainable retail stores. *Energy, 165*, 877-889. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.020

Filippidou, F., Kottari, M., & Politis, S. (2019). Mapping energy poverty in the EU: policies, metrics and data. *Eceee 2019 Summer Study*.

Huang, H., Zhu, K., & Lin, X. (2023). Research on Formulating Energy Benchmarks for Various Types of Existing Residential Buildings from the Perspective of Typology: A Case Study of Chongqing, China. *Buildings, 13*(5). doi:https://doi.org/10.3390/buildings13051346

iBroad. (2018). *Factsheet: Portugal. Current use of EPCs and potential links to iBRoad*. Obtido de https://ibroad-project.eu/wp-content/uploads/2018/

Instituto Nacional de Estatística (2021). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico. Obtido de https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=48433981&PUBLICACOESmodo=2

Khoshbakht, M., Gou, Z., & Dupre, K. (2018). Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings. *Energy and Buildings, 164*, 61-76. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.001

Li, X., Yao, R., Li, Q., Ding, Y., & Li, B. (2018). An object-oriented energy benchmark for the evaluation of the office building stock. *Utilities Policy, 51*, 1-11. doi: https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.01.008

Matos, A., Delgado, J., & Guimarães, A. (2022). Linking energy poverty with thermal building regulations. *Energies, 15*(1). doi:https://doi.org/10.3390/en15010329

Palma, P., & Gouveia, J. P. (2022). Bringing energy poverty research into local practice - exploring subnational scale analyses. *Energy Poverty Advisory Hub, Directorate-General for Energy, European Commission*, pp. 1-42. Obtido de Energy Poverty Advisory Hub: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/publications/publications/bringing-energy-poverty-research-local-practice-exploring-subnational-scale-analyses_en#details

Peel, M., Finlayson, B., & Mcmahon, T. (2007). Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 4*(2). doi:https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

Rodrigues, A. M., Santos, M., Gomes, M. G., & Duarte, R. (2019). Impact of Natural Ventilation on the Thermal and Energy Performance of Buildings in a Mediterranean Climate. *Buildings, 9*(5). doi:https://doi.org/10.3390/buildings9050123

SATO. (2020). *Self Assessment Towards Optimization of Building Energy*. Obtido de https://www.sato-project.eu/

SocialWatt. (2023). *Country factsheet - Portugal*. Obtido de https://socialwatt.eu/sites/

Sousa, J., Almeida, M., & Silva, S. (2012). Energy rehabilitation of portuguese residential building stock through its transformation into NZEB. *Universidade do Minho*. Obtido de https://core.ac.uk/outputs/55621863?source=oai.

Vaise, S., Varmazyari, P., Esfandiari, M., & Sharbaf, S. (2023). Developing a multi-level energy benchmarking and certification system for office buildings in a cold climate region. *Applied Energy, 336*. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120824

Wilde, P. (2018). Chapter 6 - performance quantification. Em *Building Performance Analysis.* John Wiley Sons, Ltd. doi:https://doi.org/10.1002/9781119341901.ch6.

Zadaiannaia, L. (2023). *Energy poverty and housing energy efficiency in Portugal.* Obtido de With Portugal: https://withportugal.com/en/blog/pobreza-energetica

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PASSAPORTE PARA A RENOVAÇÃO DE EDIFÍCIOS COMO INSTRUMENTO ESTRATÉGICO PARA A RENOVAÇÃO A LONGO PRAZO

Gabriela Barbosa[a]; Manuela Almeida[a]

[a] Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal;
pg49910@alunos.uminho.pt

RESUMO

O objetivo principal da União Europeia é alcançar a descarbonização total do setor dos edifícios até 2050, exigindo a renovação de 97% do parque edificado atual. A taxa anual de renovação deve aumentar de 1,2% para 3%, com foco em renovações profundas para melhorar a eficiência energética.

O Passaporte de Renovação de Edifícios (PRE) surge como uma ferramenta chave, projetada para facilitar e apoiar o processo de reabilitação energética, orientando proprietários através das intervenções necessárias ajustadas às suas condições específicas e auxiliando na obtenção de financiamento e assistência técnica. Este artigo destaca uma abordagem abrangente de reabilitação aplicada a edifícios habitados por famílias associadas a pobreza energética, demonstrando a criação de roteiros personalizados de renovação que detalham cada passo do processo de melhoria, as economias de energia esperadas, reduções de emissões de CO2 e custo do investimento.

A metodologia foi testada num estudo de caso no Porto, envolvendo edifícios de baixa eficiência energética e famílias de baixo rendimento, incluindo avaliações preliminares e cálculos de necessidades e economias energéticas.

Conclui-se que uma estratégia de renovação detalhada e personalizada pode fornecer informações valiosas para proprietários e decisores políticos, facilitando a tomada de decisões e a implementação de ações eficazes para a melhoria energética.

Palavras-chave: Pobreza Energética, Eficiência Energética, Passaporte de Renovação de Edifícios

1 INTRODUÇÃO

Combater a Pobreza Energética (PE) é uma prioridade na UE, especialmente no contexto geopolítico atual e suas implicações sociais. Dados da Comissão Europeia de outubro de 2023 (*Statistics | Eurostat*, 2023) apontam para 40 milhões de europeus a viver em agregados sem condições para manter a casa aquecida. A Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) revista a 24 de abril de 2024 (Diretiva (UE) 2024/1275)**,** destaca a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e ao mesmo tempo combater a PE na UE.

A PE é considerada um fenómeno multidimensional e complexo (Boardman, 2009), emergindo, primordialmente, devido a três causas fundamentais: baixos rendimentos das famílias e, por isso, dificuldade em aceder a serviços energéticos eficientes e com qualidade, baixo desempenho energético das habitações e baixos níveis de literacia energética (Bouzarovski, 2014). A definição adotada pela UE constante na Diretiva (EU) 2023/1791, de 13 de setembro e incorporada na lei portuguesa (*ELPPE*, 2024) a 8 de janeiro de 2024, estipula que PE é a falta de acesso de um agregado familiar a serviços energéticos essenciais que garantem níveis básicos de vida e saúde, como aquecimento, água quente, arrefecimento, iluminação e energia para eletrodomésticos. Isto deve-se a fatores como preços inacessíveis, rendimento insuficiente, elevadas despesas energéticas e baixa eficiência energética das habitações, considerando o contexto e políticas nacionais.

Para mitigar a PE, são necessárias medidas eficazes como assistência financeira a grupos vulneráveis, redução dos preços da energia e melhoria da eficiência energética das habitações. De salientar que, embora ainda incipientes, estão já a ser exploradas inovações políticas, sociais, e técnicas de eficiência energética e renovação sustentável de edifícios para mitigar este problema (Gouveia & Barbosa, 2022).

Segundo dados do Building Stock Observatory em 2022, 6,9% da população europeia tinha dificuldades para pagar despesas de energia e 9,3% não conseguia manter o alojamento aquecido. Em Portugal, segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística (*INE*, 2024a), no Inquérito às Condições de Vida e Rendimento 2023, 20,8% da população viveu em 2023 sem recursos suficientes para aquecer a casa, um aumento de 3,3 pontos percentuais em relação a 2022. Portugal estava entre os 5 países da UE-27 com maior incidência de incapacidade térmica, com 17,5%, quase o dobro da média europeia. Dos 1,7 milhões de certificados energéticos emitidos entre 2014 e 2022, apenas 17% das habitações têm uma classificação de eficiência elevada (A ou A+), enquanto 66,3% têm classe energética C ou inferior. Em 2023, 33,0% da população vivia com privação em pelo menos um dos seguintes itens: sem banheira, duche ou retrete no interior do alojamento, teto que deixa passar água, humidade nas paredes ou apodrecimento das janelas ou soalho, e luz natural insuficiente. A partir destes dados, estima-se que de 1,8 a 3 milhões de pessoas vivam em situação de pobreza energética dentro do contexto nacional.

Existe uma forte ligação entre pobreza energética, habitação precária e necessidades energéticas. Muitos estudos têm demonstrado que a má conservação das habitações é um fator-chave no aumento das necessidades de energia, o que impacta na PE e tem consequências negativas para a saúde (Lu & Ren, 2023) (Halkos & Gkampoura, 2021). De realçar que a PE não se restringe às famílias com dificuldades financeiras. Também estão incluídas as famílias que adotam práticas de restrição de uso para evitar custos com energia. Em nenhum dos casos existe disponibilidade para aceder a serviços energéticos eficientes ou melhorar o conforto térmico de suas casas.

Em Portugal, a Estratégia Nacional de Longo Prazo para Combater a Pobreza Energética (*ELPPE*, 2024) visa eliminar essa questão até 2050, protegendo os consumidores vulneráveis e garantindo sua participação justa na transição energética. Esta estratégia foca em melhorar a eficiência energética das habitações por meio de métodos construtivos inovadores, reformas e adoção de novas tecnologias, reduzindo o consumo de energia e aumentando o conforto. Além disso, inclui a promoção de

tecnologias de energia renovável para eletricidade, aquecimento e arrefecimento, com ênfase na eletrificação dos consumos e na redução das emissões de carbono.

O aumento da eficiência energética dos edifícios exigirá renovações profundas (RP). A RP numa única etapa tem a vantagem de evitar que as medidas iniciais comprometam a implementação de medidas mais eficientes no futuro, garantindo assim os benefícios totais da RP (Österbring et al., 2019). No entanto, o investimento na RP numa única etapa nem sempre é viável para os agregados mais vulneráveis ou até para os agregados com insuficiência de recursos. Realizar uma RP em várias etapas ajuda, por isso, a distribuir o investimento financeiro ao longo do tempo, possibilitando a realização de obras no final da vida útil de alguns elementos que precisariam ser renovados no seu final de vida, o que diminui os custos. A possibilidade de fazer RP gradualmente oferece ainda flexibilidade, caso as circunstâncias familiares se alterem, e a possibilidade de incorporação de novas tecnologias numa fase posterior, na eventualidade de se tornarem mais acessíveis (Fritz et al., 2019). No entanto, é essencial que uma RP em etapas seja realizada de forma estruturada e planeada de forma a garantir que as futuras etapas de renovação sejam compatíveis com o objetivo final da RP. Este é o conceito associado ao Passaporte de Renovação (PRE) que é um documento que detalha um plano de RP a longo prazo, passo a passo. O PRE garante a qualidade do processo de renovação ao definir cada etapa e as conexões entre todas as medidas implementadas e a implementar. É apresentada não apenas como uma intervenção técnica, mas também como um plano de melhoria da habitação, levando em consideração as necessidades dos envolvidos. O PRE propõe ser um documento, complementar ao Certificado Energético (SCE), que disponibiliza um roteiro de renovação concebido para simplificar e apoiar o processo de reabilitação energética. O projeto IBRoad2EPC (iBRoad2EPC, 2023) é um exemplo de um modelo de passaporte que integra os elementos do PRE com os do SCE (Sistema de Certificação Energética Nacional), facilitando o processo de renovação e alocando menos custos à sua elaboração. O objetivo desta ferramenta é providenciar sugestões personalizadas sobre as opções de reabilitação, resultado de uma prévia auditoria energética no local, com base nos critérios específicos e indicadores de qualidade estabelecidos em conjunto com o proprietário. Visa facilitar a implementação de uma RP eficaz, planeada e alinhada com os objetivos do proprietário e os requisitos de longo prazo, nacionais e europeus.

Neste estudo, são analisadas duas casas unifamiliares de famílias de baixos rendimentos para avaliar a eficácia do PRE na promoção da eficiência energética, utilizando o modelo do iBRoad2EPC (iBRoad2EPC, 2023). O objetivo é melhorar a condição das habitações, desenvolvendo planos de RP personalizados baseados nas suas necessidades específicas. Esses planos servirão como roteiros, delineando as medidas, o consumo de energia previsto, os custos e os níveis de conforto esperados. A análise tenta compreender como o PRE pode influenciar a escolha das medidas de RP, equilibrando descarbonização, preferências dos ocupantes e recursos financeiros disponíveis. A metodologia é descrita na próxima secção, seguida da apresentação do caso de estudo, proposta de melhoria energética, resultados e conclusões finais.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste caso de estudo visa criar um roteiro de renovação por etapas até atingir as metas de descarbonização em 2050, considerando as particularidades da PE. Serão consideradas medidas mínimas que aumentem a classificação energética de forma progressiva, com o menor investimento possível, sem comprometer os requisitos de qualidade térmica e conforto exigidos pelos regulamentos vigentes.

O estudo foi estruturado tendo em conta a metodologia do projeto iBRoad2EPC (BRoad2EPC, 2023) acrescentando indicadores de PE. Com base no iBRoad2EPC, seguiram-se os seguintes passos:

1. **Diagnóstico (visita ao local)**: a visita ao local permite fazer um diagnóstico tanto do edificado como das necessidades dos seus habitantes. O iBRoad2EPC disponibiliza uma *checklist* e um formulário em branco para esboçar a estratégia de renovação durante a visita ao local. Para a análise da pobreza energética foram considerados os indicadores principais para aferir a PE em Portugal segundo a ELPPE (Tabela 1). Também foram identificadas as patologias nos elementos construtivos, que o ICOR apontou como fatores contribuintes para o agravamento das situações de pobreza energética (Tabela 2).
2. **Avaliação do estado dos edifícios**: com os dados recolhidos na visita ao local, foi avaliado o estado atual do edifício em relação à existência de anomalias construtivas e foi avaliado o desempenho térmico dos edifícios, seguindo a metodologia definida na regulamentação portuguesa (Decreto-Lei n.º 101-D/2020) utilizando a ferramenta do ITECONS para aferir a classe energética, as necessidades anuais de energia primária e as emissões de CO2.
3. **Definição da estratégia de renovação**: na preparação de uma estratégia de renovação a longo prazo, as principais questões são as medidas a selecionar e o momento da sua implementação. A estratégia definida teve em conta as preferências tanto dos inquilinos, como do senhorio. Estabeleceram-se etapas ASAP (*as soon as possible* – logo que possível) e etapas para 2030, 2040 e 2050. Priorizaram-se medidas de renovação que melhoram o desempenho energético da habitação por meio de soluções passivas. Escolheram-se medidas que aumentam o conforto térmico e reduzem problemas de humidade (envolvente opaca, envidraçada e aumento da ventilação). Em seguida, optou-se por medidas que promovem o conforto térmico por meios ativos (aquecimento eficiente do ambiente). Por fim, selecionaram-se as medidas de descarbonização do consumo de energia da habitação, promovendo-se o aquecimento/arrefecimento e AQS através da produção para autoconsumo de eletricidade de origem renovável, de acordo com as linhas de ação e objetivos estratégicos emanados da ELPPE.
4. **Avaliação das medidas planeadas**: foi realizado o cálculo de cada etapa de renovação com a utilização do software do ITECONS, simulando diferentes cenários necessários para se atingirem as diversas classes energéticas previstas nos Certificados Energéticos até ao nível correspondente ao carbono zero. Para o cálculo da energia produzida por sistemas solares térmicos ou fotovoltaicos no âmbito do SCE foi utilizado o software SCE-ER. Foram determinados também os custos de cada etapa utilizando a ferramenta da Cype, Gerador de Preços (*Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A.*, 2024). Foi previsto também um cenário que considera apenas as medidas que o proprietário e inquilinos estão na disposição de investir nas habitações.
5. **Criação do Passaporte de Renovação do Edifício:** por fim, desenvolveu-se um PRE que providencia um roteiro para a RP até se alcançar a meta de carbono zero em 2050, por etapas (ASAP, 2030, 2040 e 2050). Cada etapa descreve os preparativos para as medidas de renovação posteriores de modo a não comprometer a qualidade e eficácia da renovação global.
6. **Conclusões:** analisaram-se as medidas de renovação preconizadas para a RP por etapas de modo a aumentar o nível de eficiência energética das habitações de baixos rendimentos. Estabeleceram-se os mínimos de intervenção/custos para aumentar um nível de classe energética.

3 CASO DE ESTUDO

Para este caso de estudo foram escolhidas duas habitações (Casa nº4 e Casa nº 13) de um conjunto de 13 casas unifamiliares geminadas que constituem um pequeno bairro no Porto, propriedade de um senhorio privado. Algumas destas casas estão devolutas e outras estão arrendadas a famílias de baixo rendimento. Este bairro está localizado no Porto, Norte de Portugal, a 72m de altitude, com um clima caracterizado por uma temperatura média de Inverno de 10,1ºC e no Verão de 20,9ºC. A solução construtiva existente é maioritariamente de alvenaria de pedra com baixo desempenho energético. Algumas habitações têm as instalações sanitárias fora do alojamento. Este bairro, construído em 1967 antes da implementação do primeiro regulamento térmico, integra os 21,2% do parque habitacional português edificado entre 1961 e 1980. Além disso, faz parte dos 30,0% dos edifícios em Portugal que são arrendados e dos 88,8% que pertencem a particulares ou empresas privadas (INE, 2024b).

Visita ao local

A Casa nº 4 (Figura 1) é uma moradia de tipologia T1, com área útil de pavimento de 28,96m², com a fachada principal virada a Nordeste. Não dispõe de sistemas de aquecimento nem de arrefecimento. As necessidades de produção de AQS são satisfeitas através de um termoacumulador elétrico. A ventilação processa-se de forma natural através da caixilharia e exaustão através das instalações sanitárias e cozinha. Os vãos envidraçados, pela sua distribuição, permitem efetuar o arrefecimento noturno. A parede exterior virada a Nordeste tem uma espessura total de 30cm de alvenaria de granito com um envidraçado de vidro simples de correr com caixilharia em alumínio e estore de rolo. As restantes paredes, em contacto com os edifícios adjacentes, são em granito à vista com uma espessura expectável de 30cm. A laje de pavimento está em contacto com o solo e tem revestimento cerâmico. A cobertura é inclinada sem isolamento térmico e tem uma claraboia com vidro duplo sem proteção solar e com caixilharia em madeira.

Figura 1- Casa nº 4 (à esquerda) e Casa nº 13 (à direita)

A Casa nº 13 (Figura 1) é uma moradia de tipologia T2, com área útil de pavimento de 24,97m², com quatro fachadas, e com aberturas a Norte e Poente. A instalação sanitária localiza-se fora do alojamento. Não dispõe de sistemas de aquecimento nem de arrefecimento. As necessidades de produção de AQS são satisfeitas com um termoacumulador elétrico. A ventilação processa-se de forma natural através dos caixilhos e do exaustor da cozinha. Os vãos envidraçados, pela sua distribuição, permitem efetuar o arrefecimento noturno. As paredes exteriores têm uma espessura total de 17cm de alvenaria de tijolo não isoladas, envidraçados de vidro simples sem proteção solar e caixilharia de abrir em alumínio. O pavimento exterior possui uma parte em laje de betão acima do solo e outra situa-se por cima de espaço não útil. A cobertura é inclinada sem isolamento térmico.

Foi ainda feito um pequeno inquérito que permitisse aferir se estes alojamentos se enquadram nos indicadores de PE descritos na ELPPE e no ICOR, Tabelas 1 e 2. Da análise destas tabelas, verifica-se que quase todos os indicadores de pobreza energética são verificados nas duas casas analisadas.

Tabela 1 – Indicadores principais para aferir a pobreza energética em Portugal- ELPPE

Indicador	Casa nº4	Casa nº13
População a viver em habitações sem capacidade para manter a casa adequadamente aquecida	x	x
População a viver em habitações não confortavelmente frescas durante o Verão		x
População a viver em habitações com problemas de infiltrações, humidade ou elementos apodrecidos	x	x
Agregados familiares cuja despesa com energia representa +10% do total de rendimentos	-	-
Fração de edifícios de habitação com classe energética C ou inferior	**F**	**F**

Tabela 2 – Proporção da população que vive em alojamentos com problemas relacionados com instalações sanitárias e qualidade das estruturas físicas- ICOR

Indicador	Casa nº4	Casa nº13
Teto que deixa passar água, humidade nas paredes ou apodrecimento das janelas ou soalho	x	x
Luz natural insuficiente num dia de sol	x	
Sem banheira, duche e retrete no interior do alojamento		x
Com pelo menos um dos problemas	x	x

Resultados dos inquéritos aos intervenientes

Proprietário:

O proprietário acredita que o isolamento térmico da cobertura inclinada e o isolamento das paredes exteriores com um sistema ETICS são medidas a considerar. No entanto, o isolamento das paredes em contacto com os edifícios adjacentes, que teria de ser colocado pelo interior, não é uma solução viável, pois reduziria a área útil da habitação e cobriria a alvenaria de granito exposta. Não considera válida a opção de bomba de calor para AQS, pelo custo e pelo espaço que ocupa. Também é contrário à colocação de um ar condicionado por motivos estéticos, já que a unidade externa teria de ser instalada na fachada principal, e por associar o ar condicionado a problemas respiratórios. Considera a instalação de um sistema de painéis fotovoltaicos para produção de eletricidade, mas apenas se existir financiamento estatal para cobrir as despesas. Sobre a cronologia das intervenções, irá analisar as especificidades de cada inquilino.

Habitantes da Casa nº4:

Vivem duas pessoas neste alojamento, uma reformada e outra empregada, ambas com idade superior a 60 anos. Na habitação é usado um sistema de aquecimento portátil. Os residentes veem como prioritário resolver o problema do aquecimento no Inverno, referindo também os problemas de humidade e bolores nas paredes e tetos. Não têm opinião sobre a instalação dos equipamentos, mas preferem manter as paredes em contacto com os edifícios adjacentes com o granito à vista. Preferem que as obras se realizem de uma só vez.

Habitante da Casa nº 13:

A residente da casa n.º 13 tem 66 anos e encontra-se desempregada. Não tem nenhum sistema de aquecimento pelos custos que lhe estão associados. Refere como maior problema, a humidade e bolor nas paredes e tetos, bem como o aquecimento no Inverno e o arrefecimento no Verão. Gostaria que as obras se realizassem por etapas e de ter instalações sanitárias dentro da habitação.

Avaliação do estado dos edifícios

Foi feito o levantamento de anomalias e avaliado o desempenho energético. Em consequência, identificaram-se medidas corretivas e de melhoria das habitações. Esta avaliação teve por base a metodologia definida no Manual SCE referente à aplicação do Decreto-Lei nº101-D/2020 de 7 de dezembro. A Tabela 3 apresenta as principais características das habitações em termos de necessidades energéticas.

Tabela 3 – Parâmetros iniciais das habitações

Parâmetro	Casa nº4	Casa nº13
Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (kWh/m².ano)	**221,58**	**363,24**
Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m².ano)	**10,92**	**10,29**
Energia útil para preparação de água quente sanitária (kWh/ano)	**1 189**	**1 783**
Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kWhep/m².ano)	**712,08**	**1167,36**
Emissões de CO2 estimadas devido ao consumo de energia (t/ano)	**2,97**	**4,20**
Certificado Energético	F	F

Definição da estratégia de renovação

O objetivo da estratégia de renovação é identificar oportunidades para melhorar a eficiência energética, aumentar o conforto térmico e melhorar a qualidade do ambiente interior dos espaços. Isso será feito através da utilização de soluções construtivas de reabilitação ou renovação e da substituição de equipamentos por modelos mais eficientes, seguindo as orientações da ELPPE.

Dado o baixo desempenho energético do edifício e a sua má qualidade ambiental interior, com a presença de bolor e humidade, a sua renovação energética é essencial para melhorar as condições de conforto interior e reduzir os gastos energéticos. Neste estudo, propõe-se intervir no edifício através de medidas correntes utilizadas em Portugal, destinadas a aumentar o nível de isolamento da envolvente, a corrigir pontes térmicas, a utilizar fontes de energia renovável para a preparação de AQS, quando tecnicamente possível, e considerar um sistema de salamandra a pelllets para aquecimento, como alternativa a um sistema AVAC, que o proprietário não quer como solução. As medidas preconizadas para a reabilitação cumprem com os requisitos mínimos de desempenho energético exigido pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020. A estratégia de renovação considerou as necessidades urgentes dos ocupantes, as preferências do proprietário e dos inquilinos em relação às medidas de renovação, juntamente com o cronograma para futuras obras. Para priorizar as medidas, avaliou-se os ganhos e perdas de calor das habitações com base no certificado energético. Constatou-se que as perdas de calor no inverno são 250% piores que a referência, enquanto os ganhos de calor no verão

aumentam 21%. Os elementos estruturais mais afetados são a envolvente opaca, paredes e cobertura, com 82% de perdas e 62% de ganhos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram elaboradas diversas simulações para determinar as necessidades energéticas das habitações. Foi tido em conta o princípio da menor intervenção possível que possibilitasse subir a classe energética de forma progressiva, de acordo com as metas europeias para a descarbonização do edificado até 2050, se tecnicamente e financeiramente possíveis.

Consideraram-se as seguintes medidas comuns às duas casas:

1. Isolamento térmico da cobertura inclinada com 10 cm de lã de rocha;
2. Instalação de lâmpadas LED;
3. Instalação de sistemas de ventilação eficientes nas casas de banho e exaustão nas cozinhas;
4. Isolamento térmico das paredes exteriores com um sistema ETICS com 8 cm de XPS;
5. Substituição dos vãos envidraçados por outros com caixilhos em PVC, de classe energética A;
6. Substituição da porta;
7. Substituição dos chuveiros ou sistemas de duche por novos de elevada eficiência hídrica;
8. Sistema de aquecimento a biomassa, salamandra a pellets.

Medidas específicas consideradas para a casa nº4,

9. Isolamento das paredes em contacto com edifícios adjacentes, com a aplicação de 8 cm de lã de rocha e placa de gesso pelo interior;
10. Substituição do sistema de AQS por um termoacumulador novo.

Medidas específicas consideradas para a casa nº13,

11. Isolamento do pavimento exterior, utilizando 8 cm de XPS;
12. Instalação de um kit solar térmico para AQS na face sul do telhado.

Tabela 4 – Medidas de renovação na Casa nº4

Medidas de renovação energética	**SCE**	**iBRoad2EPC**				**Proprietário**
	Existente	ASAP	2030	2040	2050	
Isolamento térmico da cobertura Inclinada		x				x
Instalação de iluminação LED		x				
Instalação de sistema de ventilação eficiente		x				x
Isolamento térmico paredes exteriores			x			x
Termoacumulador elétrico	x		x			x
Isolamento térmico paredes em contato com edifícios adjacentes			x			
Substituição dos vãos envidraçados				x		x
Substituição da porta				x		x

Medidas de renovação energética	SCE	iBRoad2EPC				Proprietário
Substituição de chuveiros ou sistemas de duche a				x		x
Salamandra a pellets					x	
Radiadores elétricos						x
Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kWhep/m².ano)	712,08	625,55	428,05	387,27	118,32	504,52
Emissões de CO2 estimadas devido ao consumo de energia (t/ano)	2,97	2,61	1,79	1,62	0,49	2,10
RN_t	2,80	2,39	1,72	1,65	0,70	2,05
Certificado Energético	F	E	D	D	B	E
Custos totais (euros)		1821	2238	2409	2994	4917
Poupanças energéticas %		12	39	45	83	29

Tabela 5 – Medidas de renovação na Casa nº13

Medidas de renovação energética	SCE	iBRoad2EPC				Proprietário
	Existente	ASAP	2030	2040	2050	
Isolamento térmico na cobertura inclinada		x				x
Instalação de iluminação LED		x				
Instalação de sistema de ventilação		x				x
Isolamento térmico paredes exteriores			x			x
Termoacumulador elétrico	x					x
Isolamento térmico pavimento exterior				x		x
Substituição dos vãos envidraçados					x	x
Substituição de chuveiros ou sistemas de duche			x			x
Salamandra a pellets				x		
Radiadores elétricos						x
Kit solar térmico					x	
Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kWhep/m².ano)	1178,89	1039,01	714,02	238,35	59,41	462,48
Emissões de CO2 estimadas devido ao consumo de energia (t/ano)	4,24	3,74	2,52	0,86	0,21	1,66
RN_t	2,47	2,37	1,63	0,78	0,20	1,29
Certificado Energético	F	E	D	B -	A+	C
Custos totais (euros)		2539	5054	3806	5450	10 324
Poupanças energéticas %		12	39	79	95	60

A análise dos resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5 revela que medidas de isolamento da envolvente opaca, por si só, não são suficientes para alcançar um nível energético superior a C. É necessária a introdução de um sistema de aquecimento a biomassa para garantir o conforto térmico destas habitações. Indica também, que a solução de uso de sistemas de energia renovável para autoconsumo com eletricidade produzida no local nem sempre é possível. Alternativas, como a partilha de energia por parte das comunidades energéticas, podem ser uma das soluções para assegurar o fornecimento de energia às famílias mais vulneráveis. O estudo também mostra que os custos associados a uma reabilitação energética que promova uma classe de eficiência mais alta podem ser incomportáveis para os inquilinos e não constituir uma prioridade de investimento para os senhorios.

Criação do Passaporte de Renovação do Edifício

Casa nº4

Etapa 1 - ASAP: nesta etapa foi considerado como prioritário resolver os problemas de humidade e bolor da habitação, com a instalação de um sistema de ventilação mecânico para a casa de banho e outro para a cozinha. Optou-se pelo isolamento térmico da cobertura, por ser um elemento construtivo que apresenta grandes perdas de calor no inverno e grandes ganhos de calor no verão. Acrescentou-se a substituição das lâmpadas incandescentes por novas em LED de alta eficiência. Nesta fase, seria possível subir a classe energética de F para E e alcançar uma economia de energia de 12% em comparação com a situação atual.

- Preparativos para as etapas posteriores: preparar a cobertura para a colocação de uma salamandra a pellets.

Etapa 2 - 2030: nesta etapa preconiza-se o isolamento das paredes exteriores e parte das paredes em contato com os edifícios adjacentes, satisfazendo a vontade dos ocupantes e do proprietário de manter a sala com o granito à vista. O termoacumulador seria substituído por um novo modelo mais eficiente. Estas medidas permitiriam subir mais um nível energético, D, e atingir uma poupança energética de 39%.

- Preparativos para as etapas posteriores: preparar as paredes exteriores para a substituição dos vãos envidraçados e da porta e, preparar as paredes interiores para a instalação da tubagem do novo equipamento de AQS.

Etapa 3 - 2040: as medidas nesta fase seriam as de substituição dos vãos envidraçados existentes por novos de classe energética A e substituição da porta de entrada. É também sugerida a substituição dos sistemas de duche e torneiras com certificação e rotulagem com elevada eficiência hídrica. Apesar de se aumentar a poupança de energia para 45%, a classe energética manteve-se no D**.**

- Preparativos para as etapas posteriores: preparar as paredes exteriores para a substituição dos vãos envidraçados e da porta e, preparar as paredes interiores para a instalação da tubagem do novo equipamento de AQS.

Etapa 4 - 2050: nesta etapa a opção escolhida para a climatização da habitação foi a de uma salamandra a pellets. Este equipamento permitiu subir dois níveis de classe energética, para B**,** e garantir uma poupança de energia de 83% em relação à situação atual. Uma vez que esta habitação a Nordeste não recebe radiação solar direta e o *Software* SCE-ER não permite essa configuração, não foi considerado um sistema solar térmico de AQS.

Proprietário: foram analisadas as medidas que o proprietário está disposto a implementar na reabilitação da habitação. O pacote incluiria isolamento térmico da envolvente opaca, exceto das paredes em contacto com edifícios adjacentes por falta de espaço. Considera substituir vãos envidraçados por outros de classe de eficiência A, além de torneiras e sistemas de duche por opções de alta eficiência hídrica. Para climatização, pondera radiadores elétricos e, para AQS, um termoacumulador elétrico. Neste cenário, a redução das necessidades de energia útil, permitem uma poupança de 29% e atinge-se a classe energética E.

Casa nº 13

Etapa 1 - ASAP: nesta etapa foram consideradas as mesmas medidas da etapa ASAP para a Casa nº4. Assim, seria possível, de igual modo, subir a classe energética para E e alcançar a mesma economia de energia de 12%.

Etapa 2 - 2030: nesta etapa opta-se pelo isolamento térmico da envolvente opaca, que neste caso corresponde a quatro fachadas expostas. O sistema de duche e restantes torneiras seriam substituídos por outros de elevada eficiência hídrica. Estas medidas permitiriam subir mais um nível energético, D, e atingir uma poupança energética de 39%.

Etapa 3 - 2040: nesta fase seria isolado termicamente o pavimento exterior e para climatização da habitação seria colocada uma salamandra a pellets. Com estas medidas aumenta a poupança de energia para 79% e a classe energética passa a B-.

Etapa 4 - 2050: a última etapa prevê a substituição dos vãos envidraçados por outros de classe energética mais eficiente**.** A exposição solar da cobertura inclinada desta habitação, Norte/Sul, possibilita a utilização de um kit solar térmico para suprir as necessidades de energia para AQS. Atinge-se, desta maneira a classe energética A+ com uma poupança em relação às necessidades de energia útil existentes, de 93%.

Proprietário: o proprietário para a reabilitação desta habitação considera as mesmas medidas da casa nº 4. Neste cenário, tendo em conta as características construtivas desta habitação, atingir-se-ia a classe energética C o que corresponde a uma poupança de energia de 60%.

5 CONCLUSÕES

A reabilitação de habitações associadas a pobreza energética pode trazer múltiplos benefícios para os ocupantes, como a melhoria da qualidade do ambiente interior e do bem-estar pessoal, assim como menores custos com cuidados de saúde, aumento dos níveis de escolaridade, desenvolvimento económico e descarbonização, contribuindo para a resiliência e a atenuação das alterações climáticas. Para reduzir a pobreza energética, é importante investir em edifícios mais eficientes em termos de energia e usar energias renováveis para suprir as necessidades energéticas, resultando em maior conforto, saúde e economia nas despesas com energia.

Neste estudo, propõe-se a implementação gradual de medidas para melhorar a eficiência energética, com o intuito de elevar os padrões de classificação energética. O objetivo é identificar oportunidades para otimizar o uso de energia, melhorar o conforto térmico e garantir uma melhor qualidade do ar dentro das habitações. Além disso, oferece-se uma análise comparativa entre as etapas propostas e as soluções desejadas pelo proprietário, para auxiliar na tomada de decisões informadas sobre as medidas de reabilitação possíveis. Dentro desse contexto, o PRE pode servir como uma ferramenta fácil de entender, utilizando uma linguagem simples indicando como, quando e de que modo as medidas de reabilitação das suas habitações podem chegar aos níveis pretendidos. Pode constituir uma abordagem voltada para o futuro, que considera de forma adequada as necessidades presentes

e futuras dos habitantes que vivem em contextos mais vulneráveis garantindo uma transição energética e climática mais justa e democrática.

REFERÊNCIAS

Boardman, B. (2009). *Fixing Fuel Poverty: Challenges and Solutions* (1st edition). Routledge.

Bouzarovski, S. (2014). Energy poverty in the European Union: Landscapes of vulnerability. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, *3*. https://doi.org/10.1002/wene.89

ELPPE. (2024, janeiro 8). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/11-2024-836222486

Fritz, S., Pehnt, M., & Mellwig, P. (2019). *Planned staged deep renovations as the main driver for a decarbonised European building stock*. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2019/7-make-buildings-policies-great-again/planned-staged-deep-renovations-as-the-main-driver-for-a-decarbonised-european-building-stock/

Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A. (2024). https://www.geradordeprecos.info/

Gouveia, J. P., & Barbosa, R. (2022). Multidimensional Perspectives for Energy Poverty Sustainable Mitigation. *Sustainability*, *14*(15), Artigo 15. https://doi.org/10.3390/su14159181

Halkos, G. E., & Gkampoura, E.-C. (2021). Coping with energy poverty: Measurements, drivers, impacts, and solutions. *Energies*, *14*(10). Scopus. https://doi.org/10.3390/en14102807

iBRoad2EPC. (2023). *Horizon 2020 iBRoad2EPC Project*. https://ibroad2epc.eu/our-work/

INE. (2024a). https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_pesquisa&frm_accao=PESQUISAR&frm_show_page_num=1&frm_modo_pesquisa=PESQUISA_SIMPLES&frm_texto=inqu%C3%A9rito+%C3%A0s+condi%C3%A7%C3%B5es+de+vida+e+rendimento&frm_modo_texto=MODO_TEXTO_ALL&frm_data_ini=&frm_data_fim=&frm_tema=QUALQUER_TEMA&frm_area=o_ine_area_Destaques&xlang=pt

INE. (2024b). *O Parque Habitacional: Análise e Evolução 2011 a 2021*. INE. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=663431830&DESTAQUESmodo=2

Lu, S., & Ren, J. (2023). A comprehensive review on energy poverty: Definition, measurement, socioeconomic impact and its alleviation for carbon neutrality. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-023-04143-7

Österbring, M., Camarasa, C., Nägeli, C., Thuvander, L., & Wallbaum, H. (2019). Prioritizing deep renovation for housing portfolios. *Energy and Buildings*, *202*, 109361. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109361

Statistics | Eurostat. (2023). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ILC_MDES01__custom_6620447/bookmark/bar?lang=en&bookmarkId=725a0ba3-0c7d-4d8d-b0b6-a499ee968a90

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

SOLUÇÕES PARA PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DO RADÃO EM EDIFÍCIOS

Luís Pimentel Real[ae]; João Viegas[a]; Jorge Patrício[a], Alcides Pereira[b], José Costa[c], Pilar Linares- Alemparte[d]

[a]Laboratório Nacional de Engenharia Civi (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

[b]Univ Coimbra, IDL, Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal

[c]Univ Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

[d]Instituto de las Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Serrano Galvache, 4, Madrid 28033, Espanha

[e]autor correspondente: lpimentel@lnec.pt

RESUMO

O radão (Rn) é a maior fonte natural de radiação ionizante e a exposição a níveis elevados deste gás, durante períodos prolongados, pode tornar-se um problema de saúde pública.

O radão pode entrar nos edifícios, por convecção através de fissuras na envolvente ou por difusão através da própria envolvente quando esta é porosa, e atingir concentrações acima dos níveis de referência recomendados.

O objetivo desta comunicação é apresentar os fatores que mais influenciam o potencial do gás radão nos edifícios e indicar as principais soluções tecnológicas para controlar, reduzir e mitigar os seus efeitos.

Assim, são apresentados cálculos evidenciando que um adequado dimensionamento de membranas e de sistemas de ventilação permitem assegurar a qualidade do ar interior, qualquer que seja o nível de radão existente nos edifícios.

As conclusões permitem destacar a importância das tecnologias de ventilação nos sistemas de redução do radão, bem como a sua eficácia, quer para impedir a entrada do gás radão quer para diminuir a sua concentração após entrada no edifício.

Destaca-se ainda a capacidade das barreiras de proteção para isolamentos da envolvente do edificado, desde que devidamente dimensionadas com as características mecânicas apropriadas, com especial foco nos requisitos da instalação.

Por fim, referem-se os principais desenvolvimentos futuros, visando assegurar uma maior sustentabilidade dos materiais, produtos e sistemas de proteção utilizados.

Palavras-chave: Edifícios, Radão, Prevenção, Mitigação, Ar interior

1 INTRODUÇÃO

O problema do radão tem sido objeto de muitos estudos de investigação e intervenções em todo o mundo (Khan *et al.* 2019). A fim de minimizar esse problema, existem publicações dedicadas a vários sistemas de mitigação, como barreiras de proteção (Jiránek n/d), ventilação por baixo do piso térreo

(Scivyer 2012), pressurização positiva e sistemas de despressurização (Scivyer 2013ab), entre outras soluções. Analogamente, estão também disponíveis na literatura científica estudos de investigação relativos a materiais de construção utilizados em edifícios onde a exposição à radiação ionizante não é negligenciável (Aladeniyi *et al*. 2021), (Baeza *et al.* 2018), (Domingos *et al.* 2021), (Madruga *et al.* 2019), (Mustonen *et al.* 1999), (Pereira *et al.* 2012), (Pereira *et al.* 2013), (Ramadan e Ubeid 2018), (Siegesmund *et al.* 2022). A presença de radão na água foi também objeto de vários estudos (Di Carlo *et al.* 2019), (EPA 2012), (Martins *et al.* 2019).

Embora o problema do radão continue a ser desconhecido de uma larga faixa de população portuguesa, o interesse e preocupação com este gás tem vindo a aumentar nos últimos anos, em virtude uma maior divulgação e consciencialização do perigo e do risco associados à sua acumulação em locais fechados com nível de ocupação elevado, bem como das consequências que pode ter para a saúde das pessoas.

A implementação de regulamentação em Portugal irá estabelecer as medidas de prevenção e de remediação da admissão de radão em edifícios localizados nas zonas de suscetibilidade moderada ou elevada no Mapa de Suscetibilidade ao Radão, que faz parte integrante do Plano Nacional para o Radão [PNR], e contribuirá certamente para minimizar o problema, desde que tal seja acompanhado de disseminação adequada ao público e da realização de ações de formação dirigidas a técnicos de construção, engenheiros, arquitetos, projetistas e responsáveis da administração pública e autárquica.

O âmbito desta comunicação é elencar os fatores que influenciam o nível de radão nos edifícios e apresentar algumas soluções tecnológicas que permitam controlar, reduzir e mitigar, os efeitos do gás radão nos edifícios, destacando a importância das barreiras de proteção e da ventilação para o cumprimento deste objetivo, com enfoque no cumprimento das boas regras de construção durante a instalação dessas soluções, de modo a garantir a proteção das pessoas contra o radão.

2 FATORES INFLUENCIADORES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO

A concentração de radão no interior dos edifícios pode variar em função de diversos fatores, destacando-se como determinante o tipo de solo. Porém, tanto as condições climáticas, como as características do edifício, bem como o seu uso, podem também ser muito relevantes nas alterações de concentração de radão num mesmo edifício e na sua variabilidade entre diferentes edifícios no mesmo local, respetivamente (Linares e Ortega 2020).

Aos solos derivados de rochas graníticas associa-se geralmente maior capacidade de produção de radão. Por outro lado, a permeabilidade do solo determina a facilidade de migração do gás, controlada, nomeadamente, pela porosidade e sua tipologia, pela fissuração, o pelo teor em água.

Dada a maior densidade relativamente ao ar, a concentração de radão é normalmente mais elevada nos espaços localizados junto ao solo (rés do chão, caves e semicaves). Contudo, outros fatores, tais como exalação a partir de materiais de construção existentes, comunicações interiores não seladas (como uma escada contínua entre a cave ou o rés do chão e o topo do edifício, sem patamares ou portas corta-fogo nos patamares, e caixas de elevador), que permitem a ascensão do gás por efeito de chaminé (quando a temperatura interior é superior à exterior) e podem levar à sua acumulação, se não houver adequada ventilação.

A localização do edifício e a direção dos ventos dominantes também influencia o nível de radão nos edifícios. Há casos em que as pressões geradas pelo vento tanto podem promover o transporte do gás através do solo (se este for permeável) para o interior das caves, como, por outro lado, e na maioria

dos casos, diluir e escoar o radão para o exterior (devido ao aumento de ventilação originado pela associação de pressões positivas nas fachadas de barlavento e de pressões mais baixas nas restantes fachadas).

O tipo de fundações também constitui um fator relevante, considerando-se que a existência de caixas de ar ventiladas reduz o caudal de radão que entra na zona habitável do edifício.

A permeabilidade ao ar dos pavimentos do edifício, em particular junto ao solo, tem grande influência no fluxo de gás radão do solo para interior dos espaços edificados.

O tipo de paredes de caves parcial ou totalmente enterradas, e a sua permeabilidade, também influenciam a entrada de radão.

A transferência para o interior dos edifícios é obviamente maior na inexistência de barreiras de proteção, com a fissuração (em conjugação com a humidade) e com a porosidade dos materiais constituintes (rocha do local, tijolo, pedra, argamassas) dos pavimentos e tetos.

O tipo de pavimentos intermédios, que separam as caves do pavimento imediatamente sobrejacente e seguintes, é tão importante quanto maior for a concentração de radão nos pisos inferiores, sendo que o caso mais desfavorável é o constituído por pavimentos de madeira (ou seus derivados), que apresentam juntas entre as tábuas, ou tetos falsos não completamente estanques (Real *et al.* 2020a). Em contrapartida, as lajes de betão armado monolíticas ou aligeiradas, ou lajes aligeiradas com elementos pré-fabricados (por exemplo, vigas e abóbadas) são as que apresentam menor permeabilidade ao radão, desde que se assegure a existência de juntas devidamente seladas, resultantes do atravessamento da laje por várias tubagens, e a inexistência de fissuração dos materiais constituintes do pavimento (Real *et al.* 2020a).

Também as aberturas entre as caves e os pisos superiores desempenham um papel importante no transporte do radão, caso sejam insuficientemente herméticas (Real *et al.* 2020a). As portas com classe de permeabilidade ao ar C ou D, de acordo com a norma EN 12207, são adequadas do ponto de vista da estanquidade ao ar (Linares e Ortega 2020), contribuindo para a redução da concentração do radão.

Em qualquer caso, sejam fundações, paredes ou pavimentos, deve optar-se pela utilização de materiais de construção com menor exalação de radão, e mais sustentáveis, cumprindo os requisitos de resistência mecânica e estrutural apropriada.

3 PRINCIPAIS SOLUÇÕES DE MITIGAÇÃO

3.1 MEMBRANAS

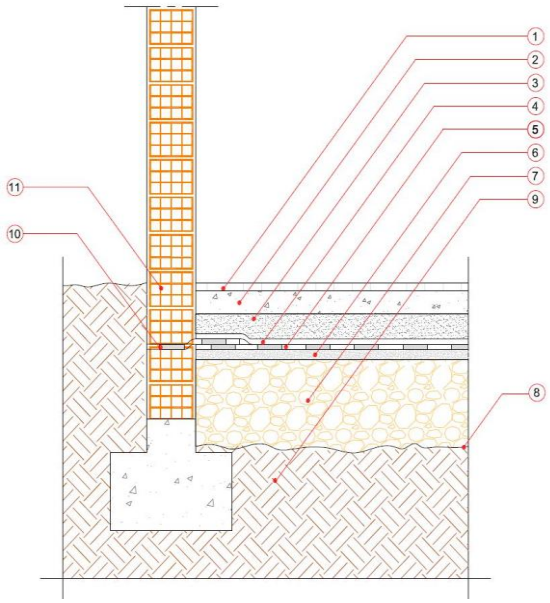
Uma barreira ou membrana de proteção consiste num elemento laminar em material plástico flexível ou compósito, contínuo, colocado entre o espaço a proteger e o solo, e cuja eficácia possa ser evidenciada. Estas membranas podem também contribuir como uma barreira contra a ascensão capilar da água subterrânea (Real *et al.* 2020ab).

Os requisitos mais importantes para garantir a eficácia e a durabilidade das membranas são os seguintes:

- Instalação com qualidade em continuidade, sem fendas, com juntas e encontros selados, recorrendo a componentes pré-formados ou produtos compatíveis, em particular nas situações de atravessamento por tubagem, colunas e pilares (Real *et al.* 2020ab), (Linares e Ortega 2020).
- Aplicação com garantia de resistência adequada ao seu uso.

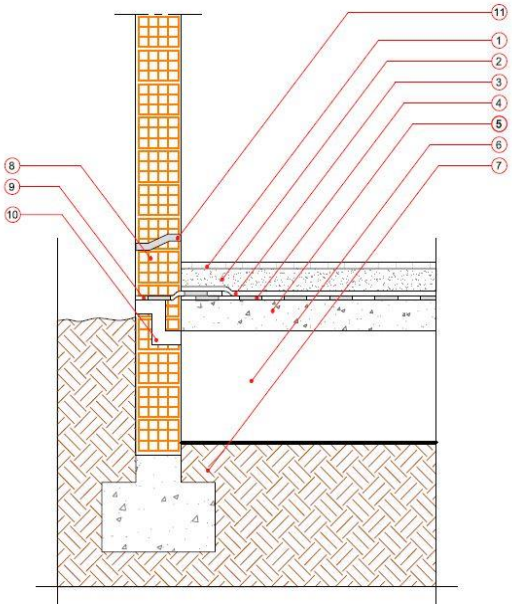
— Com especificação técnica que inclua um conjunto de características de desempenho, suportada com documentação emitida por entidades qualificadas, incluindo resultados de ensaios essenciais (coeficiente de difusão ao radão, características dimensionais, classificação de reação ao fogo, transmissão de vapor de água, propriedades em tração, resistência ao rasgamento e conteúdo, emissão e/ou libertação de substâncias perigosas), entre outras características específicas do tipo de materiais constituintes das membranas.
— Durabilidade adequada à vida útil do edifício, não devendo ser inferior a 25 anos.

Seguidamente apresentam-se ilustrações típicas exemplificativas da instalação de membranas por baixo e sobre a laje de soleira, figuras 1 e 2, respetivamente. A instalação representada na figura 1 é típica da instalação em edifícios novos, enquanto a figura 2 é mais representativa de instalação em edifícios existentes, por cima de caves enterradas (com abertura periscópica para ventilação). Outros exemplos seriam possíveis, tais como instalações sobre caixa de ar, sobre pisos suspensos, complementados ou não com colocação de membranas nas paredes exteriores ou interiores.



1. Novo revestimento de piso
2. Pavimento de betão
3. Betonilha regularizada
4. Camada de dessolidarização
5. Membrana de proteção ao radão
6. Camada de betão de limpeza (eventual)
7. Enrocamento
8. Geotêxtil
9. Terreno
10. Banda de proteção ao radão (caso seja possível)
11. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)

Figura 1 – Membrana sob a laje aplicada sobre o terreno (edifícios novos)



1. Novo revestimento de piso
2. Betonilha regularizada
3. Camada de dessolidarização
4. Membrana de proteção ao radão
5. Pavimento de betão
6. Cave enterrada
7. Terreno
8. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
9. Banda de proteção ao radão através da parede (se possível)
10. Abertura de ventilação (ventilação de ar)
11. Membrana de impermeabilização com eventual perfil metálico de drenagem

Figura 2 – Membrana sobre a laje aplicada por cima de uma cave enterrada ou semienterrada

3.1.1 Metodologia para o dimensionamento da membrana de proteção ao radão

A membrana deve ter uma espessura e coeficiente de difusão tais que o fluxo de radão na sua superfície (E) seja menor que um dado valor limite (E_{lim}). Este expressa-se em Bq/m^2.h e é determinado pela seguinte expressão (DBHS6 2019):

$$E_{lim} = C_d \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

em que:

C_d é a concentração de projeto, que corresponde a 10% do nível de referência ($[Rn]_{ref}$=300 Bq/m^3);

Q é o caudal de ventilação das instalações a serem protegidas (m^3/h), o qual depende do volume do espaço e da taxa de renovação de ar. Caso o valor da taxa de ventilação não seja definido em função do tipo de compartimentos (quartos, cozinha, WC) ou seja desconhecido, pode ser considerado um cálculo de caudal minimalista correspondente a 0,1 renovações/hora;

$A = V/h$, é a área superficial da membrana (m^2), equivalente à área do espaço a proteger, V o volume e h a altura.

Na ausência de estudos específicos, o fluxo de radão previsto através da barreira (E)pode ser estimado a partir da seguinte expressão (DBHS6 2019):

$$E = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot \lambda \cdot l}{\sinh \frac{d}{l}} \quad (2)$$

em que:

λ é a constante de decaimento/desintegração do radão (7,56 x 10^3 h^{-1}];

sinh é o seno hiperbólico;

d é a espessura da barreira, em m;

l é a dimensão linear da penetração do radão na barreira, em m, calculado de acordo com a equação (3) (DBHS6 2019):

$$l = \sqrt{\frac{3600 \cdot D}{\lambda}} \quad (3)$$

em que D é o coeficiente de difusão da barreira ao radão (em m^2/s).

3.1.2 Resultados do dimensionamento da membrana de proteção ao radão

No Quadro 1 apresentam-se resultados típicos de cálculo de dimensionamento de membranas, nos casos em que não há conhecimento do fluxo de radão do solo, determinando-se a espessura d em função do coeficiente de difusão da membrana D para respeitar a condição ($E < E_{lim}$). Como se pode confirmar através do Quadro 1, à medida que se aumenta o coeficiente de difusão ao radão (D) das membranas, também se tem de aumentar a espessura para garantir um resultado satisfatório. Assim, para um valor máximo de D = 1 x 10^{-11} m^2/s tem de se garantir uma espessura mínima de 1,3 mm, enquanto para um valor máximo de D = 1 x 10^{-12} m^2/s basta uma membrana com espessura de 140 µm.

Quadro 1 – Resultados obtidos para um compartimento com 100 m^2 de superfície e 2,7 m de altura, desconhecendo-se a exalação de radão no solo

C_d	30						
Q	27						
E_{lim}	**8,1**						
D	1×10^{-10}	1×10^{-11}	1×10^{-11}	1×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-13}	1×10^{-13}
l	0,00690	0,00218	0,00218	0,00069	0,00069	0,00022	0,00022
d	$\mathbf{9 \times 10^{-3}}$	$\mathbf{1,3 \times 10^{-3}}$	$\mathbf{1,2 \times 10^{-3}}$	$\mathbf{1,4 \times 10^{-4}}$	$\mathbf{1,3 \times 10^{-4}}$	$\mathbf{1,4 \times 10^{-5}}$	$\mathbf{1,3 \times 10^{-5}}$
E	**9,2**	**7,8**	**8,6**	**7,7**	**8,3**	**7,7**	**8,3**
$E < E_{lim}$	Não conforme	Conforme	Não conforme	Conforme	Não conforme	Conforme	Não conforme

3.2 VENTILAÇÃO

Com exceção das membranas, todos os sistemas de prevenção e mitigação do radão em edifícios recorrem a tecnologias de ventilação passiva (natural) ou ativa (mecânica), designadamente nos espaços de contenção, nos sistemas de despressurização do subsolo e com ventilação dos espaços habitáveis. Todos estes sistemas podem, no entanto, ser complementados com a instalação de membranas de forma a aumentar a eficácia global na proteção ao radão, em particular quando o nível de gás é elevado.

3.2.1 Espaço de contenção ventilado

Os espaços de contenção ventilados, tais como uma caixa de ar sob o pavimento (desvão sanitário) ou no interior de paredes duplas, ou uma cave raramente utilizada, podem ser utilizados para diluir, por meio da ventilação, o radão que preenche este espaço, dificultando o escoamento deste gás para as divisões habitáveis do edifício, funcionando assim como um espaço de contenção do radão. Estas soluções são aplicáveis a edifícios novos e a edifícios existentes (Linares e Ortega 2020), (Real *et al*. 2023).

3.2.2 Sistema de despressurização do subsolo

Uma das técnicas de proteção mais eficazes para reduzir o fluxo de radão nos edifícios é a despressurização do subsolo, que consiste num único reservatório subterrâneo ou em vários reservatórios, nos quais são inseridos tubos de exaustão destinados a aspirar o ar contaminado de radão existente no solo, descarregando-o inofensivamente na atmosfera (Real *et al*. 2020ab), (Scivyer 2013b]. A extração pode ser passiva, com base no efeito chaminé e na ação do vento, ou ativa, com a utilização de um ventilador elétrico.

Para uma melhor eficácia ótima, a permeabilidade do substrato em contacto com o edifício (camada de enchimento) deve ser elevada e a permeabilidade ao ar do espaço em relação ao solo deve ser baixa, pelo que o sistema idealmente deve ser complementado com recurso a membranas.

Os sistemas de drenagem de água podem ser utilizados de forma similar e com praticamente o mesmo nível de eficiência (Real *et al*. 2020ab), quer colocando uma conduta de ventilação inserida num tanque de recolha e bombagem de águas pluviais do solo, instalado na cave, quer usando condutas de

drenagem perfuradas, instaladas sob os pisos térreos, para escoamento de água; em ambos os casos recorrendo a um sistema de ventilação constituído por condutas de ventilação e de exaustão.

3.2.3 Ventilação em espaços habitáveis

A ventilação é necessária para assegurar a qualidade do ar interior dos espaços habitáveis e reduz a concentração de radão, devendo ser tanto maior quanto maior for o grau de ocupação, ou seja, deverá ser devidamente proporcional ao número de ocupantes tendo em conta o volume do espaço a ventilar.

Em edifícios novos, as taxas de ventilação têm de cumprir os regulamentos relativos à QAI (qualidade do ar Interior), que normalmente especificam taxas de ventilação mínimas em função da utilização do espaço ou do edifício, devendo assegurar-se um equilíbrio com os regulamentos de conservação de energia (Linares e Ortega 2020). Para edifícios novos de habitação, o regulamento português estipula um valor mínimo de ventilação natural correspondente a 0,5 renovações de ar por hora (RPH) (Portaria n.º 138-I/2021).

Na Figura 3 ilustra-se o efeito da ventilação para garantir que a concentração de radão no ar interior de um espaço habitado de um edifício, situado numa zona de risco e com o piso térreo em contacto direto com o solo, não excede um limite de referência considerado seguro ($[Rn]_{ref}$=300 Bq/m^3). A simulação baseia-se na equação diferencial transiente para a concentração de radão, cuja solução traduz a sua evolução temporal $C(t)$ num volume de controlo, em Bq/m^3:

$$C(t) = C_{equil} + \left(C_0 - C_{equil}\right) \cdot e^{-(\lambda+n)t} \quad (4)$$

onde C_{equil} é a concentração de equilíbrio em regime permanente (*i.e.*, quando $t \rightarrow \infty$), em Bq/m^3, dada por:

$$C_{equil} = \frac{E \cdot A}{(\lambda+n)V} \quad (5)$$

C_0 é a concentração inicial (t=0) de radão no ar interior, V (m^3) é o volume efetivo do espaço em estudo, n (h^{-1} ou RPH) é a taxa de renovação de ar, a que corresponde um caudal de ventilação $Q=n \cdot V$ (m^3/h), e os restantes parâmetros estão definidos na figura. O fluxo E [Bq/(m^2.h)] é vulgarmente designado por taxa de exalação e o produto $G=E \cdot A$ (Bq/h) por taxa de geração de radão. Deve ter-se em conta que a dedução da equação diferencial de base, bem com a sua solução [Eqs. (4) e (5)] assentam nos seguintes pressupostos de simplificação: (*i*) o caudal de ventilação e a taxa de geração de radão são constantes no tempo; (*ii*) a diluição do poluente é perfeita, *i.e.*, a concentração de radão no ar interior é uniforme em todo o espaço em qualquer instante t; e (*iii*) considera-se desprezável a concentração de radão no ar exterior, o que é plausível para este poluente, face aos valores no ar interior nos casos em estudo.

O gráfico da Figura 3 representa o efeito da ventilação num caso de descontaminação (*e.g.*, de uma habitação situada numa zona de risco que tivesse estado desocupada e sem ventilação significativa. Por outro lado, a Eq. (5) é útil para se determinar o valor de projeto do caudal de ventilação necessário; com efeito, tornando-a explícita em n, em h^{-1}, pode escrever-se:

$$n_{min} = \frac{G}{C_{equil} \cdot V} - \lambda \quad (6)$$

No caso apresentado na Figura 3, estipulou-se o objetivo de garantir C_{equil}=250 Bq/m^3, um valor de concentração de radão inferior ao limite de referência ($[Rn]_{ref}$=300 Bq/m^3), representado no gráfico pela linha horizontal a traço interrompido vermelho. Por um lado, esta opção permite ilustrar melhor o efeito de descontaminação; por outro, ela constitui uma margem de segurança adicional, prática aconselhável numa fase de projeto, dada a grande variabilidade real do fluxo de radão proveniente do

solo. Assim, a Eq. (6) permite indicar que, para este caso, com um fluxo de radão de E=60 Bq/(h.m^2), o valor mínimo da taxa de ventilação necessária é n≈0,1 h^{-1} (RPH), o que equivale a um caudal de ventilação de 7,7 m^3/h.

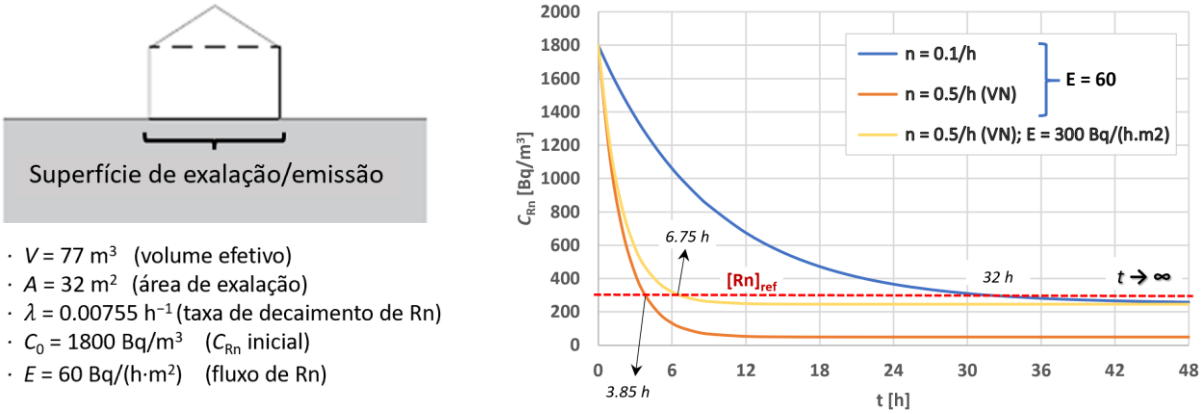


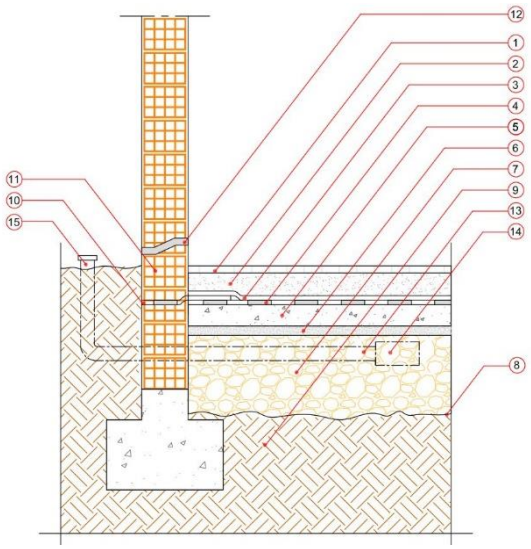
Figura 3 – Exemplo do efeito da ventilação natural (VN) permanente num espaço habitável inicialmente contaminado com radão

Usando a Eq. (4), e observando o gráfico da Figura 3, conclui-se que, neste processo de descontaminação com aquele nível mínimo de ventilação, o limite de referência seria alcançado só ao fim de 32 horas. Porém, se se considerar o requisito regulamentar de ventilação natural (VN) para edifícios novos habitacionais, n=0,5 RPH, o período de descontaminação reduzir-se-ia para apenas 3,85 horas. Conclui-se também que, mesmo numa situação de risco muito elevado, *i.e.*, considerando um fluxo de radão 5 vezes superior, E=300 Bq/(h.m^2), o requisito de ventilação natural acima referido seria suficiente para garantir uma boa QAI neste espaço habitável, em termos de concentrações de radão. O gráfico da figura sugere, ainda, que um processo de ventilação, passiva ou ativa, para prevenção ao radão em edifícios habitacionais deve ser permanente, para garantir a segurança dos ocupantes em termos de saúde humana.

No caso da ventilação mecânica, pode produzir-se uma depressão que favorece a entrada de radão do solo através de fendas e fissuras, pelo que se recomenda-a instalação complementar de membranas e a implementação de ventilação de duplo fluxo (equilibrando o fluxo de extração e o fornecimento de ar) ou o aumento das aberturas de entrada de ar de forma a reduzir a sua perda de carga e, assim, a reduzir a depressão no interior da habitação (Real *et al.* 2020a).

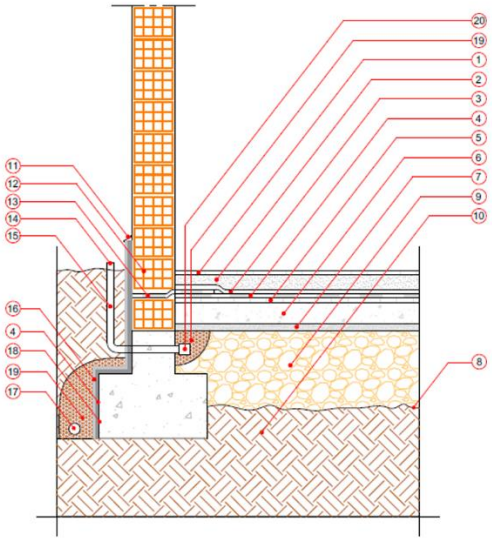
Em certas situações, designadamente em habitações unifamiliares, pode instalar-se um sistema de pressurização positiva (nas habitações multifamiliares a pressurização de uma habitação pode permitir o escoamento de cheiros gerados numa para outra habitação adjacente, que tenha uma pressão mais baixa), o qual consiste em criar uma diferença de pressão entre o ar no interior do edifício e o solo subjacente, de modo a inverter a diferença de pressão natural. Esta diferença é geralmente produzida por uma unidade de ventilação situada no sótão, que é utilizada para insuflar ar fresco filtrado nos compartimentos principais (quartos e salas de estar) do espaço habitável. O aumento da pressão em todo o edifício reduz a possibilidade de admissão de radão e provoca a diluição e a expulsão do gás radão, que, no entanto, entra no edifício, pelo que também se pode considerar como um método de isolamento (Real *et al.* 2020a), (Scivyer 2013b). A eficácia desta solução depende, em grande medida, da permeabilidade ao ar da envolvente do edifício ou da do compartimento a proteger, que deve ser baixa, pelo que se recomenda a sua utilização em combinação com outras soluções, como a impermeabilização com uma barreira contra o radão (Linares e Ortega 2020).

Nas figuras 3 e 4 apresentam-se exemplos típicos de instalação de sistemas de ventilação complementados com membranas.



1. Novo revestimento de piso
2. Betonilha regularizada
3. Camada de dessolidarização
4. Membrana anti radão
5. Pavimento de betão
6. Camada de betão de limpeza (eventual)
7. Enrocamento
8. Geotêxtil
9. Terreno
10. Banda anti radão (caso seja possível)
11. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
12. Membrana à prova de humidade
13. –Tubagem do sistema de despressurização
14. Depósito subterrâneo
15. Terminal tamponado do tubo do sistema de despressurização

Figura 4 – Sistema de despressurização subterrânea com uma membrana aplicada sobre a laje



1. Novo revestimento de piso (ladrilho, pedra, etc.)
2. Betonilha regularizada
3. Camada de dessolidarização
4. Membrana anti radão
5. Revestimento de piso existente (ou primário, caso não exista)
6. Pavimento de betão (laje de soleira)
7. Camada de betão de limpeza (eventual)
8. Geotêxtil
9. Enrocamento
10. Terreno
11. Perfil de remate
12. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
13. Banda anti radão (caso seja possível)
14. Chaminé – para dissipação de vapor (incluindo radão)
15. Ventilação - dissipação de vapor
16. Membrana drenante e dissipadora de vapor (placa pitonada que faz caixa de ar
17. Tubo de drenagem perfurado
18. Primário (eventual)
19. Camada separadora, com brita ou pedra rolada, envolvida em geotêxtil
20. Caixa dissipadora de vapor

Figura 5 – Sistema de drenagem que pode ser adaptado para aspiração de radão com um ventilador mecânico

4 CONCLUSÕES

A utilização de membranas, desde que devidamente dimensionadas em termos de espessura (tendo em conta o respetivo coeficiente de difusão para o radão), permite limitar o fluxo de radão proveniente do solo ou de materiais constituintes das soluções construtivas do edifício (paredes ou pavimentos).

Salienta-se a importância da possível existência de zonas de descontinuidade da membrana (rotura da membrana, juntas entre elementos da membrana, juntas com elementos da construção, etc.), que poderá condicionar este meio de limitação da fonte de radão.

O exemplo de implementação de ventilação em espaços habitados evidencia que a taxa de ventilação mínima regulamentar é suficiente para manter a concentração de radão no ar interior, considerando valores correntes de taxa de exalação de radão de um piso da habitação em contacto direto com o solo, abaixo do limite de referência ($[Rn]_{ref}$=300 Bq/m^3). A duração do período transiente que ocorre, após a ativação da ventilação, até ser atingido o limite de referência, indicia que a ventilação deverá ser permanente.

Esta análise sugere que, em casos em que a concentração de radão no ar interior exceda o limite de referência, poderá ocorrer um problema mais geral de salubridade devido a reduzidas taxas de ventilação. Recomenda-se que a seleção da solução de mitigação da contaminação do ar interior com radão tenha em conta todo o problema de salubridade da habitação, que venha a ser detetado, e que seja adotada a técnica que permita mitigar também o problema de salubridade, nomeadamente a implementação de um sistema de ventilação.

Do que foi exposto anteriormente, torna-se óbvio que a complementaridade das soluções constituídas por membranas de proteção e sistemas de ventilação, permite uma maior eficácia na proteção ao radão, garantindo uma adequada qualidade do ar interior.

5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao nível dos materiais constituintes dos sistemas de proteção ao radão, devem promover-se desenvolvimentos tecnológicos futuros, visando a/o:

- Inclusão de nanomateriais em barreiras ou revestimentos exteriores, que também permitam reter contaminantes.
- Minimização dos componentes radioativos nos materiais de construção, através de novas composições.
- Desenvolvimento de revestimentos líquidos, para impermeabilização de materiais de construção, sustentáveis, eficazes, com resistência adequada e com boa durabilidade
- Estudo de soluções mais eficientes do ponto de vista energético, incluindo a utilização de materiais mais leves e mais eficientes, quer utilizados em ventiladores, quer em sistemas de recuperação de energia.
- Utilização de materiais reciclados (e mais amigos do ambiente) nos sistemas de proteção contra o radão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da União Europeia no âmbito do Projeto LeaRn4LIFE (Grant Agreement nº. 101074516). Os pontos de vista e opiniões expressos são, no entanto, apenas os dos

autores e não refletem necessariamente os da UE ou do CINEA. Nem a União Europeia nem o CINEA podem ser responsabilizados pelos mesmos.

REFERÊNCIAS

Aladeniyi K., Arogunjo A. , Pereira A., Khandaker M., Bradley D., Sulieman A. (2021) Evaluation of radiometric standards of major building materials used in dwellings of South-Western Nigeria. Radiation Physics and Chemistry. 2021. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109021

Baeza, A., García-Paniagua, J., Guillén, J., Montalbán, B. (2018). Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study. Science of the Total Environment 610–611 (2018), pp. 258-266. https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.056

DBHS6 (2019) Documento Básico de Protección frente a la exposición al radón. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Código Técnico de la Edificación. Madrid. 2019

Domingos, F. , Seco, S., Pereira, A. (2021). Thoron and radon exhalation and emanation from granitic rocks outcropping in the Central Iberian Zone (Portugal). Environ Earth Sci 80, 753 (2021). https://doi.org/10.1007/s12665-021-10008-x

Di Carlo, C, Lepore, L, Venoso, G, Ampollini, M, Carpentieri, C, Tannino, A, *et al*., (2019). Radon concentration in self-bottled mineral spring waters as a possible public health issue. Scientific Nature Research Reports. 2019;9:14252, www.nature.com/scientificreports. https://10.1038/s41598-019-50472-x

EPA (2012). A Citizen's Guide to Radon. The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. EPA 402/K-12/002|2016. United States Environmental Protection Agency (EPA), Indoor Environments Division. EP 402/K-12/002. 16 pp. May 2012.

Jiránek, M., (s/d). Testing and design of radon resisting membranes based on the experience of Czeck Republic. Praha. Czeck Technical University, Faculty of Civil Engineering.

Khan, S. , Gomes, J., Krewski, D. (2019). Radon interventions around the globe: A systematic review. Heliyon, Volume 5, Issue 5, May 2019, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737.

Linares-Alemparte, P; García-Ortega, S. (2020). Guía de rehabilitación frente al radón Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Ministerio de Ciencia e Innovación). Gobierno de España. Madrid. 2020. ISBN: 978-84-498-1045-9.

Madruga, M., Miró, C., Reis, M., Silva, L. (2019). Radiation Exposure from Natural Radionuclides in Building Materials. Radiation Protection Dosimetry, Volume 185, Issue 1, November 2019, Pages 49–57, https://doi.org/10.1093/rpd/ncy256

Martins L, Pereira A, Oliveira A, Fernandes A, Sanches Fernandes, L., Pacheco, A.(2019). An assessment of groundwater contamination risk with radon based on clustering and structural models. Water. 2019;11(5):1107, https://doi.org/10.3390/w11051107

Mustonen R., Pennanen M., Annanmäki M. and Oksanen E. (1999). Enhanced Radioactivity of Building Materials,. Final report of the contract No 96-ET-003 for the European Commission. Radiation and Nuclear Safety Authority – STUK, Finland, 1997; Radiation Protection 96, Luxembourg.

Nuccetelli, C., Leonardi, F., Trevisi, R. (2020). Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the European database analysis. Journal of Environmental Radioactivity 225 (2020) 106438, https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106438.

Pereira, D., Neves, L., Pereira, A., Peinado, M., Blanco, J., Tejado, J. (2012). A radiological study of some ornamental stones: the bluish granites from Extremadura (Spain), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 395–401, 2012, https://doi.org/10.5194/nhess-12-395-2012

Pereira, A., Pereira, D., Neves, L., Peinado, M., Armenteros, I. (2013). Radiological data on building stones from a Spanish region: Castilla y León, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 3493–3501, 2013, https://doi.org/10.5194/nhess-13-3493-2013

Portaria n.º 138-I/2021. Diário da República n.º 126/2021, 2º Suplemento, Série I de 2021-07-01, páginas 12 – 53.

Ramadan, A.; Ubeid, F. (2018). Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University), 39 (3), pp. 195-206, 2018.

Real, L., Lopes, J., Viegas, J. (2020a). Guia para mitigação da admissão de radão para o interior de edifícios existentes. Relatório 479/2020 – DED/NAICI, LNEC, Lisboa, 143 pp., 2020.

Real, L., Lopes, J., Viegas, J. (2020b) Guia para prevenção da admissão de radão em edifícios novos. Relatório 480/2020 – DED/NAICI, LNEC, Lisboa, 55 pp., 2020.

Real, L. , Linares-Alemparte, P.; Poças, A.; Viegas, J (2023). Discussion of Techniques to Mitigate Radon Infiltration In Buildings, 15 pp, 2023, https://doi.org/10.1515/eng-2022-0573

Scivyer, C.; Jaggs, M. (1998). A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Dwellings with cellars and basements. 1998. BR 343. ISBN 186081 219 8.

Scivyer, C. (2012). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 1 - Radon solutions in homes: improving underfloor ventilation. Bracknell, IHS BRE Press, 2012. ISBN 978-1 -84806-300-6.

Scivyer, C. (2013a). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 2 - Radon solutions in homes: positive house ventilation". Bracknell, IHS BRE Press, 2013. ISBN 978-1-84806-301-3.

Scivyer, C. (2013b). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 3 - Radon solutions in homes: Radon sump systems. Bracknell, IHS BRE Press, 2013. ISBN 978-1-84806-302-0.

Siegesmund, S., Pereira, A., Sousa, L., Rucker, S., Kallas, L.,Kopka, B., Domingos, F., Seco, S. (2022). Is there any health danger by radioactivity on the use of dimensional stones? Environ. Earth Sci. 81, 383 (2022), https://doi.org/10.1007/s12665-022-10483-w

Tema 6. Gestão da construção

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARATERIZAÇÃO MECÂNICA DE BETONILHAS TRADICIONAIS DOS AÇORES

Luís Miguel Fernandes Teixeira [a], Vidália Maria Cordeiro Miranda [a], André Almeida Santos [a], Lisandra Câmara Miranda [a], João Manuel Correia Pimentel [a].

[a] Laboratório Regional de Engenharia Civil - Rua de São Gonçalo s/n, 9500-343 Ponta Delgada, Açores, Portugal, lrec@azores.gov.pt, luis.mf.teixeira@azores.gov.pt, vidalia.mc.miranda@azores.gov.pt, andre.a.santos@azores.gov.pt, lisandra.c.miranda@azores.gov.pt, joao.mc.pimentel@azores.gov.pt .

RESUMO

O Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (LREC), em colaboração com a empresa Marques S.A., conduziu um estudo sobre a fissuração recorrente em betonilhas de pavimentos na região, um problema persistente apesar das metodologias de fabrico comprovadas em outros lugares. O objetivo era entender como os materiais e o clima locais afetam o comportamento dessas betonilhas e como os materiais de suporte influenciam o surgimento desta anomalia. Foram formulados oito tipos de betonilhas tradicionais, usando cimento Portland e areia prefabricada em diferentes proporções, com e sem fibras de polipropileno. Foram fabricados provetes de ensaio e painéis experimentais, que foram testados para resistência e observados quanto a anomalias. Os resultados indicaram que as betonilhas com traço 1:3 e fibras de polipropileno apresentam melhores propriedades mecânicas, como resistência à compressão e flexão, e menor tendência para fissuração. Este estudo busca fornecer composições adequadas para minimizar ou eliminar problemas de fissuração em betonilhas de pavimentos na região dos Açores.

Palavras-chave: Betonilhas tradicionais, fissuração, resistência mecânica, Açores.

1 INTRODUÇÃO

A existência de fissuração recorrente em betonilhas de pavimentos em obras públicas e construção civil nos Açores, tornou necessário desenvolver um conjunto de estudos e ensaios, laboratoriais e *in situ*, de forma a tentar determinar composições adequadas para o seu fabrico e aplicação na Região dos Açores. O presente trabalho resulta do estudo efetuado pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores, com a colaboração da empresa Marques S.A., com o intuito de desenvolver composições adequadas ao fabrico e aplicação de betonilhas, com vista a minimizar ou eliminar problemas de fissuração recorrentes em pavimentos de obras públicas e construção civil dos Açores.

O presente artigo pretende apresentar o trabalho desenvolvido pelo LREC, em colaboração com empresa Marques S.A., e que é explanado no Relatório LREC intitulado "Caraterização Mecânica De Betonilhas Tradicionais – Relatório 24/2015" (Santos e Miranda 2015), do qual se apresentam figuras, quadros, e informação relevante.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental decorreu entre os meses de janeiro e fevereiro de 2015. Neste capítulo apresentam-se as formulações das betonilhas analisadas, as caraterísticas dos constituintes utilizados e descreve-se, sucintamente, o processo de produção, recolha de amostras, preparação dos provetes e dos painéis experimentais.

2.1 CONSTITUINTES E FORMULAÇÕES

Os constituintes utilizados na formulação das argamassas foram o cimento Portland composto de pozolana Natural, designado CEM II/B-P 32,5 N, de acordo com a EN 197-1 (2001), areia prefabricada ou areia de tufo[1], fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento e água potável da rede pública. Na Figura 1 apresenta-se os constituintes sólidos das betonilhas.

Figura 1 - Constituintes sólidos. Cimento Portland, areia de tufo (prefabricada) e fibras.

No Quadro 1 apresentam-se as composições em volume das betonilhas produzidas, com exceção das fibras de polipropileno, que se expressa em gramas, bem como o número de amostras e painéis experimentais produzidos.

[1] Areia prefabricada é a designação comercial adotada pelo produtor. No caso de estudo, trata-se de areia processada, localmente, a partir da crivagem mecânica de tufo vulcânico, mais especificamente, ignimbritos não soldados. A areia utilizada na construção civil nos Açores é dragada do mar e lavada com água doce. Há alguns anos, alguns produtores começaram a produzir areia a partir de tufo vulcânico, não só para minimizar a presença de cloretos na areia provenientes da água salgada, como também para fazer face à escassez, ocasional, de areia dragada disponível.

Quadro 1 - Composição das betonilhas produzidas. Quantificação de amostras e painéis experimentais efetuados.

Betonilha		Quantidades				Relação A/C	Número de Amostras	Número de Painéis
		Cimento [dm^3]	Areia Prefabricada [dm^3]	Água [dm^3]	Fibras [g]			
AP [1:3]	Sem fibras	93,4	280,0	39,0	-	0,42	2	2
	Com fibras	93,4	280,0	39,0	300,0	0,42	1	1
AP [1:4]	Sem fibras	93,4	373,6	54,0	-	0,58	1	1
	Com fibras	93,4	373,6	54,0	374,0	0,58	1	1
AP [1:5]	Sem fibras	46,7	233,5	36,0	-	0,77	1	1
	Com fibras	46,7	233,5	36,0	227,7	0,77	1	1
AP* [1:3]	Sem fibras	93,4	280,0	48,2	-	0,52	2	2
	Com fibras	93,4	280,0	48,2	300,0	0,52	1	1

Para o desenvolvimento do trabalho foram formulados oito tipos de betonilhas, que se distinguem, essencialmente, pelo traço volumétrico de cimento e areia (1:3, 1:4 e 1:5) e pela incorporação ou não de fibras. A quantidade de fibras, por formulação, foi de aproximadamente 0,1 % em massa relativamente ao volume total da amassadura. A relação água/cimento foi definida pela Marques S.A., com base na sua experiência de produção e aplicação de betonilhas, sendo esta ajustada a cada formulação de modo a obter-se a mesma trabalhabilidade em todas. O traço 1:3 foi repetido para duas relações de água/cimento, para analisar também o efeito dessa relação no comportamento da betonilha. O traço 1:5 vem a propósito do trabalho de Costa (2012), no que respeita à deteção de fissuração de betonilhas aplicadas em obra. O número mais elevado de amostras e painéis experimentais nas formulações sem fibras AP [1:3] e AP* [1:3], resultou de uma repetição do fabrico destas formulações, com vista à verificação da dificuldade encontrada na repetição deste tipo de soluções em obra.

2.2 PRODUÇÃO, RECOLHA DE AMOSTRAS E FABRICO DE PROVETES E PAINÉIS EXPERIMENTAIS

Com as formulações apresentadas, foram produzidos provetes prismáticos com dimensões de 160 x 40 x 40 mm e painéis experimentais com dimensões em planta de 1,5 m x 2 m e com 5 cm de espessura na obra do novo Entreposto Frigorifico de Ponta Delgada, obra em construção aquando da realização deste estudo. Os provetes e painéis produzidos foram sujeitos a diversos ensaios, destrutivos e não destrutivos, assim como a observação e registo de anomalias nos painéis experimentais.

2.2.1 Amassadura

As amassaduras para cada formulação foram realizadas no mesmo dia, sendo primeiro produzida a betonilha sem fibras e depois a betonilha com incorporação de fibras. A amassadura foi produzida em obra, com recurso a uma betoneira de 400 litros, sendo colocados todos os constituintes pela seguinte ordem: água, fibras (quando previstas), areia e cimento. A medição dos constituintes, excetuando as fibras, foi efetuada através de um balde com capacidade aproximada de 46,7 litros. A medição do volume de betonilha produzida, em estado fresco, foi efetuada com recurso a uma pá de dumper, com

aproximadamente 345 litros de capacidade. Na Figura 2 apresentam-se os equipamentos referidos. Todas as quantidades, em termos volumétricos, medidas de materiais e de betonilha produzida, foram estimados através de uma função matemática programada para o efeito. Uma variação verificada em obra, e que diminui o rigor da investigação, foi a variação no tempo de duração da amassadura. Em obra obtiveram-se durações compreendidas entre 70 e 540 segundos, sendo, em geral, na primeira produção de cada traço volumétrico (a composição sem fibras) que o tempo de amassadura era maior, devendo-se ao facto de que, para cada novo traço, ter de se ajustar a água e a verificação da massa de betonilha de modo a obter-se a consistência pretendida.

Figura 2 - Equipamentos utilizados na produção das betonilhas. Betoneira, balde e dumper.

2.2.2 Recolha e fabrico de provetes prismáticos

Após a amassadura de cada betonilha, foi recolhida uma amostra da mesma e transportada para o LREC, dentro de um recipiente, que, após a recolha, era fechado dentro de um saco de plástico de modo a evitar qualquer perda de água da amostra por evaporação durante o transporte. Já em laboratório, as amostras eram colocadas num tabuleiro e homogeneizadas com uma colher de pedreiro antes do fabrico dos provetes. Os provetes prismáticos para a realização dos ensaios, foram fabricados recorrendo a moldes próprios, sendo que cada molde possibilitou o fabrico de três prismas, com dimensões de 160 x 40 x 40 mm. A Figura 3 representa as fases descritas. A metodologia de fabrico e cura a que os provetes foram sujeitos encontra-se descrita na norma EN 13892-1 (2002).

Figura 3 - Fabrico de provetes prismáticos. Recolha, homogeneização e moldagem.

2.2.3 Painéis experimentais

Em paralelo com a execução dos provetes em laboratório, foram executados em obra painéis experimentais, para cada formulação de betonilha, com dimensões em planta de 1,5 x 2 m e com 5 cm de espessura. Na Figura 4 exemplifica-se o processo de fabrico dos painéis. Estes painéis foram construídos e deixados em obra para avaliar e caraterizar as betonilhas quando aplicadas num suporte real e em condições ambientais reais. Antes da aplicação da betonilha foi efetuada a limpeza ao

suporte, de modo a remover quaisquer poeiras nele contido. Depois o suporte foi devidamente humedecido e retirado qualquer eventual excesso de água. Sobre o suporte, e imediatamente antes de aplicar a betonilha, foi aplicado um promotor de aderência à base de látex. Após a aplicação do promotor de aderência procedeu-se à aplicação da betonilha, com compactação manual, sarrafagem e acabamento liso com recurso a talocha. A cura dos painéis incluiu a rega durante os primeiros 7 dias de idade, tendo-se recorrido a um pulverizador nas primeiras horas e a mangueira nos restantes dias.

Figura 4 - Processo de fabrico de painéis. Cofragem, aplicação de promotor de aderência, aplicação da betonilha, aspeto final e processo de cura com pulverização de água.

2.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS NOS PROVETES DE BETONILHA

A metodologia dos ensaios de caraterização das betonilhas em laboratório foi realizada no estado endurecido e ilustra-se na Figura 5.

Figura 5 - Ensaios de caracterização de betonilhas: balança para pesagem, ultrassons, resistências à flexão e compressão.

Os ensaios de caraterização consistiram na determinação da massa volúmica aparente (MVA), determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Edin) e determinação das resistências à flexão (Rf) e à compressão (Rc). Estes ensaios foram realizados em provetes prismáticos, moldados em laboratório, com 7, 14 e 28 dias de idade, sendo ensaiados 3 provetes à flexão e 6 meios provetes à compressão de acordo com a norma EN 13982-2 (2002). Estes ensaios foram também realizados em provetes prismáticos extraídos dos painéis experimentais aos 28 dias de idade, tendo sido cortados 4 provetes de cada tipo de betonilha, para se estimar o teor de humidade da betonilha em 1 provete e as características mecânicas nos outros 3. O módulo de elasticidade dinâmico das betonilhas foi estimado pelo ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons, pelo método direto, tendo sido utilizado um equipamento que permite medir a duração de propagação das ondas ultrassónicas pelo material entre os extremos dos provetes. A determinação da massa volúmica aparente das betonilhas foi realizada previamente aos ensaios de resistência, através de um simples

método expedito, que consistiu na determinação da massa do provete e posterior divisão pelo volume do provete para se obter o valor da massa volúmica. O teor de humidade dos provetes extraídos dos painéis foi determinado através da relação percentual entre a massa de água contida no provete e a massa do provete seco em estufa a 105º C.

2.4 METODOLOGIA DAS INSPEÇÕES AOS PAINÉIS EXPERIMENTAIS

No âmbito das inspeções técnicas aos painéis experimentais, foram efetuadas leituras das temperaturas e humidades relativas do ar, assim como foram ainda medidas as temperaturas superficiais dos painéis e registadas as temperaturas de ponto de orvalho dos mesmos.

O ensaio de ultrassons permitiu a medição da transição num determinado percurso, permitindo calcular a velocidade aparente de propagação de ondas ultrassónicas, com recurso a transdutores de pontas, com 54 kHz de frequência. Com os tempos de propagação das ondas (t) e as distâncias percorridas entre os transdutores (d) foi construído um gráfico de dispersão, cujo declive da reta de regressão linear, com interseção na origem, é dado como a velocidade aparente de propagação de ultrassons (Va). Na Figura 6 apresenta-se o esquema definido para o percurso do ensaio, com um total de 28 cm dividido em distâncias de 7 cm, e a velocidade aparente de ultrassons.

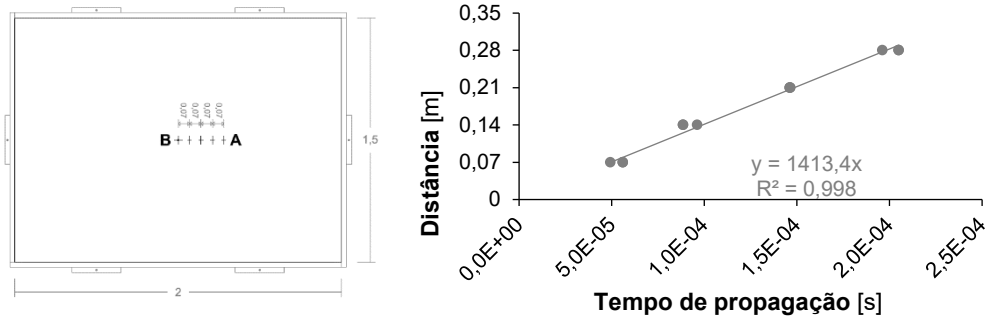


Figura 6 - Planta do painel experimental com a marcação dos pontos de medição e gráfico de determinação da velocidade aparente de ultrassons.

Por último, efetuou-se a observação visual dos painéis com vista à deteção de fissuras, tendo a zona de observação de cada painel sido circunscrita a uma porção entre o canto e metade dos lados do painel (¼ da área total do painel). Na Figura 7 ilustra-se a fissuração observada num dos painéis. Na zona de observação efetuou-se a medição do comprimento total das fissuras, recorrendo a uma linha, e estimou-se a abertura máxima de fendas observada com o recurso a uma régua de fissuras.

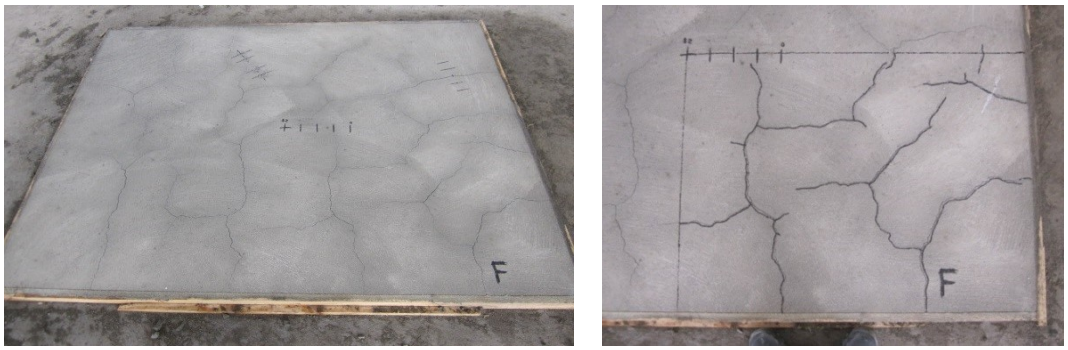


Figura 7 - Fissuração observada num dos painéis. Vista geral do painel (à esquerda) e zona delimitada para estudo (à direita).

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 PROVETES PRISMÁTICOS MOLDADOS

Para efeitos de caraterização das betonilhas no estado endurecido, são apresentados na Figura 8 exemplos dos valores médios de MVA, Rf, Rc e Edin, obtidos aos 7, 14 e 28 dias de idade.

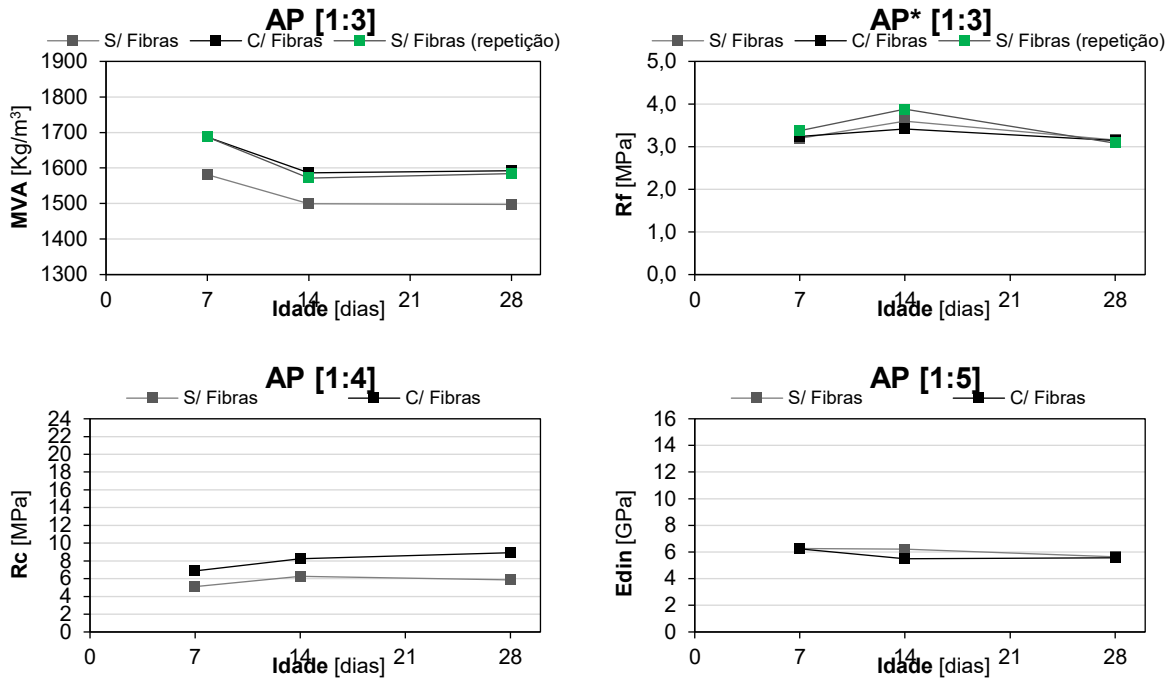


Figura 8 – Exemplos de gráficos de MVA, Rf, Rc e Edin.

Da análise gráfica dos dados obtidos e em termos de massa volúmica aparente foi possível verificar que a MVA é tendencialmente mais elevada para traços volumétricos mais ricos em ligante e que, de um modo geral, os valores de MVA das diferentes betonilhas, com o mesmo traço volumétrico, não apresentam grandes variações entre si. Verificou-se uma descida deste valor aos 28 dias, em relação aos valores obtidos aos 7 dias, originada, essencialmente, pela perda de água associada ao processo de cura dos provetes em câmara climática.

Relativamente à Resistência à flexão, a análise dos resultados revelou que a adição de fibras aumenta a resistência à flexão nas betonilhas com maior proporção de ligante (AP [1:3] e AP [1:4]), mas essa diferença não é significativa nas betonilhas AP [1:5] e AP* [1:3]. As repetidas de traço 1:3 sem fibras mostraram resistência superior ao aumentar a relação água/cimento, sugerindo melhor hidratação. Em geral, a resistência à flexão aumentou dos 7 para os 14 dias e diminuiu dos 14 para os 28 dias. Face ao exposto, considera-se que a resistência à flexão tende a aumentar com o aumento da massa de cimento na mistura.

Relativamente à resistência à compressão, da análise dos resultados foi possível verificar que, em geral, as betonilhas com incorporação de fibras apresentaram maiores resistências do que as que não contêm fibras. A betonilha com traço volumétrico de 1:5 (AP [1:5]) e a de traço 1:3 com maior incorporação de água (AP* [1:3]) correspondem a exceções, uma vez que na primeira não se verificaram diferenças de resistência significativas e na segunda a resistência à compressão até aumentou ligeiramente aos 14 e 28 dias. A análise comparativa, tendo por base as betonilhas de consistência semelhante (exceto a AP* [1:3]), permitiu observar que as mais ricas em ligante

apresentaram valores superiores de resistência mecânica. A análise comparativa, tendo por base a menor ou maior relação A/C nas betonilhas ao traço 1:3, permitiu constatar que as betonilhas com maior quantidade de água foram as que apresentaram valores de resistência superiores. Como forma de comparação, pôde-se observar que, por exemplo, aos 28 dias, o incremento da quantidade de água nas betonilhas também aumentou as suas resistências de cerca de 48% até acima do dobro (118%). Tal como observado anteriormente para as resistências à flexão, a repetição das betonilhas ao traço 1:3 sem fibras, com menor e maior quantidade de água, produziram valores superiores.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico salienta-se que os valores obtidos dependem da velocidade de ultrassons, da massa volúmica aparente do material e do coeficiente de *Poisson*. A análise dos dados, sugere que o módulo de elasticidade dinâmico das betonilhas diminui com a evolução da cura das mesmas, e que, à semelhança do que se verificou para a massa volúmica aparente, possui uma diminuição mais acentuada dos 7 para os 14 dias, do que dos 14 para os 28 dias. Também, à semelhança do observado para as resistências mecânicas (flexão e compressão), é notória a reduzida variação dos módulos de elasticidade dinâmicos para as betonilhas ao traço volumétrico de 1:5, independentemente da inclusão de fibras na sua composição. Também se verificou que as betonilhas mais deformáveis são as de traço 1:5, seguindo-se as de traço 1:4 e, finalmente, as betonilhas de traço 1:3, que são tanto menos deformáveis quanto maior a sua relação A/C. Em consequência da repetição da produção das betonilhas sem fibras com traço 1:3, estas apresentaram, na sua generalidade, maiores módulos de elasticidade dinâmicos que as inicialmente produzidas, apresentando um valor ligeiramente inferior aos 28 dias apenas para a betonilha com maior quantidade de água (AP* [1:3].R).

Na Figura 9 apresenta-se as correlações dos módulos de elasticidade dinâmicos com as resistências mecânicas à compressão obtidos. Assim, é possível constatar, com boa correlação e para todas as idades de caracterização, que as betonilhas com maiores resistências à compressão são as que apresentaram também maior rigidez à deformação, ou seja, são as menos deformáveis.

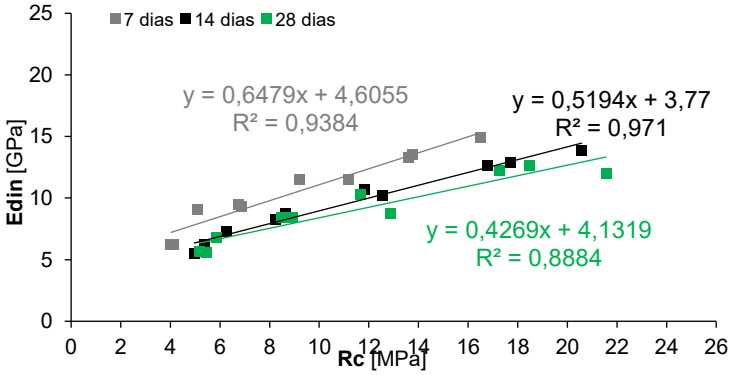


Figura 9 – Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de idade.

3.2 PROVETES EXTRAÍDOS DE PAINÉIS EXPERIMENTAIS

O Quadro 2 resume todos os resultados obtidos relativamente a ensaios em provetes extraídos de painéis aos 28 dias de idade. Relativamente às betonilhas de traço volumétrico 1:3 (AP [1:3]), os provetes caraterizados foram cortados de um dos bordos do painel experimental, o que conduziu a uma enorme variabilidade nos valores das resistências à compressão, apresentando valores muito mais baixos numa metade do provete do que na outra. Esta variação estará relacionada com o fato de um dos lados do provete estar encostado à cofragem do painel, o que terá feito com que ocorresse a

perda de água de amassadura de uma forma mais célere na extremidade em contato com a cofragem de madeira.

Quadro 2 - Valores médios da MVA, Rf, Rc, e Edin aos 28 dias de idade.
(1) Provetes extraídos de uma das extremidades do painel, ensaiados aos 30 dias.

Betonilha		**MVA** [kg/m^3]	**Rf** [MPa]	**Rc** [MPa]	**Edin** [GPa]
AP [1:3] (1)	Sem fibras	1465 (± 56)	1,3 (± 0,09)	1,2 / 4,8	9,8 (± 0,48)
	Com fibras	1679 (± 33)	2,5 (± 0,08)	6,9 / 9,3	14,4 (± 0,40)
AP [1:4]	Sem fibras	1559 (± 50)	1,2 (± 0,15)	4,4 (± 0,61)	7,0 (± 0,55)
	Com fibras	1567 (± 20)	1,9 (± 0,12)	7,4 (± 1,62)	8,7 (± 1,24)
AP [1:5]	Sem fibras	1353 (± 24)	1,3 (± 0,30)	2,9 (± 1,54)	6,1 (± 0,27)
	Com fibras	1398 (± 20)	1,0 (± 0,26)	2,7 (± 0,87)	5,0 (± 0,35)
AP* [1:3]	Sem fibras	1766 (± 57)	3,8 (± 0,40)	19,0 (± 1,53)	12,4 (± 0,48)
	Com fibras	1679 (± 44)	3,0 (± 0,46)	14,7 (± 1,71)	12,3 (± 0,25)
AP [1:3].R	Sem fibras	1548 (± 32)	2,0 (± 0,22)	10,3 (± 0,96)	9,3 (± 0,90)
AP* [1:3].R	Sem fibras	1717 (± 18)	4,3 (± 0,55)	21,9 (± 0,67)	13,4 (± 0,47)

Apesar da grande dispersão de resultados obtida, representada pelo indicador do desvio-padrão, e influenciada, em parte, por fatores como a posição do corte dos painéis e a exposição a que os painéis estiveram sujeitos, pode-se concluir, e de forma coerente com os resultados dos provetes moldados em laboratório, que as betonilhas com traços mais ricos em ligante apresentaram maiores resistências mecânicas.

Contrariamente ao esperado, a comparação de betonilhas com o mesmo traço, mas com relações A/C distintas, permite identificar que os valores das resistências e dos módulos de elasticidade dinâmicos são superiores na mistura com maior relação A/C. Na repetição das betonilhas ao traço 1:3 sem fibras, e considerando agora apenas as betonilhas AP* [1:3] devido aos condicionalismos já referidos anteriormente, obteve-se valores mais elevados de resistências mecânicas e uma menor capacidade de deformação.

A análise ao efeito da incorporação de fibras não permitiu distinguir grandes diferenças de comportamento. Apenas no caso das betonilhas AP [1:4], as fibras contribuíram para um aumento notório das resistências mecânicas e diminuição da sua capacidade de deformação. No caso das betonilhas AP [1:5], verificou-se que estas não sofreram grandes alterações de resistência, mas que a incorporação de fibras melhora a capacidade de deformação.

3.3 PAINÉIS EXPERIMENTAIS

No Quadro 3 apresentam-se os valores obtidos das temperaturas de superfície dos painéis ($T_{sup.}$) e do ponto de orvalho ($T_{orv.}$) para todas as betonilhas inspecionadas aos 7, 14 e 28 dias de idade. A sua análise permite observar que as betonilhas com traço volumétrico 1:4 (AP [1:4]) apresentavam aos 14 dias uma temperatura superficial muito próxima da temperatura de ponto de orvalho, chegando inclusive, nas com incorporação de fibras, a ser mais baixa que este limite ($T_{sup.} < T_{orv.}$). Esta observação indica que existiam condições propícias à ocorrência de humidades por condensação nos painéis, além

de outros fatores como a ausência de uma total proteção às intempéries (p. ex. infiltração de águas pluviais).

Quadro 3 – Valores da temperatura superficial dos painéis e temperaturas do ponto de orvalho aos 7, 14 e 28 dias de idade.

Betonilha		Idade das betonilhas					
		7 dias		14 dias		28 dias	
		$T_{sup.}$ [°C]	$T_{orv.}$ [°C]	$T_{sup.}$ [°C]	$T_{orv.}$ [°C]	$T_{sup.}$ [°C]	$T_{orv.}$ [°C]
AP [1:3]	Sem fibras	12,9	11,5	11,6	9,2	16,3	15,0
	Com fibras	12,9	11,4	12,4	9,2	15,7	14,8
AP [1:4]	Sem fibras	10,7	7,7	14,8	14,6	18,0	13,9
	Com fibras	11,5	7,3	14,3	14,7	17,3	13,9
AP [1:5]	Sem fibras	18,6	8,2	16,8	12,9	18,3	12,2
	Com fibras	17,9	8,3	15,0	12,8	15,8	12,3
AP* [1:3]	Sem fibras	13,7	12,6	13,9	11,3	17,0	15,3
	Com fibras	13,9	12,7	13,1	11,3	17,1	15,2
AP [1:3].R	Sem fibras	14,0	12,1	17,1	15,2	13,8	7,5
AP* [1:3].R	Sem fibras	14,6	12,3	17,0	15,3	14,1	7,8

No Quadro 4 apresentam-se os resultados obtidos aos 7, 14 e 28 dias de idade, relativos aos ensaios de determinação da velocidade aparente de ultrassons, bem como os respetivos coeficientes de correlação alcançados na sua determinação.

Quadro 4 – Valores das velocidades aparentes determinados e respetivos coeficientes de correlação aos 7, 14 e 28 dias de idade.

Idade		7 dias		14 dias		28 dias	
Betonilha		Va [m/s]	R^2 [-]	Va [m/s]	R^2 [-]	Va [m/s]	R^2 [-]
AP [1:3]	Sem fibras	1188	0,98	1177	0,99	1295	0,98
	Com fibras	1531	0,97	1459	0,99	1531	0,94
AP [1:4]	Sem fibras	1093(1)	1,00(1)	1135	0,98	1363	0,94
	Com fibras	1117	1,00	1375	0,98	1547	0,98
AP [1:5]	Sem fibras	1197	0,92	1409	0,90	1608	0,96
	Com fibras	960	0,99	1299	0,98	1413	0,99
AP* [1:3]	Sem fibras	1762	0,98	1803	0,98	1756	0,99
	Com fibras	2022	0,98	1875	0,97	1830	0,94
AP [1:3].R	Sem fibras	1467	0,98	1334	0,98	1463	0,94
AP* [1:3].R	Sem fibras	2140	0,97	2063	0,98	2222	0,95

(1) Valor resultante da medição dos primeiros 3 pontos (0-7, 7-14 e 14-21 cm).

Da análise dos dados, e comparando as velocidades aparentes das betonilhas aos 28 dias de idade, constata-se que as betonilhas com traço volumétrico mais fraco em ligante (AP [1:5]) apresentaram

valores de velocidade superiores aos das betonilhas dos restantes traços. A única exceção a esta tendência corresponde à betonilha com mais água (AP* [1:3]), que apresenta as velocidades mais elevadas do conjunto das composições. Relativamente à incorporação de fibras na sua constituição, verificou-se que essa adição só não proporcionou uma maior velocidade aparente na composição AP [1:5], tendo contribuído nesse caso para uma redução da compacidade da betonilha. O aumento da relação água/cimento nas betonilhas ao traço 1:3 proporcionou uma maior compacidade às mesmas, contrariando aquilo que era expectável.

Relativamente às inspeções visuais aos painéis experimentais não se verificaram fissuras de retração, de um modo geral, a não ser no painel AP* [1:3] sem fibras, apresentando este painel fissuras de abertura máxima 1,5 mm. De realçar que na repetição desta mesma betonilha AP* [1:3].R sem fibras não se verificou qualquer fissuração. Na Figura 10 apresenta-se um gráfico quantificando o comprimento linear total das fissuras dividido pela área do painel em estudo aos 7, 14 e 28 dias de idade.

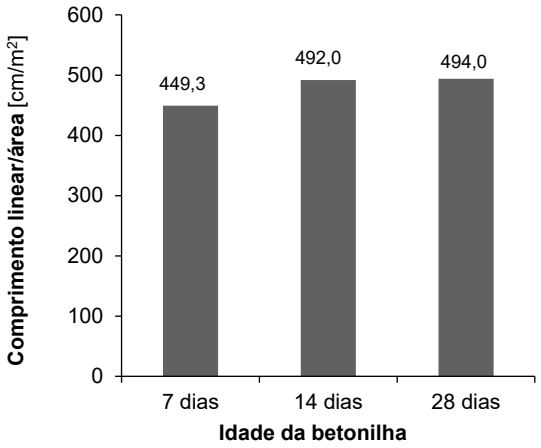


Figura 10 – Comprimento linear total da fissuração presente no painel de betonilha AP* [1:3] sem fibras.

4 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes formulações de betonilhas tradicionais para minimizar a fissuração observada nos pavimentos da região.

Foram produzidos provetes para ensaios em laboratório e painéis experimentais em obra com oito tipos de betonilhas, utilizando cimento Portland e areia prefabricada, considerando diferentes proporções (1:3, 1:4, 1:5) e a adição ou não de fibras de polipropileno. As propriedades mecânicas foram determinadas através de ensaios aos 7, 14 e 28 dias de idade.

Observações relativamente a Provetes Moldados em Laboratório:

- Água e Massa Volúmica: Aumento de água na mistura com proporção 1:3 resultou em maior massa volúmica aparente, sugerindo possível hidratação incompleta do cimento.
- Fibras de Polipropileno: Aumentam resistências mecânicas à flexão e compressão, exceto na proporção 1:5.
- Resistência e Deformabilidade: Betonilhas com maior resistência à compressão têm maior módulo de elasticidade dinâmico, sendo menos deformáveis. As mais deformáveis são as de proporção 1:5, seguidas pelas de 1:4 e por fim 1:3.

Observações referentes a Provetes Extraídos dos Painéis Experimentais:

- Fibras de Polipropileno: Não mostraram diferença significativa, exceto na proporção 1:4, onde aumentaram as resistências e reduziram a deformação. Na proporção 1:5, melhoraram a deformabilidade.
- Comparação Laboratório vs. Painéis: Resistências à flexão e módulos de elasticidade dos provetes extraídos foram superiores aos moldados em laboratório, mas a resistência à compressão foi inferior.

Observações relativas a Painéis Experimentais:

- Velocidade de Propagação de Ultrassons: Betonilhas com menor proporção de ligante (1:5) tiveram maior velocidade de propagação, indicando maior compacidade, exceto na proporção 1:3 com mais água.
- Fibras de Polipropileno: Em geral, aumentaram a velocidade de propagação, exceto na proporção 1:5, onde reduziram a compacidade.
- Fissuração: Não houve fissuras de retração significativas, exceto no painel 1:3 sem fibras, que apresentou fissuras de até 1,5 mm. A repetição desta betonilha não apresentou fissuras.

A caraterização experimental apresentada neste trabalho foi enriquecedora, na medida em que permitiu caraterizar um leque de formulações de betonilhas, com areia prefabricada da ilha de São Miguel, com menor tendência para fissuração.

Os resultados do estudo mostraram que as betonilhas com traço volumétrico 1:3 e incorporação de fibras de polipropileno apresentam as melhores propriedades mecânicas, nomeadamente, resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Estas betonilhas são as que apresentam também menor tendência para a fissuração.

REFERÊNCIAS

Santos, André A., Miranda, Vidália M. C. (2015); CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BETONILHAS TRADICIONAIS – RT 24/2015, LREC – setembro 2015

Costa, Filipe (2012); Aplicação de betonilhas sobre membrana IMPACTODAN – Lição aprendida Nº LA10 – Marques, SA – julho 2012.

NP EN 197-1 Norma Portuguesa; “CIMENTO – PARTE 1: COMPOSIÇÃO, ESPECIFICAÇÕES E CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE PARA CIMENTOS CORRENTES”, Instituto Português da Qualidade, 2001.

EN 13982-1 Norma Europeia; “METHODS OF TEST FOR SCREED MATERIALS – PART 1: SAMPLING, MAKING AND CURING SPECIMENS FOR TEST”, CEN, 2002.

EN 13982-2 Norma Europeia; “METHODS OF TEST FOR SCREED MATERIALS – PART 2: DETERMINATION OF FLEXURAL AND COMPRESSIVE STRENGTH”, CEN, 2002.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO COLABORATIVA NA GESTÃO DE EMPREENDIMENTOS PÚBLICOS E NA REDUÇÃO DE MATERIAIS CONSUMÍVEIS

Pedro Mendo Trigo Chichorro Rodrigues [a]; Pedro Manuel Gameiro Henriques [b]

[a] (PROMENG, Project Management Engineers Unip. Lda., Rua Prof. Dr. Manuel Eugénio Machado Macedo, 351, R/C "D", 2765-009, Estoril). pedro.rodrigues@promeng.pt

[b] (Departamento de Engenharia Engenharia Civil, Arquitetura e Ambiente, IST, Avª Rovisco Pais 1900-001 Lisboa). pedro.henriques@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Os sistemas de informação colaborativa estão, cada vez mais, integrados na indústria da construção, permitindo a partilha de documentação, interligação e comunicação entre todos os intervenientes do processo de gestão de empreendimentos deste tipo de contratos.

A correta definição do sistema colaborativo, a sua estruturação, as interligações, responsabilidades e atribuições de cada entidade e cada colaborador, níveis de acesso e permissões, constituem um desafio para os gestores de projeto de empreendimentos de construção, em particular dos Donos de Obra Públicos.

A quase inexistência, em Portugal da utilização de sistemas de gestão de informação pelos Donos de Obra, principalmente públicos, faz com que haja um campo de desenvolvimento e implementação de modelos que possam garantir o controlo contratual e simultaneamente reduzir significativamente a utilização de consumíveis em empreendimentos de construção.

A contratação pública, permite, incentiva e materializa desde 2008, a utilização de comunicações e notificações por meios electrónicos entre os intervenientes, Dono da Obra, Diretor da Fiscalização e Diretor de Obra. No entanto, um sistema colaborativo de informação ultrapassa em larga escala o conceito de comunicação entre partes do contrato, devendo ser a referência para a gestão de informação.

A particularidade do sistema português de gestão contratual pública, impõe um desafio acrescido na implementação global de sistemas de gestão de informação em empreitadas de obras públicas. Para além dos prazos impostos de respostas, existe a necessidade constante de atualização da informação, do controlo do progresso dos trabalhos permanente das diversas frentes de trabalho.

Os Donos de Obra Públicos delegam, raras exceções, estas metodologias aos prestadores de serviços de fiscalização, ficando reféns de métodos distintos de controlo e de gestão de informação. Existem em Portugal, algumas tentativas de sistematizar processos de construção que, ao serem implementados no início dos empreendimentos e indicados nos Cadernos de Encargos de contratação de empreitadas de obras públicas, permitiriam a gestão de informação contratual mais controlada e coerente. Estas soluções reduzem a utilização de materiais de consumo corrente e que têm um peso significativo na produção de resíduos em prestações de serviços e de gestão de empreitadas.

A gestão de informação colaborativa para empreitadas de obras públicas deve ser um investimento efetivo do Dono da Obra, permitindo a parametrização dos modelos em função das suas efetivas necessidades. Esta parametrização é possível e deveria ser realizada com o desenvolvimento de modelos associados à contratação pública portuguesa, por forma a reduzir os custos associados às falhas de respostas da administração pública e dos seus representantes na gestão de contratos.

Esta artigo pretende, por isso, apresentar modelos de organização de controlo e gestão de empreendimentos de obras públicas na ótica do Dono da Obra e da Fiscalização, por forma a modelar a parametrização dos processos de controlo de gestão contratual do âmbito, planeamento, quantidades, custos, processos de reclamações, processos de alteração contratual, gestão de prazos de resposta, organização documental, gestão de intervenientes, gestão de comunicação e de todos os processos associados à gestão de empreendimentos.

PALAVRAS-CHAVE

Gestão de empreendimentos, Sistemas Colaborativos de Gestão de Empreendimentos, Gestão Contratual de Empreitadas de Obras Públicas

1 INTRODUÇÃO

Uma ferramenta informática colaborativa tem como objetivo a integração de toda a informação gerada ao longo de um processo construtivo de uma empreitada de obra, pública ou privada, em um sistema aberto ou fechado, gratuito ou pago, com software comercial ou customizável, que permita o acesso estruturado à documentação produzida.

Os intervenientes (Stakeholders) envolvidos no processo de empreitadas de obras são diversos com um objetivo global comum, a construção, mas com objetivos contratais específicos e metodologias diferentes para atingir esses objetivos.

O empreendedor, dono da obra, é o primeiro responsável pela concretização do objetivo. Para a concretização do objetivo irá promover a contratação de todos os restantes intervenientes, desde consultores, projetistas, project manager, fiscalização, coordenador de segurança, fornecedores e empreiteiros.

Por outro lado, para cada fase de implementação do empreendimento é gerada uma quantidade significativa de informação que terá de ser compilada, organizada, gerida e distribuída de forma correta e adequada às necessidades de produção de cada interveniente em função das suas obrigações e responsabilidades no processo construtivo.

Assim, irão apresenta-se de seguida algumas soluções existentes no mercado nacional e internacional, que podem garantir de forma eficaz a rastreabilidade de algumas áreas de atuação na geração da informação ao longo do processo construtivo, com o objetivo de garantir a compilação, controlo, arquivo e gestão de informação pela fiscalização no apoio ao processo de gestão documental e contratual como suporte ao dono da obra.

2 CICLO DE VIDA DOS EMPREENDIMENTOS, A GERAÇÃO DE INFORMAÇÃO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E INFORMAÇÃO

O ciclo de vida dos empreendimentos de construção é caracterizado por ser evolutivo no dispêndio de recursos, custos e consequentemente na geração de informação. Assim, de uma forma ilustrativa a geração de informação e progresso de custos num empreendimento de construção é simplificadamente representada na figura 1.

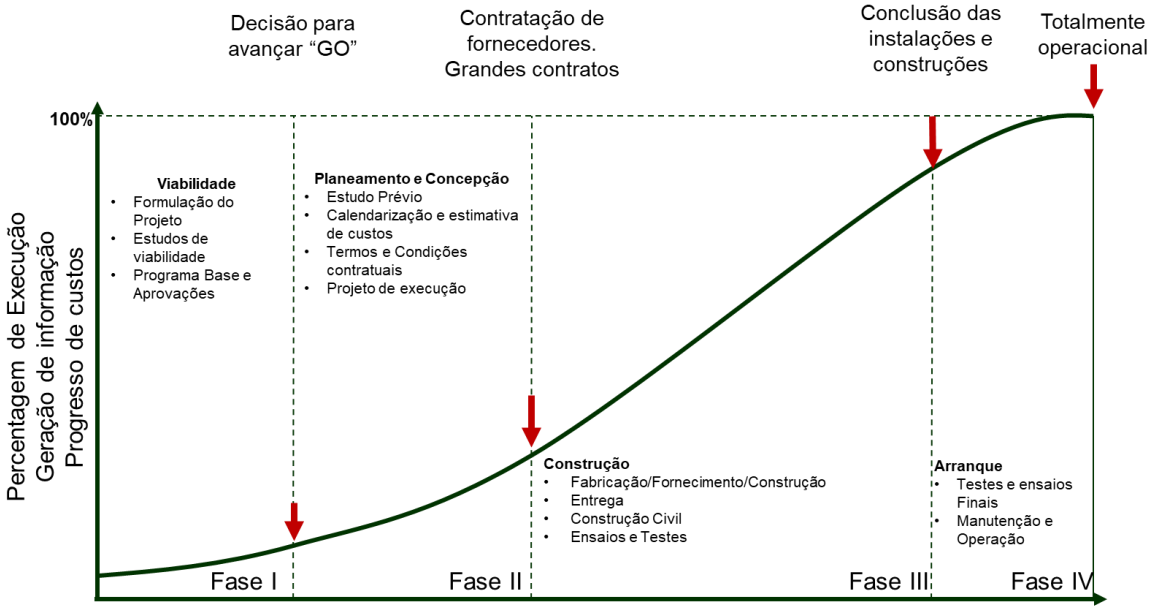


Figura 1 – Evolução do custo e geração de informação ao longo do ciclo de vida de empreendimentos de construção

A necessidade, senão obrigatoriedade, de fornecer atempadamente a informação a todos e cada um dos intervenientes torna-se fundamental para a redução de prazos e custos, daí a importância de terem-se sistemas de gestão de informação adaptados às fases, quantidade e organização documental em cada estágio de implementação do empreendimento.

Os principais intervenientes num processo de empreitadas de construção são, tradicionalmente, o dono da obra, como gestor do contrato, os projetistas, responsáveis pela elaboração dos projetos até ao nível do detalhe e projeto de execução e posterior assistência técnica em fase de obra, a fiscalização, como entidade que apoiará o dono da obra na verificação do cumprimento dos contratos de fornecimentos e de construção, tendo como referência o caderno de encargos, projetos e elementos de contratação e as entidades executantes, representadas pelos fornecedores e empreiteiros. Todos estes intervenientes, incluindo entidades externas com influência no empreendimento, têm relações funcionais, contratuais ou de gestão, com circuitos de informação que devem ser respeitados. Na figura 2 apresenta-se uma representação simplificada das interações entre estas entidades.

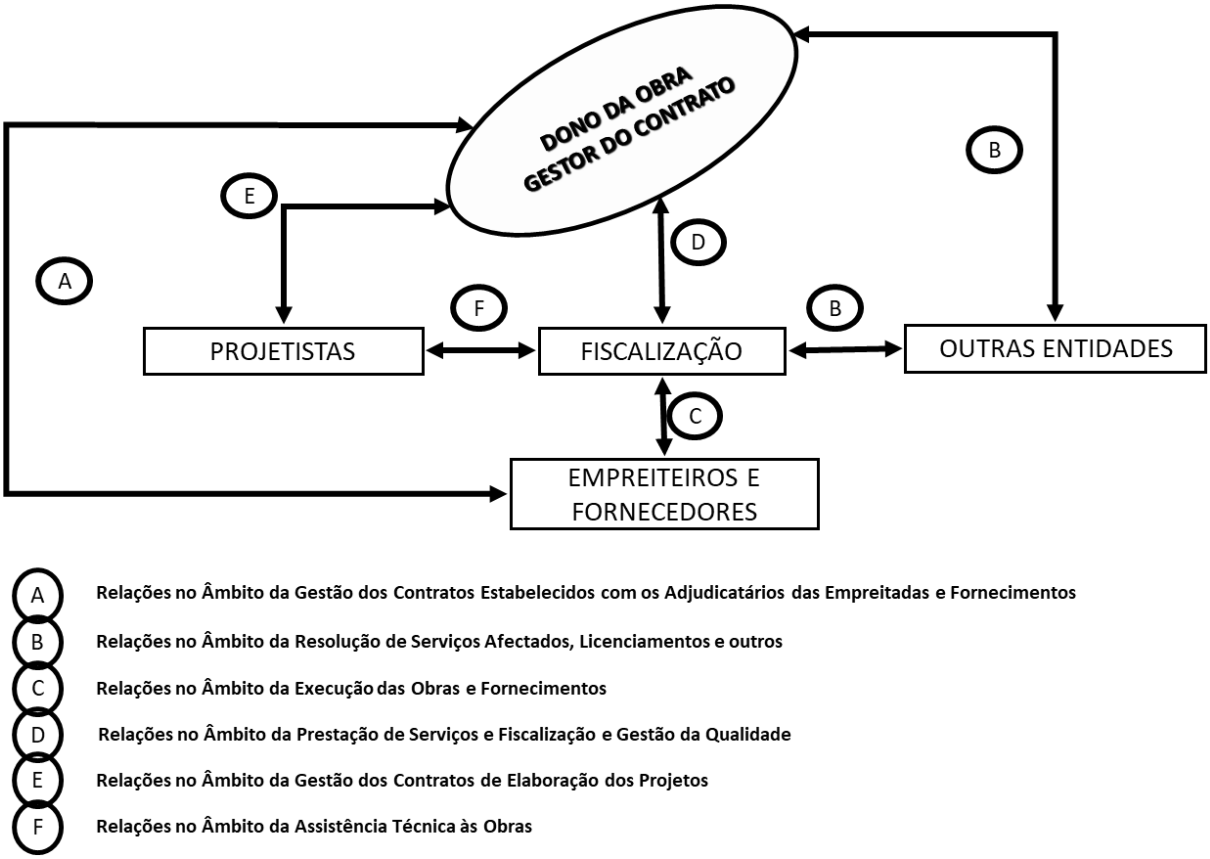


Figura 2 - Representação simplificada das interações entres estas entidades em empreendimentos de construção

A colaboração no processo construtivo é, por isso, fulcral para se atingir os objetivos do empreendimento e proporciona melhores resultados, menos atrasos, liberta maiores margens financeiras para cada interveniente e facilita todo o processo de gestão. A colaboração eficaz é uma parte crucial do sucesso dos intervenientes do empreendimento.

Num processo construtivo tradicional, o apoio e controlo dos processos é feito, fundamentalmente, por um gestor de contrato, que deve ser o representante do dono da obra. As metodologias de gestão de empreendimentos materializam e especificam as funções, atribuições, responsabilidades e perfis de conhecimento de cada interveniente. Uma vez que o gestor do contrato é um interveniente-chave para o sucesso, as suas competências gerais e de gestão podem ser melhoradas através de diversas metodologias de "project management", difundidas globalmente, como por exemplo, através do Project Management Institute (PMI), PRINCE2, International Project Management Association (IPMA/APOGEP), etc.

Assim, a actividade de gestor de contrato, na ótica de "project management", assume uma relevância central, uma vez que desde as fases iniciais do processo do empreendimento terá de controlar a informação gerada, através de comunicações, peças desenhadas e escritas do projeto, documentos técnicos, de gestão, administrativos, financeiros e económicos, entre outras e que deve ser analisada, compilada, organizada e distribuída eficazmente entre todos os restantes intervenientes.

No caso da atividade de fiscalização de obras ("construction supervision"), como instituída no modelo existente em Portugal, as competências de gestão e técnicas são mais específicas, com a necessidade de ter áreas de conhecimento adequadas ao suporte necessário a dar ao gestor do contrato. Estas

responsabilidades são atribuídas ao diretor da fiscalização. A fiscalização da construção assume assim um papel central na gestão de todos os processos desta fase, devendo ser suportada por um sistema de gestão de informação robusto e adequado a todas as áreas da sua competência.

As principais áreas de competência da fiscalização e que devem ser geridas pelo diretor da fiscalização, são, pelo menos as seguintes:

- Gestão e Controlo Administrativo a implementar;
- Controlo do Planeamento e progresso dos trabalhos;
- Controlo de Quantidades e Custos;
- Gestão da Qualidade;
- Gestão da Segurança e o modo de implementação;
- Gestão da Ambiental.

A coordenação destas áreas de conhecimento/atuação só é possível, em empreendimentos com alguma dimensão, através de sistemas centralizado de gestão de informação, que deve ser, preferencialmente, colaborativo, por forma a permitir a distribuição da informação e das respectivas alterações ao longo do processo de construção.

As diversas interações de entre os processos da fiscalização, os intervenientes no processo construtivo, as áreas de atuação, os fluxos de informação, contratuais e processuais é representado na figura 3.

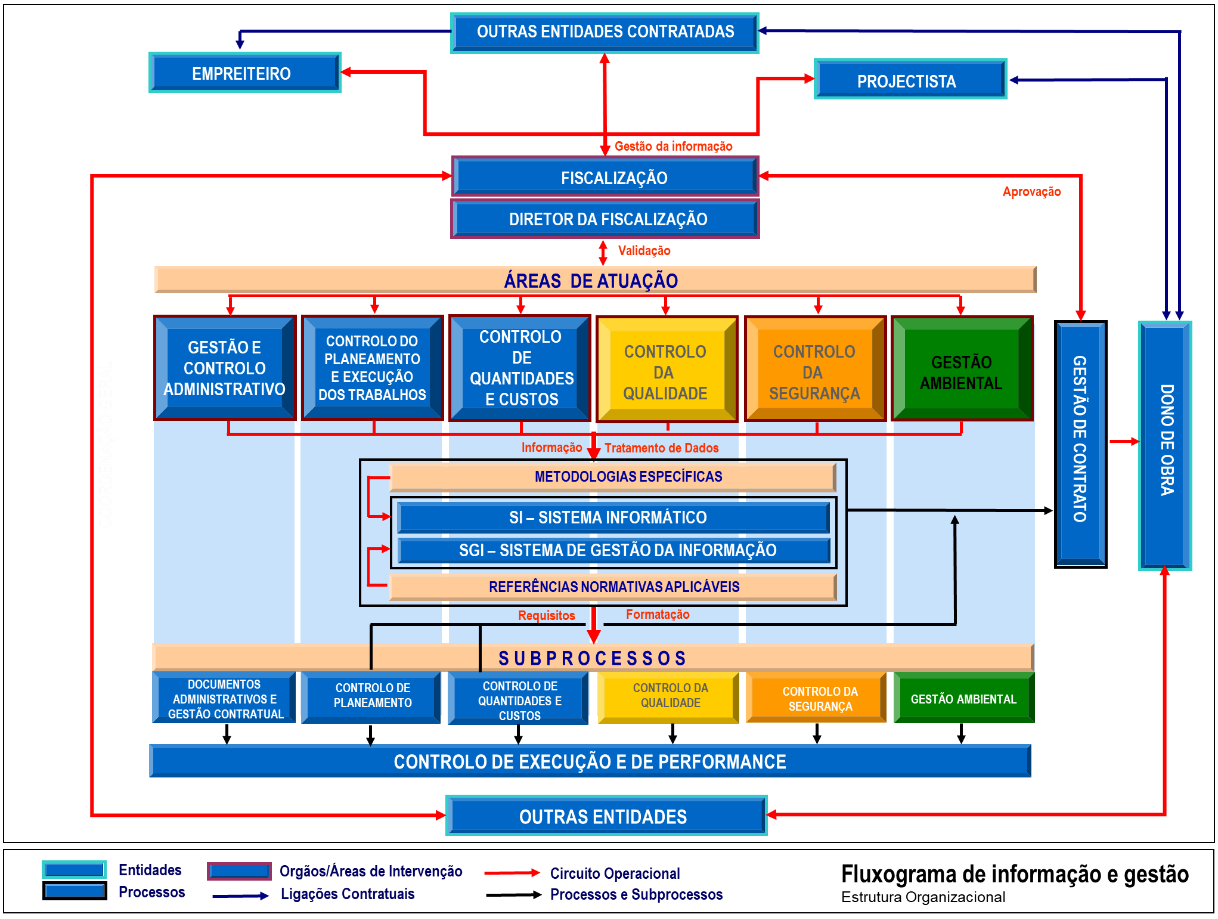


Figura 3 - Principais áreas de competência da fiscalização e interações entre intervenientes nos processos construtivos

Ainda no âmbito da fiscalização de empreitadas, existem, para cada área funcional, uma série de obrigações e responsabilidades associadas à produção de documentação específica. Entre as áreas que geram maior quantidade de informação e documentação a ser compilada, organizada, distribuída e sistematizada destacam-se na figura 4:

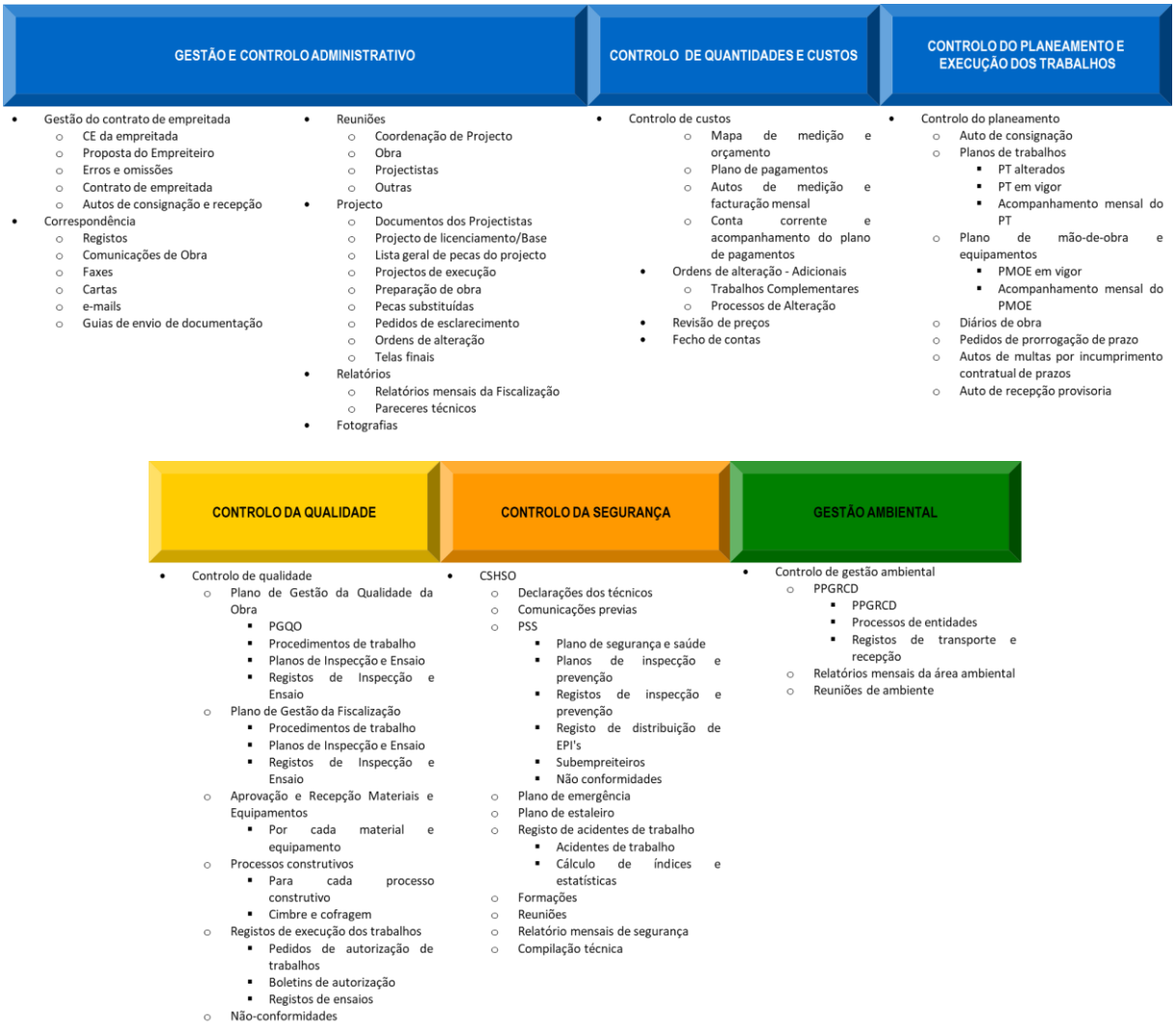


Figura 4 – Documentos a controlar pela fiscalização e exemplo da sua organização e arquivo

3 CASOS DE ESTUDO E FERRAMENTAS DE CONTROLO

No quadro 1 apresentam-se, como exemplos, a quantidade de informação que poderá ser gerada num processo de construção na sua fase de execução, apresentamos alguns exemplos reais de obras concluídas no quadro seguinte.

Verifica-se assim, que a quantidade de informação de base eletrónica gerada em empreitadas de obras públicas e privadas, depende sempre da forma como os documentos são produzidos e transmitidos nas diversas áreas de atuação.

Os sistemas de comunicação em quase todas as fases do empreendimento de construção, fundamentalmente via correio eletrónico, “e-mail”, não sendo esta forma de transmissão garantia de ter-se implementado um sistema de gestão e controlo de informação.

Quadro 1 – Exemplos obras concluídas e documentos controlados por tipo de empreitada e obra

Tipo de empreitada	Valor da construção	Tipo de obra	Prazo (meses)	Documentos controlados (unid)	Documentos controlados (GB)
Pública	1.500.000€	Hidráulica - EE/Adução	11	13.627	47,6
Pública	1.200.000€	Hospitalar	8	2.333	4,97
Pública	2.500.000€	Telecomunicações	10	5.625	39,5
Privada	1.500.000€	Laboratório	12	11.218	24,2
Privada	400.000€	Reabilitação Industrial	5	1.500	3,5
Privada	400.000€	Clínica médica	4	4.368	6,8
Pública	300.000€	Hospitalar	4	3.528	6,6
Pública	30.000€	Hospitalar	2	766	1,3

O armazenamento da informação de forma não classificada e de forma individual não garante que a documentação seja rastreável, muito pelo contrário.

Deste modo, para garantir que a informação do empreendimento de construção é corretamente armazenada e gerida, será necessário a implementação de um sistema de armazenamento, local ou remoto, físico ou na nuvem (cloud), com sistemas de segurança e acesso, com chaves de arquivo adequadas à dimensão, complexidade da obra, quantidade de intervenientes, duração e quantidade de documentação produzida.

Um sistema de gestão de informação eficaz é aquele que garante que a documentação ou informação é obtida quase imediatamente por quem pretende ter acesso. Apenas deste modo, será possível a redução de tempos de acesso e melhoria da eficácia na utilização da informação pretendida, bem como da sua integração com a restante informação.

Este mesmo sistema de gestão de informação deve garantir o acesso e distribuição com níveis de responsabilidade para cada interveniente, quer sejam as empresas, quer sejam os técnicos.

3.1 FERRAMENTAS DE CONTROLO COLABORATIVO DE INFORMAÇÃO

Existem no mercado nacional e internacional algumas ferramentas de controlo colaborativo de informação de empreendimentos de construção.

Na ótica de controlo de obra existem ferramentas colaborativas com aplicações próprias e que interagem diretamente com telemóveis, portáteis e “tablets”, facilitando em muito o controlo de qualidade “in situ”. Estas ferramentas podem ser facilmente contratadas através da internet com a criação de contas corporativas ou individuais.

A maioria destas ferramentas são associadas a atividades de obra, na ótica do controlo da qualidade dos trabalhos e do seu progresso. Permitem anotações, criação de documentos específicos na área da qualidade, mas com pouca ou nenhuma integração com as áreas de planeamento e controlo de custos. São ferramentas direccionadas efetivamente para o controlo de execução dos trabalhos nas frentes.

Como exemplos de algumas destas ferramentas colaborativas, apresentam-se de seguida o quadro 2 com a análise realizada pela revista “Forbes” na classificação designada como “Os 6 melhores softwares de gestão de projetos de construção de 2024”

Quadro 2 – "Os 6 melhores softwares de gestão de projetos de construção de 2024" (Fonte: https://www.forbes.com/advisor/business/best-construction-project-management-software/)

Tipologia	Nome	Preço	Capacidade de armazenamento	Integrações Interações	A favor	Contra
Melhor para empreiteiros residenciais	Leap	$79 por utilizador, por mês ($500 implementação	Ilimitado	QuickBooks, Google Workspace, Zendesk	• Custo mensal acessível • Armazenamento ilimitado de arquivos e fotos • Aplicação móvel • Fluxos de trabalho automatizados, e-mails • Proposta, projeto, acompanhamento de estimativa • Tarefa, gestão de trabalho • Faturação • Construtor de modelo de contrato	• Integrações limitadas • Sem teste gratuito
Melhor para coordenação e colaboração	Fieldwire	$0 to $79 por utilizador, por mês (mínimo 12 meses)	Via integrations	Google Drive, Box, Dropbox, OneDrive	• Plano gratuito disponível • Escalável para empresas de qualquer tamanho • Aplicação móvel • Mensagens em tempo real • Tarefa, gestão de trabalho • Carimbos de data e hora e controle de versão para precisão e transparência • Acompanhe listas de pendências • Relatórios personalizados • Gestão de formulários	• O armazenamento de documentos depende de aplicações de terceiros • Relativamente caro em níveis mais altos • Sem lance específico, recursos de gerenciamento de propostas
Mais fácil de usar	Contractor Foreman	$49 to $249 por mês (mínimo 12 meses)	Ilimitado	QuickBooks Online, QuickBooks Desktop	• Teste gratuito disponível • O preço mensal não é por usuário • Fácil de usar • Projetos ilimitados • Armazenamento ilimitado • Faturação incluída • Trabalho, gestão de pedidos de compra • Relatórios personalizados • RFIs, gestão de pedidos de alteração • Gestão de lista de pendências • concurso, gestão de envio	• Integrações contabilísticas disponíveis apenas para planos com preços mais altos • Nenhum portal do cliente no plano Standard
Melhor para gerir todos os aspectos dos negócios	Buildertrend	$449 to $989 por mês (mínimo 12 meses)	Ilimitado	QuickBooks, Xero, Microsoft Outlook, Google Calendar	• Teste gratuito disponível • Ferramentas de pré-venda incluídas • Integre Aplicações de contabilidade, e-mail e calendário • Armazenamento ilimitado • Utilizadores ilimitados • Mensagens em tempo real • Gestão de propostas, pedidos de alteração e faturas • Processamento de pagamento integrado	• Planos caros • UI menos intuitiva • Curva de aprendizagem lenta
Melhor para geração de liderança	Houzz Pro	$85 to $499 por mês (	Ilimitado	QuickBooks, Microsoft Outlook, Google Workspace, Zoom	• Teste gratuito disponível • Planos acessíveis • Ferramentas de marketing • CRM incluído • Planeamento de piso 2D e 3D • Projeto, gestão de tarefas • Colaboração em tempo real • Mensagens do cliente • Propostas, estimativas, gestão de concrusos • Faturação e processamento de pagamentos on-line	• Utilizadores limitados na maioria dos planos • Avaliações mistas de clientes • Pode ser difícil cancelar a assinatura
Melhor para gestão de projetos	monday.com	$0 to $16 por utilizador, por mês (mínimo 12 meses)	500 MB to 1 TB	Google Workspace, Slack, Zapier	• Versão gratuita disponível • Planos acessíveis • Fácil de usar • Rastrear tarefas • Atribui tarefas aos utilizadores • Visualização do progresso do projeto, status das tarefas • Oferece aos clientes acesso de convidados para total transparência	• Armazenamento limitado • Suporte 24 horas por dia, 7 dias por semana, apenas para planos de nível superior • Sem recursos específicos de construção • Nenhuma ferramenta financeira, como concurso, proposta ou faturação

Como se pode verificar, a especificidade da prestação de serviços de fiscalização de obras como pretendido e exigido em Portugal, não é compatível com nenhuma ferramenta generalista de gestão da construção ou de projetos referida.

Assim, poderiam avaliar-se outras ferramentas globais existentes no mercado, mas a maioria irá ser incluída numa das categorias acima indicadas, não sendo customizáveis ao tipo de serviços de fiscalização.

Porém existem algumas ferramentas customizáveis, que permitem a adequabilidade à prestação de serviços de fiscalização de obras no contexto nacional. Destas, podem identificar-se no quadro 3, sem esgotar outras possibilidades, as seguintes.

Quadro 3 – Exemplos de ferramentas informáticas de gestão de empreendimentos customizáveis para prestações de serviços de fiscalização e gestão de contratos

Tipologia	Nome	Preço	Capacidade de armazenamento	Integrações Interações	A favor	Contra
Project Management Office Fiscalização de obras Empreiteiros	PMO ROOTS	Sobconsulta	Ilimitado	Ferramentas de tratamento de texto e de folhas de cálculo	• Totalmente customizável a vários tipos de empreendimentos e níveis de intervenientes (DO/Fiscalização/Empreiteiro) • Armazenamento ilimitado de arquivos e fotos • Aplicação móvel • Fluxos de trabalho automatizados, e-mails • Proposta, projeto, acompanhamento de estimativa • RFI's, gestão de pedidos de alteração • Compatibilização entre planeamento, alterações de projeto, controlo de alterações e trabalhos complementares • Programação por work packages que permite a integração dos processos do empreendimento com base em metodologias de project management consolidadas • Tarefa, gestão de trabalho • Criação e gestão de processo de controlo de obra nas componentes de qualidade, custo, prazos, segurança e ambiente • Construtor de modelo de contrato • Suporte técnico permanente.	• Integrações limitadas • Processo de criação do projeto é complexo e depende do gestor do contrato ROOTS • Sem teste gratuito
Project Management Office Fiscalização de obras Empreiteiros	Aconex	Sobconsulta	Ilimitado	Ferramentas de tratamento de texto e de folhas de cálculo	• Totalmente customizável a vários tipos de empreendimentos e níveis de intervenientes (DO/Fiscalização/Empreiteiro) • Armazenamento ilimitado de arquivos e fotos • Aplicação móvel • Fluxos de trabalho automatizados, e-mails • Proposta, projeto, acompanhamento de estimativa • RFI's, gestão de pedidos de alteração • Criação e gestão de processo de controlo de obra nas componentes de qualidade, custo, prazos, segurança e ambiente • Construtor de modelo de contrato • Suporte técnico permanente.	• Integrações limitadas • Processo de formação da equipa e obrigatoriedade de utilização da ferramenta como transmissor de informação. • Criação do modelo de gestão de informação, modelos de documentação, tipologia e numeração de documentação depende do gestor do contrato/DO. • Processo de criação do projeto é complexo e depende da formação • Sem teste gratuito
Dono da Obra Fiscalização de obras	GCE Gestão contratual de empreitadas	Gratuito projetos da Infraestruturas de Portugal	Ilimitado	Sistema fechado	• Gratuita • Ferramenta informática adaptada à especificidade aos empreendimentos de obra pública rodoviários e ferroviários das Infraestruturas de Portugal • Controlo de custos completo no que se refere a procedimentos públicos • Controlo de prazos	• Sistema de fechado • Permite correções aos dados, mas com dificuldade • Não customizável • Acesso é apenas para prestadores de serviços em empreitadas das Infraestruturas de Portugal S.A. • Não permite a gestão administrativa completa, a gestão de segurança e ambiental

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De uma forma geral não existe ainda em Portugal uma solução global que permita a integração completa com todas as áreas de conhecimento e obrigações da fiscalização no âmbito do mercado português de prestação de serviços.

A multiplicidade de processos e responsabilidades da prestação de serviços de fiscalização de obras, no controlo de toda a informação dos empreendimentos de construção e em todas as suas vertentes gera uma quantidade de registos, que devem ser devidamente organizados e armazenados de forma a poderem ser consultados para suportar e justificar todas as obrigações deste tipo de serviços.

A geração de informação em empreendimentos de construção é crescente e agregadora ao longo do ciclo de vida do empreendimento e depende diretamente, do número de intervenientes, quer instituições quer profissionais, da duração desde a fase da decisão de início até à sua conclusão, do valor e complexidade do empreendimento, entre outros fatores particulares da construção e da sua envolvência e impacto.

Atualmente, em Portugal, grande parte das prestações de serviços de Fiscalização não tem implementado um sistema de gestão de informação global, limitando-se a guardar a informação gerada em servidores internos ou em "Clouds", ou ainda em outros sistemas não parametrizados.

Os atuais programas colaborativos, como se referiu anteriormente, não cobrem a totalidade das áreas de intervenção da Fiscalização. Assim, as ferramentas-padrão identificadas no quadro 2, não parametrizáveis ou com baixa capacidade de parametrização, são vocacionadas para donos de obra, investidores ou mesmo construtores.

O "Leap" é não aborda as áreas do controlo da qualidade em obra e gestão administrativa dos processos da fiscalização, sendo uma ferramenta de gestão de orçamentos e controlo de progresso na ótica do construtor.

O "Fieldwire" apresenta-se como uma ferramenta mais completa, abrangendo grande parte das atividades de fiscalização e controlo de qualidade em obra. Apresenta módulos associados ao projeto

e pedidos de alterações. Também permite a interação de controlo dos trabalhos em obra, através da sua aplicação para ferramentas móveis.

O "Contractor Foreman" apresenta-se como uma ferramenta específica para construtores, mas também para donos de obra. Uma ferramenta que abrange muitas áreas associadas à construção. Apresenta-se como uma das ferramentas mais completas e integradoras, sendo o acesso a estas funcionalidades apenas para planos mais avançados da ferramenta.

A ferramenta "Buildtrend" é específica para construtores, não abrangendo as áreas de competência de donos de obra ou fiscalização.

O "Houzz Pro" é uma ferramenta de gestão de obras vocacionada para a comunicação entre os intervenientes, com uma forte componente na interação entre as partes do processo construtivo. Apresenta a integração do projeto e partilha de informação do progresso através das vias de comunicação. Não apresenta componentes de controlo de qualidade, custos e projeto na ótica da fiscalização.

Por fim, o "Monday" apresenta-se como uma ferramenta de limitada no que se refere às componentes da fiscalização. É mais adequada para a gestão de tarefas, recursos e planeamento macro. A ferramenta tem uma interação em língua portuguesa (BR).

No caso das ferramentas parametrizáveis apresentada no quadro 3, há que referir que alguns dos sistemas apresentados são fechados, como é o caso da ferramenta de Gestão Contratual de Empreitadas (GCE) da empresa Infraestruturas de Portugal, S.A.. Aliás, a empresa Infraestruturas de Portugal, S.A. é um excelente exemplo de sistematização de informação a produzir nas fases de projeto e de construção, também baseado no seu sistema geral rúbricas.

A ferramenta "Aconex Construction Management" da Oracle é um sistema colaborativa que é feito à medida do empreendimento, estando vocacionada para projetos de grande e muito grande dimensão, com necessidade de gerir uma grande quantidade de informação. Necessita de apoio na parametrização inicial e de um esforço acrescido na implementação por todos os intervenientes que ainda não tenham trabalho com o sistema. Por outro lado, após a sua implementação tem a capacidade de gerir toda a informação do projeto, com garantias de rastreabilidade de todos os documentos e dos acessos aos mesmos. Permite classificar documentos e níveis de acesso.

O "PMO ROOTS" pode fornecer dados de gestão, planeamento, risco, rendimentos, custos e qualidade em tempo real, com a segurança das decisões de rastreabilidade e a integridade da informação ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento. Tem a capacidade de ser multi-utilizador, assegurando uma solução para todos os intervenientes. É possível obter relatórios e documentação. Gera, organiza e arquiva a informação não só para as áreas de atuação da fiscalização, como também do dono da obra. O processo de implementação, por regra, necessita do apoio de parametrização dos técnicos da empresa, sendo a criação da estrutura do empreendimento realizada com o apoio técnico especializado.

5 CONCLUSÕES

Existe uma necessidade efetiva de ferramentas colaborativas na área da gestão de contratos e fiscalização de obras no contexto português que possam integrar os processos, os intervenientes, os prazos, o histórico e rastreabilidade documental dos empreendimentos de construção.

Os complexos desafios que Portugal enfrenta e irá enfrentar nos próximos anos, com o desenvolvimento e construção de grandes empreendimentos públicos, obriga a ter ferramentas colaborativas de gestão de informação potentes que permitam o armazenamento, tratamento e distribuição da informação criada ao longo do ciclo de vida destes mesmos empreendimentos.

Essas ferramentas não existem no mercado como soluções "chave na mão". A gestão contratual na ótica do dono da obra, exige o apoio de uma equipa de prestação de serviços de consultoria de engenharia com elevados níveis de qualificação, quer na componente de projeto, quer na componente do acompanhamento da obra, quer igualmente nas competências dos próprios técnicos do dono da obra.

A complexidade, duração e valor dos empreendimentos a implementar em Portugal e a sua especificidade no que se refere à forma de gestão contratual, torna premente o desenvolvimento e implementação de ferramentas informáticas colaborativas feitas à medida ou customizáveis como forma de garantir a implementação desses empreendimentos dentro do prazo e com custos controlados.

Adicionalmente, com a existência de ferramentas de gestão de projectos (design) como o BIM, há igualmente a necessidade de integração destas ferramentas com o controlo do empreendimento, permitindo a avaliação do seu progresso e da conformidade da obra com o projeto.

Deste modo, o desenvolvimento de ferramentas informáticas colaborativas é claramente a área de desenvolvimento futuro no controlo de gestão contratual em empreendimentos de construção públicos e privados. A própria evolução da Inteligência Artificial aplicada a área da gestão de empreendimento, como ferramenta de apoio e melhoria dos processos de controlo, vem reforçar ainda mais a necessidade de evolução dos processos de controlo e acompanhamento de projetos de construção em todas as suas fases e áreas de conhecimento.

Por fim, mas não menos importante, todo o desenvolvimento realizado na desmaterialização dos processos de gestão de empreendimentos através da digitalização tem como consequência uma redução ou completa anulação da necessidade de consumo de materiais físicos, com impacto real na economia e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

MARIN Cosmin (2010). "Comparison on Open-Source Collaborative Project Management Software", Proceedings of the 5th International Conference on Knowledge Management: Projects, Systems and Technologies

https://www.forbes.com/advisor/business/best-construction-project-management-software/, 30/05/2024

https://www.centralgest.com/software/construcao/gestao-de-obras-funcionalidades, 30/05/2024

https://info.cype.com/pt/solucoes/profissionais/gestao/, 30/05/2024

https://www.roots-pm.com/, 30/05/2024

https://www.oracle.com/pt/construction-engineering/aconex/, 30/05/2024

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CHOOSING BY ADVANTAGES METHODOLOGY: UM CASO DE ESTUDO DE COMPARAÇÃO ENTRE ESCADAS TRADICIONAIS E PRÉ-FABRICADAS E SOLUÇÕES DE APOIO

João Pinto[a]; Luis G. Baltazar[b]

[a] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, NOVA FCT, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal, jfr.pinto@alumni.fct.unl.pt

[b] CENIMAT & Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, NOVA FCT, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal, luis.baltazar@fct.unl.pt

RESUMO

A construção em Portugal atravessa um período no qual tem de se transformar, devido à falta de mão de obra qualificada, ao aumento dos custos dos materiais de construção e à necessidade urgente de reabilitação de edifícios e construção de novas habitações. Em regra, no orçamento global de um edifício, 30%-50% dos custos são referentes à mão de obra, o que demonstra a sua importância na atualidade da construção. A construção industrial afigura-se como uma das melhores soluções para fazer face a estas problemáticas, já com resultados práticos otimistas nos mercados nórdicos e asiáticos. A pré-fabricação permite diminuir a quantidade de mão de obra, a redução da duração da construção, redução de custos, desperdícios e aumento do controlo da qualidade. Este estudo tem por objetivo evidenciar as vantagens da pré-fabricação e, em termos práticos, a aplicação da metodologia Choosing By Advantages (CBA) à comparação de escadas tradicionais e pré-fabricadas de um caso de estudo, algo nunca realizado. A metodologia CBA é uma metodologia que permite que a melhor conclusão seja alcançada organicamente com base em factos relevantes e, simultaneamente, possibilita a criação consenso entre stakeholders e especialidades envolvidas na tomada de decisão. Com a aplicação desta metodologia, todas as partes envolvidas ficam a par das decisões tomadas, há conhecimento sobre as alternativas propostas e as suas vantagens, resolvendo, assim, o problema da falta de comunicação e do desconhecimento das decisões tomadas. Dos resultados obtidos concluiu-se que a pré-fabricação apresenta várias vantagens e a CBA permitiu constatar que a melhor solução para o edifício em estudo são Escadas Pré-fabricadas apoiadas na solução de apoio Cast-In+Cantoneira, tanto pelos custos apresentados como pela avaliação de Importance of Advantages (IoA).

Palavras-chave: Pré-fabricação; construção industrializada; choosing by advantages methodology; escadas

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das maiores indústrias com impacto no desenvolvimento das sociedades e com um contributo importante para o crescimento económico de um país [1]. Segundo o Relatório do Setor da Construção em Portugal [2], relativo ao 1º semestre de 2022, a atividade de construção é considerada um dos setores impulsionadores da economia nacional, não só pelo seu peso na criação de riqueza como também de emprego, sendo uma atividade fundamental para o crescimento da economia. A construção pré-fabricada tem sido amplamente defendida em todo o mundo como uma estratégia de produção "limpa" que conduz a menores impactos ambientais no local de trabalho devido à redução dos resíduos de materiais, da poluição do ar e da água, do ruído, e dos custos globais de energia. A União Europeia impôs a redução até 2030 de 50% a 55% das emissões de gases de efeito de estufa (GEE), comparativamente aos níveis de 1990 e, até 2050, atingir a neutralidade climática [3].

A pré-fabricação afigura-se como uma das soluções para o setor da construção na redução de desperdício e de emissões de GEE para a atmosfera. Em contraste com a construção *in situ*, a pré-fabricação envolve a pré-montagem de componentes de estruturas em fábricas ou outros locais de fabrico e o transporte de conjuntos completos ou subconjuntos para o local onde a estrutura vai ser construída [4]. A mão de obra é o esforço físico utilizado na produção de bens e serve para o desenvolvimento da economia, proporcionando facilidades para converter matérias-primas em produtos finais. Uma mão de obra eficiente explora eficazmente os escassos recursos naturais, atua como uma espinha dorsal para o desenvolvimento de qualquer nação. Tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, a parte do trabalho no rendimento nacional tem vindo a diminuir desde a década de 1980 [1]. Em regra, o custo da mão de obra representa entre 30%-50% do orçamento global de um projeto, o que demonstra a sua importância na indústria da construção. Com efeito, a indústria da construção requer mão de obra intensiva, pelo que para obter resultados de qualidade e alcançar o sucesso do projeto, o papel dos trabalhadores não pode ser ignorado, sendo os trabalhadores qualificados essenciais para o sucesso de qualquer projeto. O sucesso do projeto está associado à sua conclusão dentro do prazo e o cumprimento do orçamento estabelecido. A maioria dos projetos de construção ultrapassa o orçamento, principalmente devido a alterações na encomenda, à falta de medidas necessárias ou a alterações nos preços ao longo do tempo [1].

Assim, dada a escassez de mão de obra qualificada que se regista em Portugal, este trabalho tem como objetivo mostrar as vantagens da pré-fabricação relativamente à construção tradicional e aplicar a metodologia Choosing By Advantages (CBA) na comparação de escadas utilizando diferentes métodos construtivos. A CBA, como se poderá verificar adiante, aliada à pré-fabricação, têm potencial para resolver os problemas de mão de obra qualificada, a falta de comunicação que existe entre os stakeholders e, ainda, acabar com as frequentes derrapagens orçamentais.

2 METODOLOGIA E VANTAGENS DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A metodologia seguida neste trabalho é composta por cinco etapas conforme ilustrado na Figura 1. A primeira etapa corresponde à determinação do objetivo desta investigação. Após identificação do problema, realizou-se, na segunda etapa, uma revisão da literatura referente ao tema deste trabalho. Ao explorar este tema, pretende-se compreender o que é a pré-fabricação, o que esta implica e quais as suas vantagens relativamente à construção tradicional. Ainda dentro desta etapa, procurou-se uma metodologia que permitisse comparar alternativas construtivas para um projeto escolhido a montante. A metodologia de revisão envolveu a recolha, triagem e avaliação crítica da literatura. A base de dados 'Web of Science' foi utilizada para reunir artigos direcionados para a revisão da literatura. Apenas artigos com revisão por pares, livros, artigos técnicos e teses foram considerados. Estes artigos foram depois analisados um por um

para compreender todos os aspetos abordados e resumidos. Por fim, todos os resumos foram categorizados com base nas secções do presente artigo. De notar que muita da literatura provém do continente asiático. Tal deve-se ao facto de a pré-fabricação estar presente na cultura deste continente há muitas décadas, havendo, por isso, mais informação disponível relativamente a este tema.

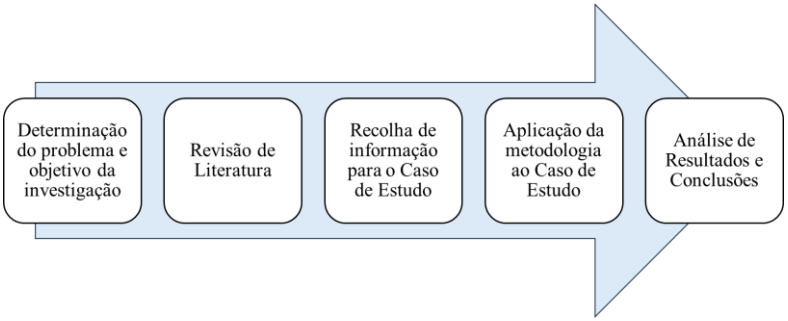


Figura 1 – Metodologia adotada.

A terceira etapa contempla a informação recolhida para o Caso de Estudo, que levou à recolha de informação sobre o edifício em estudo, permitindo a compreensão do funcionamento da máquina que produz as escadas pré-fabricadas, o tipo de escadas que eram possíveis aplicar naquele projeto e que soluções de apoio disponíveis no mercado. A quarta etapa consiste na aplicação da metodologia CBA à comparação das escadas construídas de forma tradicional e escadas construídas via pré-fabricação.

Por último, a quinta etapa resulta numa reflexão sobre a análise de resultados obtidos pela metodologia CBA e, consequentemente, apresentam-se as principais conclusões desta investigação. Atualmente, a pré-fabricação, ao contrário da construção no local da obra, refere-se à tecnologia de construção que consiste em produzir vários elementos estruturais do edifício ou dos projetos civis em fábricas fora do local e, em seguida, transportar os elementos acabados para o local de construção, para montagem no local exato do projeto.

Através da revisão da literatura efetuada, realizou-se um levantamento das principais vantagens apresentadas pelos diferentes autores e resultantes dos questionários / entrevistas realizadas a Arquitetos, Projetistas, Engenheiros e outras pessoas envolvidas na área da construção civil. No Quadro 1 é possível identificar os benefícios da pré-fabricação elencados na literatura em relação à construção tradicional.

Quadro 1 – Vantagens da pré-fabricação em relação à construção tradicional

Vantagens	Menções na literatura	Ref. bibliográficas
Planeamento	14	[5, 6 – 18]
Controlo da Qualidade	14	[5, 6 – 14, 17 – 20]
Redução de Desperdícios	13	[5, 8, 11, 17, 19, 20]
Redução de Custos	11	[5, 6 – 16, 19, 20]
Redução da Pegada de Carbono	8	[7 – 12, 15 – 17, 19, 21]
Produtividade	6	[5, 15 – 17, 19, 20]

2.1 PLANEAMENTO

A construção pré-fabricada pode ser uma opção fundamental para os casos em que os prazos de construção são inflexíveis, como no sector da educação, ou para projetos em locais ativos (por exemplo, uma extensão de um complexo hospitalar com a construção de um novo edifício) [22]. Uma das grandes vantagens da

construção pré-fabricada é permitir que o projeto e subsequente fabrico decorram em simultâneo e em paralelo com outras atividades, como ilustrado na Figura 2.

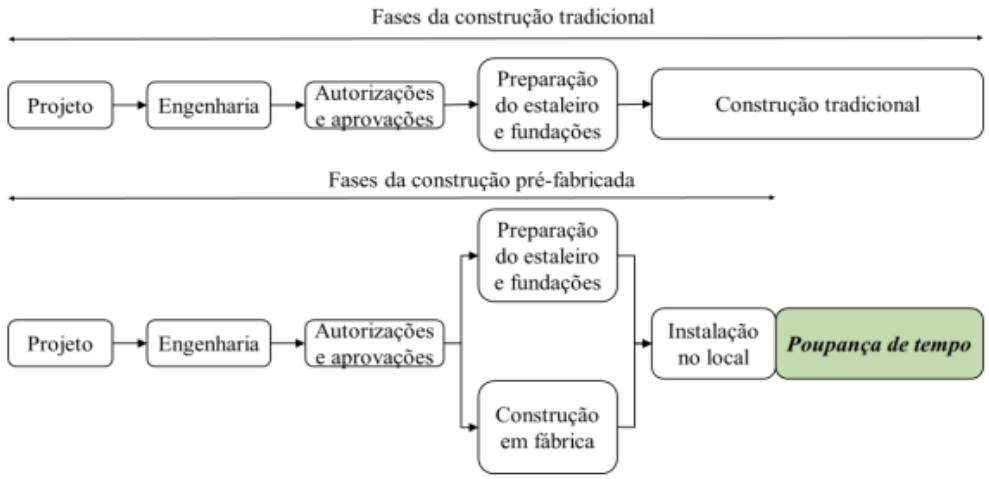


Figura 2 – Poupança de tempo na pré-fabricação. Adaptado de [22].

Sendo o trabalho em estaleiro tradicionalmente vulnerável a atrasos devidos às condições atmosféricas, que constituem um dos parâmetros mais variáveis do planeamento construtivo e um dos fatores que mais afeta as atividades de construção no local, a utilização de elementos pré-fabricados permite reduzir o risco de atrasos e assegurar as exigências do projeto [21, 22]. Na construção pré-fabricada, o risco de atrasos devido a condições climatéricas extremas, vandalismo e roubo no local é mínimo [22], reduzindo também as perturbações, como poeiras ou ruído, para quem reside ou trabalha nas imediações da obra. Reduzir a duração da obra é um dos maiores benefícios da construção pré-fabricada. A redução do tempo de construção no local tem um grande impacto na duração global de todo o projeto. A construção pré-fabricada pode poupar cerca de 40% do tempo de construção em comparação com a construção tradicional [21]. A filosofia Just-in-Time (JIT), também usualmente conhecida como "Toyota Production System", significa que o número necessário de componentes pré-fabricados é entregue no local de montagem para instalação no momento necessário [23]. Com os objetivos otimizados, os pré-fabricados devem ser entregues JIT, ou seja, o material certo chega na quantidade certa, no momento certo e no local certo [7]. Esta filosofia tem como objetivo a inexistência de stock. Os trabalhadores devem ser envolvidos nesta filosofia, de modo que se possa conseguir uma melhoria continua nos métodos e processos produtivos [21].

2.2 CONTROLO DA QUALIDADE

A construção baseada em elementos de betão pré-fabricados é uma revolução na indústria da construção, na qual os princípios da industrialização são adotados no processo de construção [24, 25]. Além disso, a utilização de elementos de betão pré-fabricados conduz a um ambiente de construção mais limpo e seguro. Estudos efetuados revelaram que o custo médio das obras de reparação causadas por defeitos de construção é de 5% dos custos totais de construção [26]. Nos últimos anos, os Terrestrial Laser Scanners (TLS) ganharam popularidade, uma vez que são capazes de adquirir dados de medição de alcance a alta velocidade e com elevada precisão. Devido a estas vantagens, o TLS tem sido utilizado para a avaliação da qualidade de estruturas civis, incluindo a medição da deformação da estrutura [26] e a identificação e quantificação de eventuais danos numa ótica de controlo de qualidade [24].

2.3 REDUÇÃO DE DESPERDÍCIOS

A produção de resíduos em obras pode estar principalmente relacionada com a seleção do método de construção, a disponibilidade de instalações de triagem e reciclagem no local para resíduos de construção e ao nível da educação e formação dos trabalhadores. Mudanças de última hora devido aos requisitos do cliente e mudanças de projeto são das principais causas de desperdício. A pré-fabricação surge como uma solução vantajosa para combater as principais causas de desperdício durante a construção. A Figura 3 pretende comparar o ciclo de vida dos resíduos nas cofragens quando se usa construção *in-situ* e quando se usa a pré-fabricação.

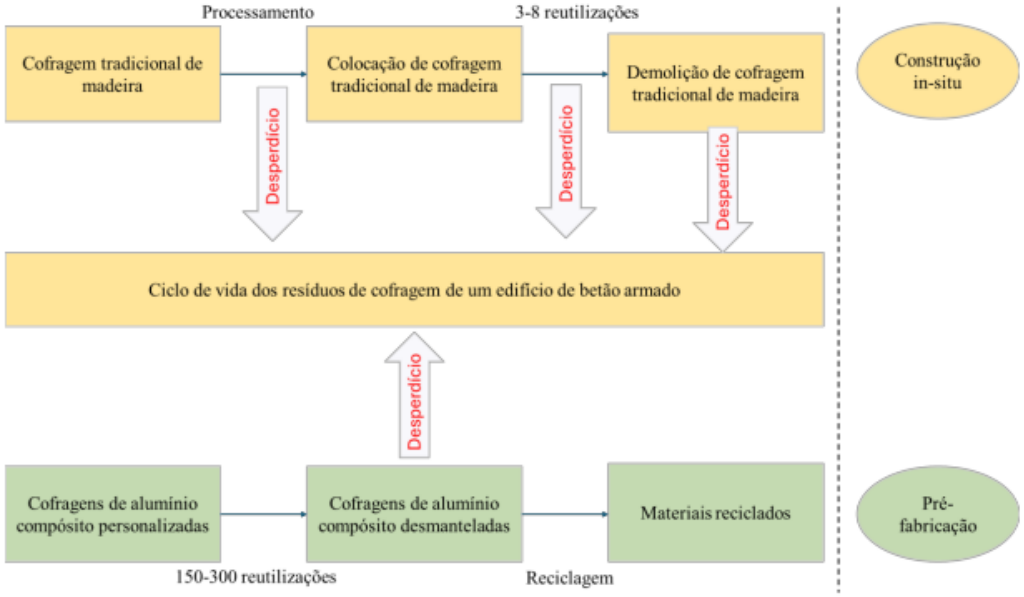


Figura 3 – Ciclo de vida dos resíduos de cofragem num edifício de betão armado. Adaptado de [27].

Em elementos construtivos com geometrias mais complexas, como as escadas, as cofragens tradicionais de madeira são normalmente aplicadas nos métodos tradicionais de construção no local. É inevitável gerar resíduos durante este processo devido aos excedentes de materiais resultantes de erros de planeamento e de operação. As cofragens tradicionais de madeira têm uma vida útil curta. Depois de serem reutilizadas 3 a 8 vezes, estas cofragens têm de ser desmanteladas devido à sua grande deformação. Poucas cofragens tradicionais de madeira são recicladas devido ao seu baixo valor e às dificuldades de limpeza [27]. Para a pré-fabricação, os elementos de betão são fabricados utilizando cofragens industriais em fábricas, com um ambiente normalizado e controlado. Estudos indicaram que, na pré-fabricação, o tempo de vida das cofragens metálicas são normalmente de 150 a 300 vezes superiores às cofragens tradicionais [27]. Por conseguinte, a pré-fabricação tem um elevado potencial de redução dos resíduos de cofragem [27].

2.4 REDUÇÃO DE CUSTOS

A pré-fabricação permite aliviar problemas da falta de mão-de-obra qualificada. Comparada com a construção tradicional, a construção pré-fabricada necessita de menor quantidade de mão-de-obra em estaleiro, devido ao conteúdo mais reduzido e simplificado de trabalho. Para além disso, a mão-de-obra utilizada na montagem é geralmente mais qualificada, com outro tipo de comportamento e mais eficiente. É possível aumentar a produtividade sem que isso corresponda a um aumento de mão-de-obra, utilizando a pré-fabricação [21].

2.5 REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO

O Acordo de Paris apela a uma ação global para atingir o "pico" dos GEE o mais rapidamente possível e alcançar a "neutralidade carbónica" a partir de 2050 [28]. Embora a construção seja amplamente considerada como uma indústria pilar para muitas economias, é também uma das principais responsáveis pela contribuição para a degradação ambiental. Entre muitos fatores, como as emissões de GEE, de partículas, a poluição sonora e o consumo de recursos naturais não renováveis, os resíduos de construção são um dos principais contributos para o elevado impacto ambiental da construção [29]. A nível da UE, segundo dados de 2020, o setor da construção é responsável por mais de 35 % da produção de resíduos na UE e estima-se que 5 a 12 % das emissões nacionais de GEE sejam provenientes da extração de materiais, do fabrico de produtos de construção, da construção e da reabilitação de edifícios. A utilização da pré-fabricação num determinado empreendimento permite reduzir o tempo de trabalho em estaleiro, ou seja, o impacto do mesmo no meio ambiente também ocorre durante menos tempo. Na pré-fabricação, ao aliar um controlo de qualidade rigoroso com uma redução dos desperdícios produzidos, é possível reduzir os GEE prejudiciais ao meio ambiente [21].

3 CHOOSING BY ADVANTAGES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tradicionalmente, no sector da construção, considera-se que as decisões são tomadas de forma subconsciente e com base em algumas vozes influentes. Faz parte da cultura tomar decisões rapidamente e com confiança. Por enquanto, a tomada de decisão é prejudicada por não haver as pessoas certas na sala, por falta de comunicação e partilha de informação e por um mal-entendido de perspetivas diferentes durante e após as tomadas de decisões, o que causa dilemas na compreensão do resultado das decisões. Tradicionalmente, as equipas têm dificuldade em tomar decisões em conjunto e os projetos são frequentemente afetados devido à falta de clareza sobre como avançar [30]. Os Multi-Criteria Decision Making (MCDM) são utilizados para ajudar indivíduos ou equipas de projeto a escolher a melhor alternativa tendo em conta múltiplos fatores. Tradicionalmente, os métodos MCDM baseiam-se no método da soma. Estes métodos têm sido aplicados a vários tipos de decisões de conceção em projetos de Arquitetura, Engenharia e Construção [31].

3.2 PORQUÊ UTILIZAR A CHOOSING BY ADVANTAGES E EM QUE SITUAÇÕES?

A Choosing By Advantages (CBA) é um método MCDM colaborativo, que visa obter um consenso entre as partes interessadas relativamente à alternativa mais vantajosa quando as alternativas incorporam vários fatores [30, 31]. A CBA cria um processo de decisão aberto, transparente e auditável para trabalhos de conceção e construção que reconhece a complexidade da maioria dos projetos e dos clientes que os encomendam [32].

A CBA pode ser aplicada em inúmeras situações, como por exemplo:

- Na decisão de apresentação (ou não) de uma proposta ou aceitação de um contrato;
- Seleção e gestão de projetos e programas;
- Na escolha entre soluções concorrentes para projetos rodoviários e ferroviários;
- Seleção de consultores, empreiteiros e fornecedores;
- Seleção e compra de materiais, equipamento e outros produtos;
- Na escolha de a combinação de alternativas de projeto.

3.3 VANTAGENS DA CBA

Diferentes estudos já demonstraram que a CBA conduz a conversas construtivas, menos frustração durante a tomada de decisão, confiança no resultado da decisão e é rastreável para uma parte não envolvida. Além disso, a documentação transparente da decisão ajuda a criar um entendimento partilhado e um ambiente de confiança [33]. Por último, a CBA demonstrou reduzir o tempo de decisão em grupo [31]. De acordo com Arroyo [30], a CBA é o melhor método de tomada de decisão multicritério porque proporciona transparência através da criação de uma lógica partilhada para a decisão e diferenciar o "valor" do custo, cria consenso, evita conflitos desnecessários e é um método que beneficia a aprendizagem contínua. A CBA ajuda as partes interessadas a compreenderem o valor das alternativas a partir de fatores sociais, ambientais e técnicos antes de avaliarem o custo. Deste modo, as características de sustentabilidade são abordadas corretamente e a decisão não se baseia apenas no custo. Finalmente, o método CBA utiliza uma análise de custo vs. valor para encontrar a melhor alternativa que se enquadra no orçamento do projeto. Este método separa o valor do custo, o que é recomendado quando a equipa de conceção tem de avaliar os aspetos ambientais e sociais [34].

3.4 APLICAÇÃO DA CBA ÀS ESCADAS TRADICIONAIS VS ESCADAS PRÉ-FABRICADAS

O método de decisão CBA fornece uma forma estruturada e transparente de tomar decisões e utiliza um vocabulário definido para que um grupo possa formular e discutir com base numa compreensão partilhada [30]. No Quadro 2 apresenta um glossário de termos relevantes para compreensão do método de decisão CBA [31].

Quadro 2 – Glossário e conceitos para aplicação da CBA. Adaptado de [33].

Glossário	Definição
Alternativa	Opções a considerar pelo método. São necessárias pelo menos duas Alternativas para que seja necessário tomar uma decisão.
Fator	Uma propriedade de uma Alternativa que é importante para a decisão. Os Fatores podem ser sociais ou ambientais. No entanto, a CBA não inclui o custo como Fator, uma vez que é incluído na etapa final do método CBA.
Critério	O Critério de "procura" que define um determinado valor ou conjunto de valores que são preferidos para um Fator. O critério "deve ter" especifica os valores que um Fator deve ter para que essa Alternativa seja considerada viável.
Caraterística	Qualidade ou Caraterística que pertence a uma Alternativa.
Vantagem	A diferença entre duas Alternativas quando as suas Caraterísticas são comparadas.

Com base no glossário e tendo sempre em mente os seus conceitos, é possível desenvolver os 7 Passos que compõem a aplicação da metodologia CBA [31, 34 - 39]:

- **Passo 1**: Identificar as Alternativas que serão consideradas no processo de decisão;
- **Passo 2**: Definir os Fatores que vão ser avaliados. Um Fator deve ser uma caraterística das Alternativas consideradas. O custo não é incluído como um fator na CBA;
- **Passo 3**: Definir o Critério que fornece as regras de avaliação dos fatores;

- **Passo 4**: Descrever as Caraterísticas das Alternativas. Cada Alternativa tem uma Caraterística que corresponde a cada Fator;

- **Passo 5**: Decidir as Vantagens de cada Alternativa. Os intervenientes escolhem a Alternativa menos preferida para cada opção e, em seguida, indicam a Vantagem de cada Alternativa em comparação com a escolha menos preferida;

- **Passo 6**: Os intervenientes decidem, em colaboração, a Importance of Advantages (IoA). Em primeiro lugar, identificam a vantagem mais importante para cada fator e, em seguida, selecionam a vantagem principal. A vantagem principal é pontuada numa escala de 0-100 com o valor máximo (100) e as vantagens dos outros fatores são pontuadas de forma decrescente ao longo da mesma escala. Devido à subjetividade da IoA, esta é a parte mais desafiadora do processo, então recomenda-se aderir a três princípios ao determinar a IoA:
    - Nada tem vantagem 0, então fatores sem importância não são classificados como tendo vantagem 0;
    - A escala de IoA para todas as alternativas deve ser a mesma;
    - Besiktepe, D. et al. [39] sugere que seja adotada uma escala de IoA de quartis (0, 25, 50 e 100) para distinguir melhor as Caraterísticas de nível médio (50 e 75). Uma vez avaliados todos os fatores para cada alternativa, as IoA são somadas para cada alternativa. Quanto mais elevada for a pontuação, mais vantajosa é a alternativa;

- **Passo 7**: Avaliar os dados relativos aos custos, se aplicável. Para completar esta tarefa, é desenvolvido um gráfico que inclui o IoA no eixo Y e o Custo no eixo X. As partes interessadas decidem sobre a alternativa preferida considerando a IoA decidida anteriormente e o orçamento financeiro disponível.

Os 7 Passos para aplicação da metodologia CBA encontram-se resumidos na Figura 4.

Figura 4 – Os 7 Passos para aplicação da CBA. Adaptado de [34].

Assim, a IoA atribuída no Quadro 3 foi realizada com base na experiência e conhecimento empírico de cinco Engenheiros, pertencentes ao Grupo Casais e CNT Europe e, no início da discussão, foi decidido que se adotaria a escala de IoA de quartis (0, 25, 50 e 100), dado que existiam alguns Fatores em consideração e para garantir que se distinguiam as Caraterísticas de nível médio (50 e 75), como sugere Besiktepe, D. et al. [39].

Quadro 3 – Avaliação de IoA para cada Alternativa de Escadas.

Fator (Critério)	Alternativa 1: Escada Tradicional	IoA	Alternativa 2: Escada Pré-Fabricada	IoA
Coordenação de trabalho (Fluxo de trabalho é melhor)	Caraterística: Mais trabalhadores no mesmo local. Vantagem: -		Caraterística: Menos trabalhos de natureza diferente, minimiza a necessidade de coordenar diferentes tipos de trabalhadores. Vantagem: Menos trabalhadores no mesmo local. Fluxo de trabalho mais eficiente.	75
Mão de Obra Especializada (Quanto menos necessário for, melhor)	Caraterística: Necessita de mão de obra especializada. Vantagem: -		Caraterística: Reduz a dependência de mão de obra especializada, a execução das escadas requer trabalhos mais simples e repetitivos. Vantagem: Necessita de menos mão de obra especializada para produção de escadas pré-fabricadas.	75
Condições de Trabalho (Quanto melhores as condições, melhor)	Caraterística: Os trabalhadores estão expostos a condições climáticas não controláveis. Vantagem: -		Caraterística: Os trabalhadores estão dentro de uma fábrica, não estão expostos às condições climatéricas exteriores. Vantagem: Os trabalhadores não estão expostos à chuva, frio, calor, vento e humidade indesejada.	25
Segurança (Quanto mais seguro, melhor)	Caraterística: A cofragem é inclinada e há trabalhos a decorrer sobre a cofragem (colocação de aço, movimentação de pessoas). Perigo constante. Vantagem: -		Caraterística: As atividades são realizadas de forma diferente, há mais segurança e menos exposição a riscos constantes. Vantagem: Os riscos são mitigados porque a escada é produzida em fábrica e em ambientes controlados, há menos trabalhos em altura e menos atividades com perigo constante.	25
Flexibilidade do Projeto (Quanto mais flexível, melhor)	Caraterística: O projeto não está 100% fechado no início da obra e é flexível a alterações. Vantagem: O projeto pode ser alterado ao longo do tempo, enquanto a Alternativa 2 limita alterações após a definição final do projeto.	50	Caraterística: O projeto tem de estar definido no início da obra e não permite alterações. Vantagem: -	
Planeamento (Quanto mais rápido, melhor)	Caraterística: Construção em obra é mais lenta. Vantagem: -		Caraterística: Construção off-site é mais rápida. Vantagem: Mais rápido do que a Alternativa 1, permite um planeamento mais preciso e antecipação de trabalhos.	100
Produção (Quanto mais rápido, melhor)	Caraterística: Só é possível produzir o elemento após início do piso superior. Vantagem: -		Caraterística: A produção e a construção no local ocorrem em simultâneo, sem conflitos. Vantagem: A produção é em massa, otimização do planeamento e reduz a possibilidade de atrasos em obra.	50
Controlo da betonagem (Quanto maior o controlo, melhor)	Caraterística: A betonagem está dependente das condições climatéricas e é um momento de perigo dado que o gruista não tem visão dentro do núcleo das escadas. Vantagem:-		Caraterística: Em fábrica, a betonagem ocorre à temperatura desejada e ocorre independentemente das condições meteorológicas exteriores. Vantagem: A betonagem ocorre em condições mais controladas do que a Alternativa 1.	75
Controlo de Qualidade (Mais controlo é melhor)	Caraterística: O controlo de qualidade é realizado. Vantagem:-		Caraterística: Em fábrica, sabe-se exatamente o tipo de betão e aço utilizado em cada elemento (etiquetagem). Capacidade em manter um registo eficaz. Vantagem: O controlo de qualidade é mais fácil e eficaz do que a Alternativa 1.	75
Acabamentos (Quanto menos trabalho, melhor)	Caraterística: A escada precisa de betonilha, revestimento cerâmico, reboco nas faces expostas e pintura. Vantagem: -		Caraterística: A escada não necessita de acabamentos, são facultativos. Vantagem: Após descofragem, o acabamento da escada fica "liso", permite um acabamento com betão à vista, eliminando a necessidade de trabalhos adicionais.	75
Sustentabilidade (Quanto menores os desperdícios, melhor)	Caraterística: Há desperdícios de cofragem de madeira, betão, aço, betonilhas, colas e revestimento cerâmico. Vantagem: -		Caraterística: A cofragem é reutilizável e produz-se a quantidade exata. Vantagem: Os desperdícios são menores que na Alternativa 1.	75
Transporte (Quanto mais próximo do local da obra, melhor)	Caraterística: A escada é produzida e apoiada on-site, no local exato. Vantagem: Não necessita de transportes adicionais.	75	Caraterística: A escada é produzida off-site, necessita de transporte para a obra. Vantagem: -	
Total de IoA:		125		650

De modo a facilitar o cálculo dos custos, considerou-se que todos os lanços de escadas tinham 9 degraus e que o total de lanços correspondia a 42 (21 no núcleo do edifício e 21 no outro núcleo). Para terminar o Passo 7 da metodologia, foram definidos quatro Fatores monetários para determinação dos custos de produção. São então os custos dos Materiais, Mão de obra, Logística e Fornecimento de materiais. Os custos para cada um destes Fatores monetários nas Escadas Tradicionais e Pré-fabricadas estão apresentados no Quadro 4, bem como a diferença de custos entre as soluções.

Quadro 4 – Resumo dos custos para cada um destes Fatores monetários e a diferença de custos entre as soluções analisadas (dados fornecidos pela construtura do caso de estudo).

Custo Total (€)						
Fatores monetários	**Escadas Tradicionais**	**Escadas Pré-fabricadas sem revestimentos**	**Δ (%)**	**Escadas Tradicionais**	**Escadas Pré-fabricadas com revestimentos**	**Δ (%)**
Material	60 923,91 €	1 965,39 €	97	60 923,91 €	45 098,72 €	26
Mão de obra	15 382,00 €	21 290,00 €	28	15 382,00 €	21 290,00 €	28
Logística	2 310,00 €	15 187,30 €	85	2 310,00 €	15 187,30 €	85
Fornecimentos	28 880,01 €	27 423,68 €	5	28 880,01 €	27 423,68 €	5
TOTAL	107 495,93 €	65 866,37 €	39	107 495,93 €	108 999,70 €	1

Com base nestes valores, é possível traçar o gráfico (Passo 7) que encerra a aplicação da metodologia. Como se pode ver pela Figura 5, no eixo x encontra-se o custo total de cada Escada e no eixo y encontra-se o somatório de IoA de cada Escada.

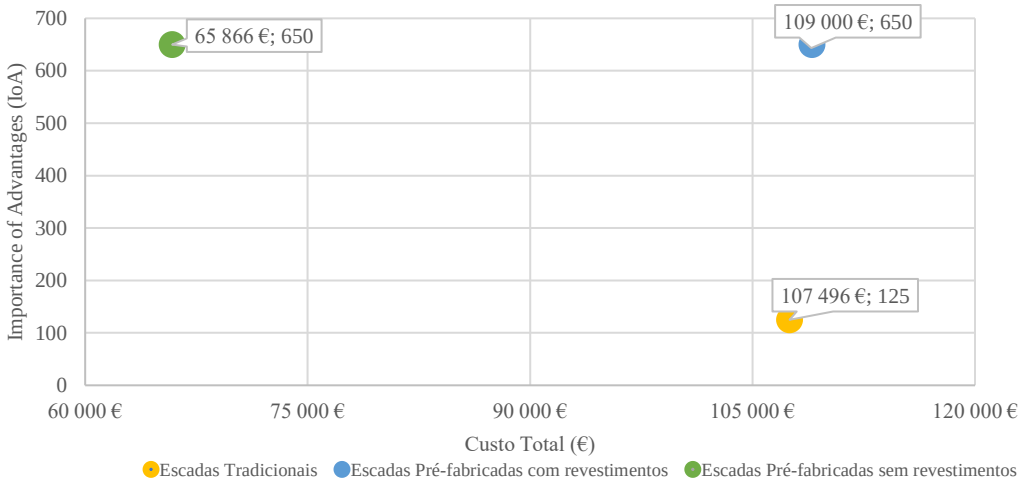


Figura 5 – Custo-Benefício das soluções analisadas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Uma "Alternativa" é tanto melhor quanto mais próxima da origem do eixo x (custo) e quanto mais afastada da origem do eixo y (IoA) se encontrar. Como se pode observar pela Figura 5, conclui-se que a melhor Alternativa para o projeto em Estudo são as Escadas Pré-fabricadas, porque são aquelas que apresentam o menor custo e a maior IoA. O motivo pelo qual a análise separou as Escadas pré-fabricadas com e sem revestimentos é simples: depende do tipo de projeto em que se está a aplicar as Escadas. Neste caso,

tratou-se de um Hotel com 10 pisos, servidos de elevadores, pelo que as Escadas, praticamente, só serão utilizadas em situações excecionais, em que os elevadores não estejam em funcionamento. Aqui justifica-se as Escadas Pré-fabricadas não tenham revestimentos. No caso de se tratar de outro tipo de projeto, em que fosse necessário colocar revestimentos dada a utilização regular das Escadas, aí já faria sentido entrar com o custo dos revestimentos nas Escadas Pré-fabricadas, até mesmo do ponto de vista de proteção estrutural das Escadas.

O custo das Escadas Pré-fabricadas com revestimentos aumentou de 65.866€ para 109.000€, ou seja, a Alternativa das Escadas Pré-fabricadas com revestimentos seria cerca de 40% mais dispendiosa, como se pode observar no Quadro 4, e que as Escadas Pré-fabricadas com revestimentos é 1% mais cara do que as Escadas Tradicionais. Quanto à IoA, mantém-se a avaliação de 650 pontos para as Escadas Pré-fabricadas e 125 pontos para as Escadas Tradicionais. Apesar do custo das Escadas Pré-fabricadas com revestimentos ser mais cara do que as Escadas Tradicionais, as vantagens são, claramente, maiores nas Escadas Pré-fabricadas, pelo que a conclusão a retirar é optar pelas Escadas Pré-fabricadas, independentemente da aplicação (ou não) dos revestimentos, por ser mais vantajoso do que as Escadas Tradicionais.

Da aplicação da metodologia Choosing by Advantages (CBA) à comparação de Escadas Tradicionais e Pré-fabricadas, concluiu-se que esta metodologia ajuda as partes interessadas a criar consenso entre eles e a tomar decisões, mesmo que nem todos concordem a 100% com o que ficou decidido. No final, todos percebem qual foi a solução eleita para cada uma das comparações e quais os motivos que levaram a essa decisão.

5 CONCLUSÕES

A pré-fabricação pode ser a solução para o problema da falta de mão de obra, assim como para uma maior generalização de técnicas construtivas mais sustentáveis como a construção híbrida (betão armado e madeira) e a construção em madeira. Da literatura recolhida, resultaram vantagens claras, tais como a redução de custos, redução da duração da obra, redução da pegada de carbono, redução de desperdícios, aumento do controlo de qualidade e aumento da produtividade. Os custos de construção a longo prazo podem ser reduzidos, mesmo que o custo inicial de construção seja maior. Para uma melhor implementação da pré-fabricação, deve considerar-se logo na fase inicial do projeto. A construção fora do estaleiro tem também um fator de previsibilidade, sendo que a redução do tempo de construção equivale a poupanças de custos. A partir do momento que se construam edifícios recorrendo à pré-fabricação e se demonstrem as suas vantagens, haverá uma mudança no paradigma da construção em Portugal, terminando com a crença que afasta a pré-fabricação de Portugal.

A aplicação da filosofia JIT e a implementação do BIM de forma transversal a todas as especialidades envolvidas na construção também demonstram ser opções a ter em consideração para o futuro da construção em Portugal. No que respeita à aplicação da metodologia CBA, concluiu-se que esta ajuda as partes interessadas a criar consenso entre eles e a tomar decisões, mesmo que nem todos concordem a 100% com o que ficou decidido. No final, todos sabiam qual foi a solução eleita e quais os motivos que levaram a essa decisão. A aplicação da CBA ajuda a eliminar alguns dos problemas que foram referidos como entraves à pré-fabricação, como a “falta de comunicação”, o “conservadorismo” na adoção da pré-fabricação e o “congelamento do projeto” assim que este fica fechado, de forma a não existirem alterações posteriores.

Verificou-se que, no caso de estudo, as Escadas Pré-fabricadas arrecadaram um total de IoA igual a 650 pontos contra as Escadas Tradicionais, que somaram 125 pontos. A vantagem principal das Escadas Pré-fabricadas acontece no Fator “Planeamento”, dado que a pré-fabricação permite um planeamento mais preciso, antecipação de trabalhos e atividades a decorrer em simultâneo em obra e fábrica. O custo das 42

Escadas Pré-fabricadas sem revestimentos totalizou 65.866€ contra 107.496€ das Escadas Tradicionais, o que resulta numa diminuição dos custos de produção de, aproximadamente, 39%. Já as Escadas Pré-fabricadas com revestimentos têm um valor de 109.000€, o que representa um aumento de custos igual a 1% relativamente às Escadas Tradicionais. Assim, concluiu-se que a melhor Alternativa para este projeto seriam Escadas Pré-fabricadas, independentemente da decisão de aplicar, ou não, revestimentos.

O presente estudo permitiu, por um lado colmatar a escassa literatura em português alusiva às vantagens da pré-fabricação. Por outro lado, evidenciou as vantagens da metodologia Choosing By Advantages na construção que, apesar de já ter sido aplicada à comparação de sistemas AVAC, casas de banho modulares, nunca tinha sido aplicada a Escadas Tradicionais e Pré-fabricadas. Com efeito, a aplicação desta metodologia ao caso estudo afigura-se como uma possível forma de resolver problemas tais como a desorganização de informação, falta de comunicação e discórdia na tomada de decisão, servindo de referência para projetos futuros.

REFERÊNCIAS

1. W. S. Alaloul, M. A. Musarat, M. S. Liew, A. H. Qureshi, e A. Maqsoom, «Investigating the impact of inflation on labour wages in Construction Industry of Malaysia», Ain Shams Engineer-ing Journal, vol. 12, n. 2, pp. 1575–1582, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.08.036.
2. Direção Financeira de Estudos e de Estratégia, «Relatório do Setor da Construção em Portugal», Lisboa, Dez. 2022.
3. M. Panagiotidou, L. Aye, e B. Rismanchi, «Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets», Energy Build, vol. 252, p. 111385, Dez. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111385.
4. J. Xu, M. Ye, W. Lu, Z. Bao, e C. Webster, «A four-quadrant conceptual framework for analyz-ing extended producer responsibility in offshore prefabrication construction», J Clean Prod, vol. 282, Fev. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124540.
5. E. Attouri, Z. Lafhaj, L. Ducoulombier, e B. Linéatte, «The current use of industrialized con-struction techniques in France: Benefits, limits and future expectations», Clean Eng Technol, vol. 7, p. 100436, Abr. 2022, doi: 10.1016/J.CLET.2022.100436.
6. A. J. S. Magalhães, «A pré-fabricação em betão em Edifícios», Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, Porto, 2013.
7. Y. Zhai, R. Y. Zhong, e G. Q. Huang, «Towards Operational Hedging for Logistics Uncertainty Management in Prefabrication Construction», IFAC-PapersOnLine, vol. 48, n. 3, pp. 1128–1133, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.IFACOL.2015.06.235.
8. X. Hu, H.-Y. Chong, X. Wang, e K. London, «Understanding Stakeholders in Off-Site Manu-facturing: A Literature Review», J Constr Eng Manag, vol. 145, n. 8, Ago. 2019, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001674.
9. R. Leite, «Métodos Construtivos de Edifícios - Comparação entre Pré-Fabricação e Construção Tradicional em Betão Armado», 2015.
10. S. Navaratnam, A. Satheeskumar, G. Zhang, K. Nguyen, S. Venkatesan, e K. Poologanathan, «The challenges confronting the growth of sustainable prefabricated building construction in Australia: Construction industry views», Journal of Building Engineering, vol. 48, p. 103935, Mai. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103935.
11. W. Zhang, M. W. Lee, L. Jaillon, e C. S. Poon, «The hindrance to using prefabrication in Hong Kong's building industry», J Clean Prod, vol. 204, pp. 70–81, Dez. 2018, doi: 10.1016/J.JCLE-PRO.2018.08.190. 134
12. A. Zolghadr, E. Gharaie, e N. Naderpajouh, «Barriers to innovation in the housing sector: Eco-nomic justifiability of offsite construction for housebuilders», Journal of Building Engineering, vol. 52, p. 104490, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104490.
13. P. Wu, Y. Xu, R. Jin, Q. Lu, D. Madgwick, e C. M. Hancock, «Perceptions towards risks in-volved in off-site construction in the integrated design & construction project delivery», J Clean Prod, vol. 213, pp. 899–914, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.226.
14. W. Lu, K. Chen, F. Xue, e W. Pan, «Searching for an optimal level of prefabrication in construc-tion: An analytical framework», J Clean Prod, vol. 201, pp. 236–245, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.319.
15. J. O. Choi, X. Bin Chen, e T. W. Kim, «Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment», International Journal of Construction Management, vol. 19, n. 2, pp. 93–105, Mar. 2019, doi: 10.1080/15623599.2017.1382093.
16. P. K. Priya e M. Neamitha, «A Review on Precast Concrete», International Research Journal of Engineering and Technology, 2018. Disponível em: www.irjet.net

17. M. Patel e S. Razavialavi, «Decision Factors for the Feasibility Study of Developing Prefabrica-tion Plants», 2022.
18. X. Hu, H. Y. Chong, e X. Wang, «Sustainability perceptions of off-site manufacturing stake-holders in Australia», J Clean Prod, vol. 227, pp. 346–354, Ago. 2019, doi: 10.1016/J.JCLE-PRO.2019.03.258.
19. P. F. Rocha, N. O. Ferreira, F. Pimenta, e N. B. Pereira, «Impacts of Prefabrication in the Build-ing Construction Industry», Encyclopedia, vol. 3, n. 1, pp. 28–45, Dez. 2022, doi: 10.3390/en-cyclopedia3010003.
20. B. Qi, M. Razkenari, J. Li, A. Costin, C. Kibert, e S. Qian, «Investigating U.S. industry practi-tioners' perspectives towards the adoption of emerging technologies in industrialized construc-tion», Buildings, vol. 10, n. 5, Mai. 2020, doi: 10.3390/BUILDINGS10050085.
21. J. A. Costa, «Construção Prefabricada - Análise da Utilização da Prefabricação nas Várias Etapas do Processo Construtivo», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013. Dis-ponível em: http://www.fe.up.pt
22. M. Kamali e K. Hewage, «Life cycle performance of modular buildings: A critical review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 62, pp. 1171–1183, Set. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.05.031.
23. L. Wang, Y. Zhao, e X. Yin, «Precast production scheduling in off-site construction: Mainstream contents and optimization perspective», J Clean Prod, vol. 405, p. 137054, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.137054.
24. Q. Wang, M. K. Kim, J. C. P. Cheng, e H. Sohn, «Automated quality assessment of precast concrete elements with geometry irregularities using terrestrial laser scanning», Autom Constr, vol. 68, pp. 170–182, Ago. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.03.014.
25. M. K. Kim, Q. Wang, J. W. Park, J. C. P. Cheng, H. Sohn, e C. C. Chang, «Automated dimen-sional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM», Autom Constr, vol. 72, pp. 102–114, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.08.035.
26. M. K. Kim, J. C. P. Cheng, H. Sohn, e C. C. Chang, «A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser scanning», Autom Con-str, vol. 49, pp. 225–238, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2014.07.010.
27. B. Cheng et al., «BIM-enabled life cycle assessment of concrete formwork waste reduction through prefabrication», Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 53, Out. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102449.
28. Y. Teng, K. Li, W. Pan, e T. Ng, «Reducing building life cycle carbon emissions through pre-fabrication: Evidence from and gaps in empirical studies», Build Environ, vol. 132, pp. 125–136, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2018.01.026.
29. W. Lu e H. Yuan, «Investigating waste reduction potential in the upstream processes of offshore prefabrication construction», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 28, pp. 804–811, Dez. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.08.048.
30. P. Arroyo, A. Schöttle, R. Christensen, e C. Arthur, «CBA as a Differentiator to Win Projects in Pursuit: A Case Study», em Proc. 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), International Group for Lean Construction, Jul. 2022, pp. 844–854. doi: 10.24928/2022/0196.
31. P. Arroyo, C. Mourgues, F. Flager, e M. G. Correa, «A new method for applying choosing by advantages (CBA) multicriteria decision to a large number of design alternatives», Energy Build, vol. 167, pp. 30–37, Mai. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.031.
32. A. Mossman, «Choosing By Advantages», The Change Business Ltd., pp. 1–4, 2012, doi: 10.13140/2.1.1402.5609.
33. A. Schöttle, R. Christensen, e P. Arroyo, «Does choosing by advantages promote inclusiveness in group decision-making?», em 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2019, The International Group for Lean Construction, Jul. 2019, pp. 797–808. doi: 10.24928/2019/0209.
34. C. Pérez, P. Arroyo, C. Richards, e C. Mourgues, «Residential curbside waste collection pro-grams design: A multicriteria and participatory approach using choosing by advantages», Waste Management, vol. 119, pp. 267–274, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.08.055.
35. D. Murguia e X. Brioso, «Using "choosing by Advantages" and 4D Models to Select the Best Construction-Flow Option in a Residential Building», em Procedia Engineering, Elsevier Ltd, 2017, pp. 470–477. doi: 10.1016/j.proeng.2017.07.226.
36. K. Chauhan, A. Peltokorpi, R. Lavikka, e O. Seppänen, «To prefabricate or not? A method for evaluating the impact of prefabrication in building construction», Construction Innovation, 2022, doi: 10.1108/CI-11-2021-0205.
37. H. H. Goh et al., «Application of choosing by advantages to determine the optimal site for solar power plants», Sci Rep, vol. 12, n. 1, Dez. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-08193-1.
38. D. Besiktepe, M. E. Ozbek, e R. A. Atadero, «Choosing by Advantages Application Areas in Facilities Management: A Literature Review», em IOP Conference Series: Earth and Environ-mental Science, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1176/1/012028.
39. D. Besiktepe, M. E. Ozbek, e R. A. Atadero, «A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Building Maintenance Strategy Selection using Choosing by Advantages», Journal of Facility Management Education and Research, vol. 5, n. 1, pp. 1–12, Jan. 2021, doi: 10.22361/2474-6630-5.1.1. 139

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO POTENCIAL DE INTERFACE DO BIM COM AS DISCIPLINAS DA MATRIZ CURRICULAR DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO IFPB

Jorge Luiz Martins Maciel[a]; Evelly de Souza Lira[b]; Maria Mikaelly Lisboa Fernandes[c]; Cicero Joelson Vieira Silva[d]

[a] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Cajazeiras, Rua José Antônio da Silva 300, 58900-00, Cajazeiras, Brasil, jorge.martins@academico.ifpb.edu.br

[b] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Cajazeiras, Rua José Antônio da Silva 300, 58900-00, Cajazeiras, Brasil, evelly.lira@academico.ifpb.edu.br

[c] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Cajazeiras, Rua José Antônio da Silva 300, 58900-00, Cajazeiras, Brasil, lisboa.mikaelly@academico.ifpb.edu.br

[d] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Cajazeiras, Rua José Antônio da Silva 300, 58900-00, Cajazeiras, Brasil, cicero.viera@ifpb.edu.br

RESUMO

A metodologia BIM (Building Information Modeling) ou Modelagem da Informação da Construção, tem mostrado cada vez mais a sua indispensabilidade no setor da construção civil, proporcionando uma série de benefícios que abarcam não somente a fase de elaboração de projetos e análises de viabilidade, mas também compreendem todo o ciclo de vida das edificações. Contudo, a implementação da metodologia ainda ocorre de maneira deficitária no Brasil, problema originado na formação acadêmica dos profissionais, uma vez que as Instituições de Ensino Superior (IES) com cursos de engenharia civil e arquitetura do país não possuem o BIM incorporado de maneira consolidada nas suas matrizes curriculares. Destarte, no Campus Cajazeiras do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), o cenário não é diferente do restante do país. Desse modo, a presente pesquisa busca analisar o potencial de interface do BIM com as disciplinas da matriz curricular vigente do curso de engenharia civil do IFPB - Campus Cajazeiras. A metodologia utilizada para a análise dos componentes curriculares foi a proposta por Checcucci. Os dados e informações obtidos e examinados permitiram a classificação das 78 disciplinas em 3 grupos, conforme o seu potencial, sendo: sem interface com o BIM (37,18% do total), com provável interface (11,54%) e com interface clara (51,28%). Ademais, os resultados mostraram que a grade curricular supracitada possui grande interface com o BIM e que, ocorrendo desdobramentos tendo como base as informações da presente pesquisa, bem como a adoção de um plano de implantação BIM, toda a comunidade acadêmica e local será beneficiada, fato ocasionado por uma formação mais sólida e efetiva dos profissionais em desenvolvimento na instituição.

Palavras-chave: BIM, Engenharia Civil, Matriz Curricular, IFPB.

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo avanço tecnológico vem sofrendo, nas últimas décadas, um aumento significativo na construção civil, dada a necessidade de inovações e melhorias na produtividade (Pereira, 2022). Na década de 1980, a tecnologia Computer Aided Design (CAD) revolucionou o modo de projetar na construção civil, tornando o processo manual totalmente computadorizado (Nunes e Leão, 2018).

Na sequência, ainda na década de 80, outra tecnologia surge e promove mais avanços no processo de elaboração de projetos de engenharia e arquitetura: o BIM (Building Information Modeling), que pode ser definido como "Representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação, que contém todas informações do ciclo de vida da construção, disponíveis em projeto." (Gonçalves Jr, 2018).

Logo, a elaboração dos projetos de arquitetura e engenharia se tornam mais completos e funcionais, intensificando a adoção da metodologia BIM nas corporações do setor AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações) para elaboração dos seus projetos. Essa tecnologia promoveu o avanço tecnológico para as construtoras e escritórios de engenharia e arquitetura, garantindo a melhoria da coordenação de projetos e a associação eficaz do projeto com a construção (Pereira, 2022).

No âmbito legislativo, de acordo com Nascimento (2021), importantes marcos regulatórios do BIM surgiram apenas em 2018, e tais regulamentações exprimem a intenção do governo brasileiro em promover a eficiência, a transparência e a sustentabilidade por meio da adoção dessa tecnologia (Santos, 2024).

Com isso, cresceu no mercado a procura de profissionais capacitados para esta área e para atender tal demanda torna-se necessário que haja a implementação desta tecnologia nos cursos de graduação de engenharia e arquitetura (Rosa, 2023).

No entanto, Barison e Santos (2011) apontam diversas dificuldades que estão atreladas à implementação do BIM nas Instituições de Ensino Superior, enfatizando que: "os cursos não encontram um espaço no currículo para alocar uma nova matéria". Desta forma, para encontrar meios de enfrentar essas dificuldades, torna-se imprescindível conhecer e analisar a matriz curricular do curso no qual se deseja implementar essa tecnologia, identificando as disciplinas que possuem interface com o tema e a necessidade de criação de novos componentes curriculares, dessa maneira, o processo de implementação BIM torna-se mais preciso e eficaz.

Dado o exposto, o presente estudo pretende analisar a implementação e integração do BIM no curso de Bacharelado em Engenharia Civil de uma Instituição de Ensino Superior (IES) na cidade de Cajazeiras, estado da Paraíba, Brasil. Tornando-se de fundamental importância, não só por questões metodológicas, mas também para a compreensão ampla do conhecimento tecnológico no desenvolvimento de projetos e sua contribuição para a disputa de qualificação profissional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BIM

A metodologia BIM pode ser entendida como "uma filosofia de trabalho integrada", que proporciona a facilidade de reunir diferentes profissionais e dados técnicos, através de uma representação virtual (Pereira, 2022). Para Nunes e Leão (2018), essa tecnologia revolucionou a forma de projetar, apesar do CAD, mesmo sendo passível de falhas, ter sido de grande importância para o avanço do setor da construção civil.

Nesse sentido, “o BIM não se trata apenas de evolução tecnológica, mas sim de uma revolução metodológica, ou seja, uma nova metodologia de projeto introduzida no mercado da construção.” (Lopes, 2022). Assim, esta metodologia muda inteiramente a forma como as empresas se organizam, principalmente no que se refere aos processos e às tecnologias de desenvolvimento de projetos dentro das corporações.

2.2 IMPLEMENTAÇÃO BIM NO BRASIL

No Brasil, a metodologia emergiu no início dos anos 2000, sendo o Cristiano Ceccato um dos pioneiros, que em 2002 fundou a empresa Gehry Technologies, voltada para esse mercado (Figuerola, 2011). Nesse contexto, um dos principais desafios apontados pelos engenheiros e arquitetos que iniciavam a implementação em seus escritórios era o elevado custo de treinamento do pessoal e dos softwares, além de que, não havia facilidade de comunicação com outros escritórios já que muitos ainda não tinham aderido à tecnologia (Menezes, 2011).

Entretanto, apenas em 2010 a metodologia começou a ganhar importância. Landim (2020) evidencia que a exigência do uso de BIM iniciou-se com as licitações públicas em 2011, sendo a Petrobrás a primeira a solicitar para os projetos da obra da Unidade Operacional da Bacia de Santos, sede do pré-sal. Posteriormente, outros órgãos públicos brasileiros aderiram às mesmas exigências em licitações.

Alguns atos foram cruciais para o desenvolvimento desse processo, o primeiro foi o n° 9.377, de 17 de maio de 2018, que posteriormente foi revogado e substituído pelo Decreto 9.983/2019, e recentemente recebeu uma nova substituição pelo decreto 11.888/2024, no qual o Governo Federal do Brasil institui a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM, que objetiva “promover um ambiente adequado ao investimento em BIM e sua difusão no país” (Brasil, 2024). Outro foi o Decreto 10.306/2020, que estabelece a “utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal,” em alinhamento à Estratégia BIM BR.

2.3 IMPLEMENTAÇÃO BIM NAS IES

A respeito da implementação da metodologia nas IES, Barison e Santos (2011) ressalta duas principais dificuldades que causam entraves para o avanço, sendo elas: “a falta de compreensão dos conceitos básicos e escassez de professores que dominem o assunto”.

Lopes (2022), destaca que o atraso da discussão sobre ensino e aprendizado de BIM, não está presente só no Brasil, permeia por todo o mundo, citando como exemplo um estudo realizado em universidades da Nova Zelândia, onde há um certo ceticismo sobre a inclusão do BIM no currículo e o quanto de ênfase para esse estudo deveria ser aplicado. Ele ainda enfatiza que o BIM deve ser integrado a outras disciplinas dentro da grade curricular e não ser tratado como disciplina isolada.

A respeito da escassez de corpo docente qualificado, segundo Lopes (2022) cabe às universidades oferecer mecanismos e dispor recursos para a formação e atualização tecnológica de professores, não sendo uma questão eficiente a substituição dos discentes já alocados.

No Brasil, apesar das dificuldades apresentadas, muitas universidades já adotaram o BIM como parte do currículo (Landim, 2020). Rosa (2023) menciona em seu trabalho que o BIM é algo relativamente novo no âmbito educacional brasileiro e ainda destaca que as universidades brasileiras adotam como modelo de implementação a adoção integrada envolvendo disciplinas técnicas e a adoção pontual que abrange apenas algumas disciplinas do currículo.

2.4 CÉLULAS BIM

Grupos compostos por professores e alunos de uma instituição de Ensino caracterizam o que é chamado de Células BIM, onde todos partem do propósito de desenvolver e estabelecer um Plano de Implementação de BIM curricular (PIBc), em um ou mais cursos do instituto atrelado ao Projeto Construa Brasil (Ruschel e Ferreira, 2022). Desse modo, a partir da aplicação dessas Células é possível realizar o mapeamento de maturidade da metodologia dentro das instituições, além de verificar o potencial de incorporação desta tecnologia nas matrizes curriculares dos cursos abordados.

Nesse ínterim, é importante citar a existência da Associação de Tecnologia no Ambiente Construído (ANTAC) que, através da Rede de Células BIM ANTAC, tem a finalidade de elevar a adoção da tecnologia BIM nas IES (Checcucci e Melo, 2022). De acordo com Ruschel e Ferreira (2022), esta rede possui boa visibilidade no total universal de cursos de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, representando cerca de 6,98% e 11,76%, respectivamente.

Assim sendo, o processo sugerido por tal Rede tem trazido muitos benefícios para os cursos nos quais é aplicada, visto que tem-se conseguido desenvolver ações que devem impactar positivamente os mesmos, como por exemplo, a produção de materiais didáticos produzidos pelas Células, que deverá ser propagado em todo o Brasil (Checcucci e Melo, 2022).

2.5 IMPLEMENTAÇÃO BIM NO INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA

Muitas dificuldades são avistadas para implementação da metodologia no Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Rosa (2023) destaca que, os principais obstáculos encontrados são: “a qualificação do corpo docente e a falta de espaço na grade curricular”, ressaltando ainda que não há um modelo de implementação do BIM na Instituição, ocorrendo apenas “implementações empíricas” e que a tecnologia fica restrita dentro da comunidade acadêmica.

Em contrapartida, Farias et al. (2023) trazem soluções praticamente direcionadas aos problemas supracitados. No trabalho, a célula BIM do IFPB campus João Pessoa, com a colaboração do corpo docente do instituto, realizaram uma análise do potencial de interface BIM com os componentes curriculares do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, a fim de contribuir para a reformulação do Plano de Projeto Curricular do referido curso para o ano de 2024. Assim, de acordo com os autores, a abordagem realizada possibilitou concluir que “é possível inserir o BIM no curso de graduação de engenharia civil do IFPB aproveitando os componentes curriculares já existentes”.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utilizou o método proposto por Checcucci (2014) e adaptado no âmbito dos trabalhos das Células BIM (Checcucci, 2014; Rodrigues e Lima, 2017; Andrade, 2018) para a identificação da potencial interface com BIM da matriz curricular do curso de engenharia civil do Campus Cajazeiras do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). A metodologia em questão consiste em uma pesquisa aplicada, exploratória e descritiva e de abordagem quali-quantitativa, utilizando-se da revisão bibliográfica e análise documental.

A priori analisou-se o Projeto Pedagógico do Curso (PPC) para coletar informações como: a matriz curricular, carga horária, ementas, entre outros. Posteriormente, avaliou-se cuidadosamente as ementas de cada componente curricular baseando-se nas 8 categorias descritas no método supracitado, conforme a Figura 1.

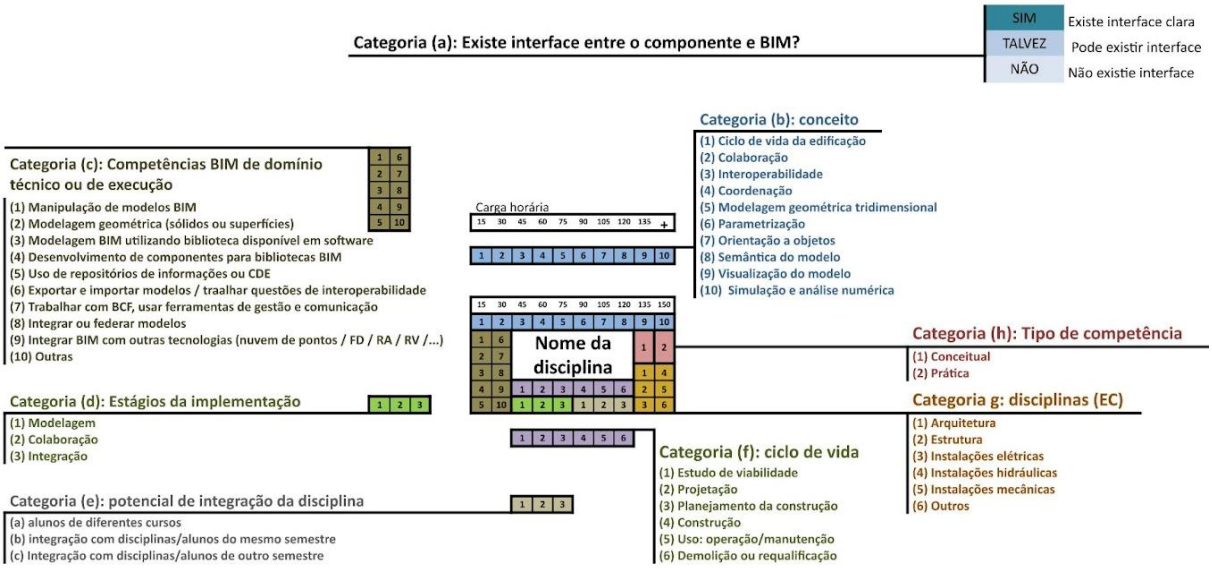


Figura 1 – Caixa de análise de disciplinas

A primeira categoria (A) investiga se existe interface entre a disciplina e o BIM. Já na categoria B, observa-se qual conceito relacionado ao BIM pode ser abordado no componente curricular. Em seguida, competências BIM de domínio técnico ou de execução são avaliados (categoria C). Analisa-se também os estágios da implementação BIM passíveis de serem trabalhados (D), o potencial de integração do componente curricular com outros cursos, disciplinas, alunos e semestres (E), o ciclo de vida de uma edificação que pode ser tratado nela (F), além das disciplinas de projetos da construção civil que podem ser trabalhados na disciplina em um contexto BIM (categoria G), e por fim, o tipo de competência (H), onde verifica-se a possibilidade de uma abordagem teórica ou prática na disciplina das questões ligadas ao BIM.

Cada caixa de análise é preenchida graficamente por disciplina, onde cada núcleo de conteúdo recebe uma cor que varia sua tonalidade (clara, média e escura) conforme a interface do componente curricular com o BIM. Desse modo, inicialmente, toda a caixa da disciplina é preenchida com a cor que representa o núcleo de conteúdo na tonalidade clara, exceto a linha superior que representa a carga horária, nesse caso, preenche-se apenas da primeira célula à esquerda (17 h/a) até a célula com a carga horária correspondente (33, 50, 67 ou 83 h/a).

Avaliando-se a ementa do componente curricular conforme o grau de interface com o BIM da disciplina (categoria A), altera-se a cor das células da carga horária e da central da caixa, ou seja, aquela no qual consta o nome da disciplina. Se não houver interface com o BIM, a cor das referidas células permanece clara, sendo assim, o preenchimento gráfico da caixa da disciplina é finalizado e passa-se para a análise de outro componente curricular, uma vez que a análise não pode prosseguir para as demais categorias. Se pode haver a interface, a cor é trocada para o tom médio. Por fim, se existe interface, a cor é substituída pelo tom escuro.

Havendo a interface evidente ou possível da disciplina com BIM, avalia-se as demais categorias e segue-se com o preenchimento gráfico. Cada categoria é delimitada na caixa de análise e conta com diferentes números de células conforme as opções de respostas possíveis (Figura 1), por exemplo, a categoria B possui 10 células dispostas horizontalmente imediatamente abaixo da linha de carga horária, portanto, havendo a evidente (tom escuro) ou possível (tom médio) interface, preenche-se a

célula relacionada ao conceito na mesma cor e tonalidade da célula central e de carga horária. Aplica-se o mesmo para as demais categorias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, verificou-se que a matriz curricular do curso de engenharia civil do Campus Cajazeiras do IFPB está dividida em 3 núcleos de conteúdos: básicos, profissionalizantes e específicos. Para cada núcleo de conteúdo foi definida uma cor base de acordo com os níveis de interface, conforme a legenda disponível na Figura 2. Além disso, observou-se a carga horária prevista para as disciplinas, que pode ser de 33, 50, 67 e 83 horas/aula. Conforme o PPC do curso, todas as disciplinas do Núcleo de Conteúdos Básicos são obrigatórias, totalizando 1.484 horas. As disciplinas do Núcleo de Conteúdos Profissionalizantes também são obrigatórias, com um total de 683 horas. Por fim, as disciplinas do Núcleo de Conteúdos Específicos correspondem a 1.694 horas, sendo 1.434 horas de disciplinas obrigatórias e no mínimo 200 de disciplinas optativas.

Figura 2: Legenda de cores utilizadas

Após a confecção das caixas de análise dos componentes curriculares, uma análise geral da matriz curricular do referido curso foi realizada. Das 78 disciplinas investigadas, obrigatórias e optativas, constatou-se que 40 delas possuem uma interface clara com o BIM, ou seja, a maior parte das disciplinas (51,28%). Enquanto isso, 9 possuem uma possível interface com BIM, a depender do enfoque dado aos professores responsáveis pela disciplina, representando assim, 11,54% do total. 29 disciplinas foram constatadas como não possuindo qualquer interface possível com o BIM (37,18%).

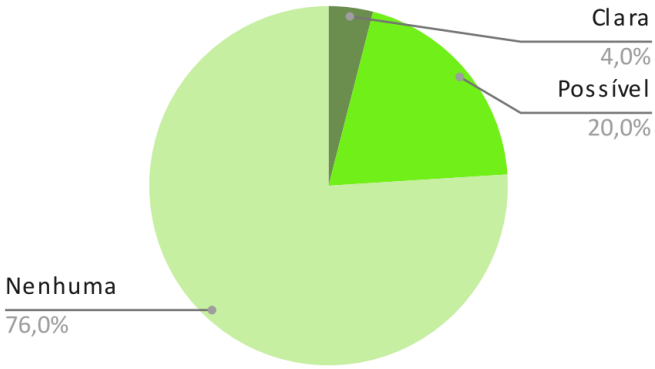


Figura 3: Gráfico de interface por disciplinas do núcleo de conteúdos básicos

Seguindo para uma análise das disciplinas por núcleo de conteúdo, observa-se que das 25 disciplinas do Núcleo de Conteúdos Básicos, 19 não possuem interface alguma com BIM (76,0%), em cinco (5) é possível, e apenas uma (1) possui interface clara. Isso se deve ao fato de a maioria dos componentes

desse núcleo serem de cunho estritamente teórico, voltados à ciências exatas, dificultando uma possível ligação com a tecnologia. A Figura 3 demonstra graficamente os resultados mencionados.

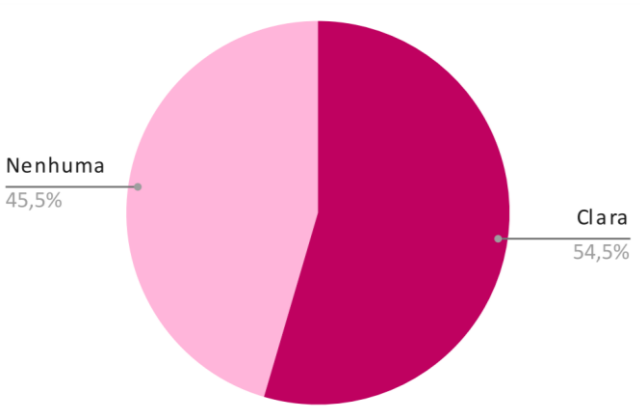


Figura 4: Gráfico de interface por disciplinas do núcleo de conteúdos profissionalizantes

Já no Núcleo de Conteúdos Profissionalizantes, nota-se que nenhuma das 11 disciplinas possui possível interface, isto é, ou existe ligação clara ou não tem nenhuma. Sendo assim, as cinco (5) que não possuem interface alguma representam 45,5% do total, enquanto a maior porcentagem (54,5%) possui clara interface, diferindo completamente da distribuição dos conteúdos básicos. Assim, temos a Figura 4 com um gráfico da interface BIM com as disciplinas do referido núcleo de conteúdo.

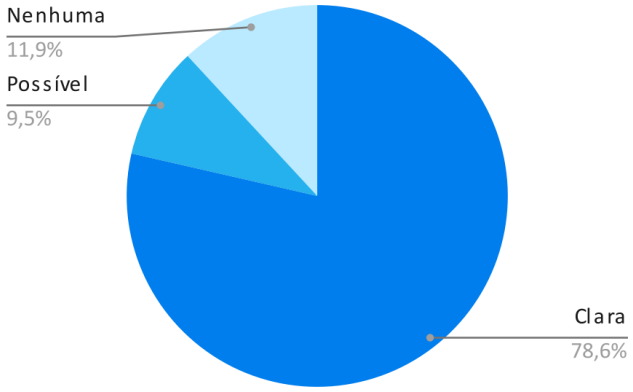


Figura 5: Gráfico de interface por disciplinas do núcleo de conteúdos específicos

No caso dos conteúdos específicos, estes superam ainda mais a quantidade de disciplinas com interface clara com a metodologia, em comparação ao gráfico que trata dos conteúdos profissionalizantes, representando 78,6% do total, o que equivale a 33 das 42 disciplinas, conforme a Figura 5. Além disso, quatro (4) ainda possuem possível interface e apenas cinco (5) não apresentam nenhuma.

Observando-se o quadro com as disciplinas do 1º ao 5º período (Figura 6) é notório que a maior parte das que são classificadas em conteúdos básicos não possui interface com BIM, o que dispensa a análise das demais categorias, neste caso. Apenas Desenho Técnico manifesta clara ligação com a tecnologia, por tratar de assuntos mais voltados à modelagem da construção. Em contrapartida, os conteúdos dos núcleos profissionalizante e específico apresentam clara interface, com exceção de apenas duas (2) disciplinas, Mecânica Geral e Geologia Aplicada, pertencentes ao núcleo profissionalizante, que tratam da parte mais teórica voltada às ciências exatas.

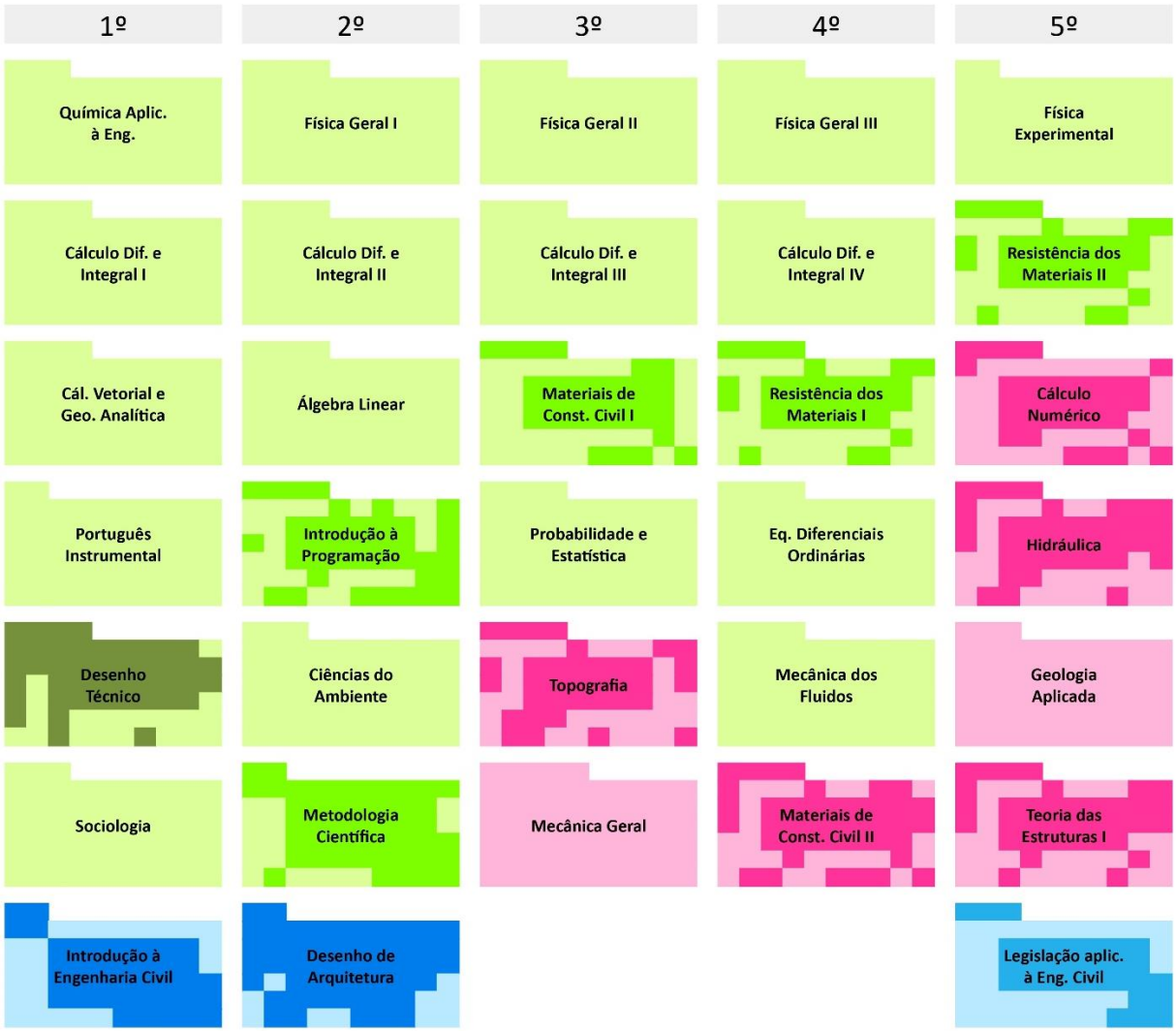


Figura 6: Quadro de análise de disciplinas do 1º ao 5º período

Nas disciplinas do 6º ao 10º período (Figura 7), a distribuição é semelhante à descrita no parágrafo anterior: na divisão dos conteúdos básicos, Engenharia Econômica e Administração e Empreendedorismo não possuem nenhuma interface, enquanto que dos conteúdos profissionalizantes, apenas as disciplinas de Circuitos Elétricos, Mecânica dos Solos I e Hidrologia estão na tonalidade clara. Já nos conteúdos específicos, praticamente todos possuem clara interface com BIM, com exceção somente do componente curricular Teoria das Estruturas II, que ainda sim, tem possível interface.

De modo geral, para as disciplinas obrigatórias, observa-se que os principais conceitos BIM (categoria B) a serem abordados na disciplina são: ciclo de vida da edificação, modelagem geométrica tridimensional, visualização do modelo e simulação e análise numérica. Para a categoria C, que trata das competências BIM de domínio técnico ou de execução, constatou-se que a modelagem geométrica (sólidos ou superfícies) está presente na maior parte das disciplinas com interface BIM. Quanto aos estágios da implementação BIM (categoria D), a modelagem apareceu majoritariamente nas disciplinas, colaboração em apenas algumas, e integração apenas na disciplina optativa de gerenciamento de projetos e nas de TCC.

Figura 7: Quadro de análise de disciplinas do 6º ao 10º período

Conforme a categoria E, que trata do potencial de integração do currículo, observou-se que as disciplinas da matriz curricular possuem boa integração com alunos de diferentes cursos, com disciplinas e alunos do mesmo semestre e de outros semestres. Estudo de viabilidade e projetação estiveram presentes na maior parte dos componentes curriculares no qual o ciclo de vida das edificações poderia ser abordado (categoria F). As disciplinas de arquitetura e estrutura foram as que mais possuíam ligação com os componentes curriculares vistos (categoria G), embora também se observou, em menor quantidade, instalações elétricas e hidrossanitárias. Por fim, no tocante a categoria H, notou-se que é possível abordar tanto questões teóricas quanto práticas nas disciplinas analisadas.

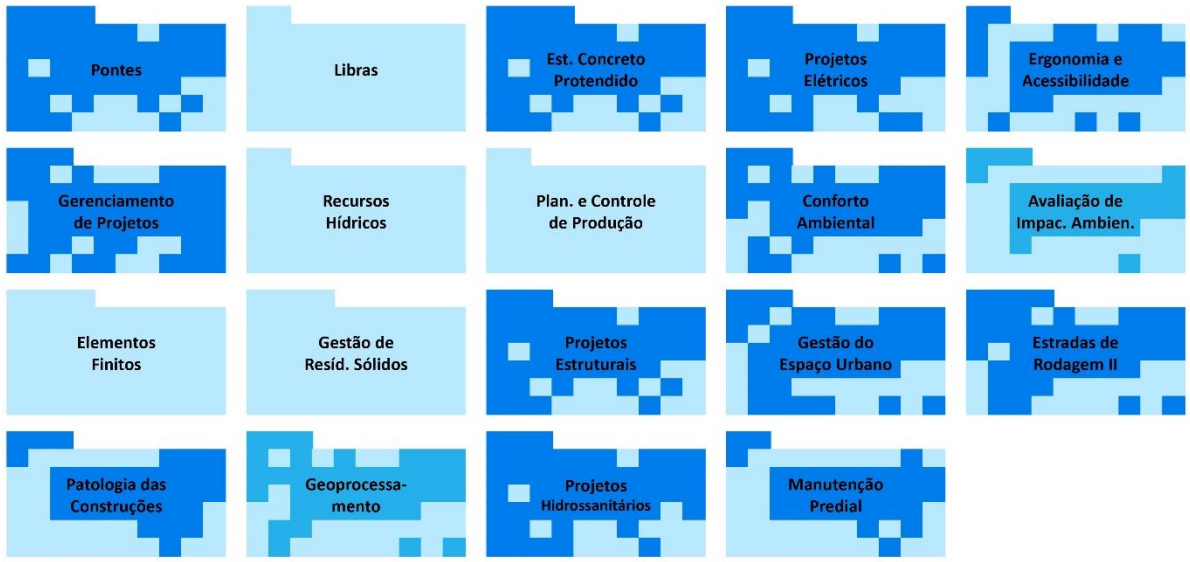


Figura 8: Quadro de análise das disciplinas optativas

Por fim, conforme a Figura 8, das 19 disciplinas optativas, estando todas classificadas em conteúdos específicos, 12 possuem clara interface, representando a maioria, e apenas duas (2) tem possível ligação. Além disso, ainda tem-se cinco (5) componentes sem ligação alguma. Assim, pode-se identificar que a tecnologia pode ser bem trabalhada no conjunto de disciplinas optativas, já que em sua maioria possuem de alguma forma interface com o BIM, tornando a formação dos estudantes mais completa, no entanto, o PPC do curso só prever o cumprimento obrigatório de 200h para estas, resultando em 4 a 5 disciplinas, correspondendo apenas a aproximadamente 26% das disciplinas optativas.

5 CONCLUSÕES

Finalizada a análise tratada neste trabalho, voltando-se agora para a questão quantitativa, foi possível constatar que das 78 disciplinas estudadas, 40 possuem interface clara com BIM, representando 51,28%, enquanto 9 possuem uma possível interface com BIM (11,54%), totalizando 49 disciplinas com algum potencial BIM, ou seja, representam 62,82% do total, ademais as disciplinas do Núcleo Profissional Essencial apresentam maior interface BIM. Assim, é nítido que há oportunidade clara de inserção da tecnologia no Instituto Federal da Paraíba - Campus Cajazeiras, podendo-se desenvolver atividades diversificadas ao se considerar que cada componente curricular possui um leque de possibilidades em temas a serem integrados com plataformas BIM.

Em vista disso, destaca-se que a grande quantidade de disciplinas com possível interface BIM demonstra que a matriz curricular existente apresenta oportunidades de inserção da metodologia sem necessariamente demandar a reformulação do PPC para a inclusão de novas disciplinas. Constatou-se, por exemplo, que as disciplinas com interface BIM estão presentes desde os primeiros semestres do curso, inclusive naquelas que compõem o núcleo básico.

Deste modo, a aplicação prática do estudo pode refletir em uma grande melhoria no processo ensino-aprendizagem, permitindo que discentes e docentes tenham acesso a uma metodologia mais ativa e participativa durante o ensino de determinados conteúdos.

Pode-se, ainda, prever a possibilidade de continuar o plano de implementação BIM na instituição supracitada, traçando os objetivos da célula BIM, ou seja, as metas desejadas para a formação dos profissionais do curso de Engenharia Civil e os marcos temporais de curto, médio e longo prazo, em anos.

REFERÊNCIAS

Andrade, R. A. de. (2018). Implementação de BIM no ensino: adequação de matrizes curriculares de cursos de arquitetura através da identificação da permeabilidade de conteúdo (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

Barison, M. B., & Santos, E. T. (2011). Tendências atuais para o ensino de BIM. Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, 5.

Brasil. (2024). Decreto n. 11.888, de 22 de janeiro de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jan. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Decreto/D11888.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

Checcucci, E. S. (2014). Ensino-aprendizagem de BIM nos cursos de graduação em Engenharia Civil e o papel da Expressão Gráfica neste contexto (Tese de doutorado). Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Educação.

Checcucci, É. de S., & Melo, R. S. S. de. (2022). Célula BIM na UFBA: diagnóstico e planejamento da ação. In Encontro Nacional sobre o Ensino de BIM, 4. Porto Alegre: ANTAC, 1–1. DOI: 10.46421/enebim.v4i00.1943. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/enebim/article/view/1943. Acesso em: 27 abr. 2024.

Farias, M. et al. (2023). Interface entre o BIM e os componentes curriculares do curso de Engenharia Civil do IFPB. In Encontro Nacional sobre o Ensino de BIM, 5. Porto Alegre: ANTAC, 1–1. DOI: 10.46421/enebim.v5i00.3471. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/enebim/article/view/3471. Acesso em: 29 abr. 2024.

Figuerola, V. (2011). BIM na prática. AU - Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 208: 58-60, jul.

Gonçalves Jr, F. (2018, 9 de julho). BIM: Tudo o que você precisa saber sobre esta metodologia. Blog da AltoQi. Disponível em: https://maisengenharia.altoqi.com.br/bim/tudo-o-que-voce-precisa-saber/. Acesso em: 29 abr. 2024.

Kymmell, W. (2008). Building information modeling: planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations. New York: McGraw Hill. Apud Barison, M. B., & Santos, E. T. (2011).

Landim, A. E. de F. G. (2020). Os obstáculos à implantação da tecnologia BIM como plataforma no desenvolvimento de projetos na construção civil: uma revisão sistemática de literatura.

Lopes, R. F. (2022). BIM no ensino: ganhos e impasses (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

Menezes, G. L. B. (2011). Breve histórico de implantação da plataforma BIM. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 18, 154.

Nascimento, D. L. de M. (2021, 9 de setembro). O que é BIM? Conheça o conceito, aplicações e os desafios. Blog da CERTI. Disponível em: https://certi.org.br/blog/bim/. Acesso em: 22 abr. 2024.

Nunes, G. H., & Leão, M. (2018). Estudo comparativo de ferramentas de projetos entre o CAD tradicional e a modelagem BIM. Revista de Engenharia Civil, Uminho, 55(55): 47-61.

Pereira, R. da S. (2022). Situação do BIM no Brasil: tecnologia e aplicação. Bahia: Centro Universitário Maria Milza.

Rodrigues, & Lima. (2017). Mapeamento de interfaces entre disciplinas de Engenharia Civil e o paradigma BIM. In Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação, 1; Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 10. Fortaleza: UFC.

Rosa, P. de S. (2023). Perspectivas da utilização da tecnologia BIM no curso de bacharelado em engenharia civil de uma instituição de ensino na Paraíba (Trabalho de Conclusão de Curso).

Ruschel, R. C., & Ferreira, S. L. (2022). Rede de Células BIM ANTAC. In Encontro Nacional sobre o Ensino de BIM, 4. Porto Alegre: ANTAC, 1–1. DOI: 10.46421/enebim.v4i00.1952. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/enebim/article/view/1952. Acesso em: 26 abr. 2024.

Santos, S. D. dos. (2024, 16 de abril). BIM e a Lei: Normas e Regulamentações que Você Precisa Conhecer. SDS Educa. Disponível em: https://sdseduca.com.br/bim-e-a-lei-normas-e-regulamentacoes-que-voce-precisa-conhecer/. Acesso em: 29 abr. 2024.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM EDIFÍCIOS DE PAREDES FINAS EM BETÃO ARMADO

JONATHAN VLADIMIR ARMIJOS TINOCO [a]; ROSA CRISTINA GONZALEZ LIMA [b]; MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO [c]; IVAN FERNANDO OTALVARO CALLE [d]; ANIBAL MAURY RAMÍREZ[e]

[a] Ministério del Interior – Policia Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador, Av 10 de Agosto y Bartolomé de las Casas, jonarmijos@hotmail.es

[b, c, d] Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Santiago de Cali, Colombia, Cl. 18 #118-250, rcgonzalez8591@gmail.com, alejandro.rojas@javerianacali.edu.co, ifotalvaro@javerianacali.edu.co,

[e] University of Antwerp, Antwerpen, Bélgica, Prinsstraat 13, 2000, anibal.maury-ramirez@uantwerpen.be

RESUMOS

A indústria da construção é um dos dois principais componentes da economia nacional e internacional em constante crescimento, principalmente devido ao crescimento populacional, à necessidade de infraestrutura pública e ao desenvolvimento urbano. O problema existente recai sobre as autoridades governamentais nacionais e locais, que devem propor programas e estratégias para satisfazer necessidades como habitação, saúde e educação. Através dos diferentes planos do governo colombiano e com o dinamismo de empresas públicas e privadas, desenvolvem e promovem projetos habitacionais consolidados através de modelos inovadores, com os quais pretendem cobrir a necessidade de habitabilidade dos seus concidadãos.

As empresas de construção satisfazem algumas destas necessidades através do desenvolvimento de projetos habitacionais que produzem um elevado impacto ambiental devido à exploração de matérias-primas como: agregados (finos e grossos) e produção de cimento; além disso, a grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados devido ao rápido crescimento do setor. Em vários países, têm sido implementadas alternativas que permitem regular a geração e utilização de RCD em estações de gestão de resíduos como alternativa para mitigar a poluição gerada, reduzindo o seu impacto no ambiente.

Os RCD representam fluxos em grandes volumes e peso na disposição final de resíduos sólidos em centros de coleta. A composição desses resíduos é geralmente: concreto, tijolos, gesso, madeira, vidro, metais, plástico e terra escavada; permitindo que sejam utilizados em outros usos dentro da mesma indústria da construção. Por isso, é imprescindível que, antes de propor alternativas de gestão e redução de RCD, seja determinada a capacidade de produção dos resíduos, o que está diretamente relacionado à metodologia construtiva e aos processos internos propostos pela empresa contratante.

O presente estudo analisa a geração de RCD em diferentes empreendimentos de habitação social desenvolvidos através da metodologia de sistemas industrializados (paredes finas de concreto armado), sendo a configuração de residências multifamiliares de 5 pavimentos. Optou-se pela seleção desta metodologia construtiva devido ao seu alto desempenho em tempo e custo. Este sistema construtivo é utilizado principalmente no ambiente local e regional. Nesta pesquisa, foram selecionados quatro projetos habitacionais intervencionados em suas diferentes etapas de execução

(escavação, estrutura e acabamentos), com um total de 448 unidades habitacionais analisadas que foram executadas na cidade de Santiago de Cali, Colômbia.

As etapas da pesquisa estão claramente definidas: 1.- Seleção e adequação dos projetos, 2.- Classificação do RCD através de regulamentos: Europeu UNE 933-11 e Brasil CONAMA 307; 3.- Quantificação de RCD através de amostragem e cálculo de volumes, 4.- Determinação de indicadores de geração respectivamente.

A quantificação do RCD foi realizada a partir da identificação de áreas de coleta distribuídas em todas as áreas de trabalho, nas quais foi determinada a volumetria com base em medidas coletadas através da composição de figuras prismáticas. Os dados obtidos como resultado da quantificação do RCD permitem-nos mostrar a realidade do ambiente, especificamente para sistemas construtivos de habitações de média altura.

Os indicadores de geração de resíduos são expressões quantitativas que refletem o comportamento, evolução e gestão da RCD; que podem ser utilizados como nível de referência na quantidade de resíduos gerados com base nas atividades de trabalho realizadas, permitindo a identificação de um desvio ou comportamento anômalo durante a execução de um processo ou produto e fornecendo uma ferramenta versátil para propor ações corretivas e tomadas de decisões em gerenciamento de projetos Reliability, (2018). Os indicadores descritos nesta pesquisa decorrem da relação direta entre o volume produzido e a área construída. Isso permite realizar uma análise com base na administração do recurso na execução de atividades específicas de obra e identificar se houve erro construtivo que afete o fornecimento de materiais na execução de itens específicos.

PALAVRAS-CHAVE

Resíduos de Construção e Demolição

Agregados de Construção Reciclados

Indicadores de Geração de Resíduos de Construção e Demolição

Indicadores de Utilização de Agregados de Construção Reciclados

INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso pretende contextualizar a evolução da indústria da construção e de seus diversos sistemas construtivos, especificamente o denominado como: "Sistemas de muros delgados de concreto armado e placas colaborantes". Este sistema é uma metodologia construtiva em constante crescimento e aplicabilidade na indústria, o que se deve principalmente aos benefícios que representa, como: tempo de execução, custos de investimento e desenvolvimento imobiliário. A versatilidade deste sistema permite abordar aspectos relacionados à capacidade de geração de resíduos de construção e demolição (RCD) e assim poder determinar as alternativas de otimização dos mesmos como uma gestão integral do resíduo.

Os diferentes setores econômicos e estratégicos, que desenvolvem através de suas atividades grandes impactos econômicos, incluem a construção, que tem se desenvolvido em constante crescimento, buscando satisfazer as necessidades da sociedade em todas as suas formas, seja em infraestrutura pública, habitações, hospitais e educação Thomas et al., (2016).

A economia mundial envolve uma melhor qualidade de vida para seus habitantes, o que também representa uma expansão constante da área urbana; a construção representa um recurso que constitui mais de 11% do Produto Interno Bruto (PIB) a nível mundial. Em 2020, houve um incremento de 13,2%, Greg Roumeliotis, (2011).

A indústria da construção, assim como a maioria das indústrias de impacto econômico, tem sido de interesse notável especialmente em períodos em que a sociedade entrou em condições atípicas, como foi o tempo posterior à Segunda Guerra Mundial, quando as economias de países agora catalogados como potências mundiais se encontraram em situações de conflito, o que levou a comunidade científica a experimentar mudanças significativas e impulsionar avanços tecnológicos com os quais pudessem satisfazer as necessidades básicas para o desenvolvimento urbanístico e de infraestrutura pública. Um exemplo disso é o uso de resíduos de construção e demolição devido ao desabastecimento e escassez de matéria-prima, o que implicou no desenvolvimento e uso desses resíduos como uma alternativa viável na seleção de materiais para a edificação de novas habitações e edifícios, Hsiao et al., (2002).

As diferentes inovações desenvolvidas têm integrado principalmente a evolução dos sistemas construtivos, seja de sistemas convencionais (aporticado) para o sistema de estrutura metálica ou a combinação dessas duas metodologias construtivas. Para o caso de estudo, a análise da construção de edificações destinadas à habitação de pouca altura (5 andares) a partir do sistema construtivo de muros delgados com placas colaborantes foi realizada. A tipologia arquitetônica comum do mercado destinada ao uso de habitações, sendo apartamentos de 2 e 3 quartos configurados com: sala e cozinha em um único ambiente, um banheiro principal e um banheiro social. A configuração é similar ao projeto intervendo nesta investigação; a configuração espacial da edificação é composta por torres de apartamentos que integram o projeto de pesquisa. Os resultados obtidos permitem conhecer o estado atual da indústria.

Em função da evolução e desenvolvimento desta metodologia construtiva, foram incluídas ferramentas mais sofisticadas, abrindo a possibilidade de otimizar custos e reduzir tempos de execução. Isso também permitiu o desenvolvimento da gestão construtiva, otimizando a geração do

resíduo mediante a inclusão de materiais reciclados e, com isso, reduzindo a pegada de contaminação, Llatas & Fuertes, (2017).

O alto impacto ambiental produto das atividades construtivas deve-se à exploração de matérias-primas como agregados (finos e grossos), à produção de cimento e outras matérias-primas indispensáveis para o desenvolvimento de projetos em matéria de construções, além da grande quantidade de resíduos de construção e demolição gerados. A gestão do RCD surgiu também como uma preocupação em relação à capacidade de produção, sendo a mais importante na geração em relação à quantidade de volume significativo que se requer para satisfazer essa necessidade, que experimenta um crescimento e desenvolvimento constante. No entanto, isso também representa uma fonte valiosa e com alto potencial de otimização e aproveitamento, J. Pacheco, J. de Brito, C. Chastre, L. Evangelista., (2019).

Este artigo pretende determinar a geração de RCD como uma alternativa de exploração que determine a viabilização da integração como matéria-prima proveniente de resíduos de construção, além de permitir determinar indicadores sobre sua capacidade de produção ou geração em função do volume de resíduo gerado em relação à área edificada. Além disso, analisa as principais causas que contribuem para sua geração, incluindo erros no design, variações nos mesmos ou modificação em suas especificações durante o processo construtivo.

DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

No presente caso de estudo, refletem-se as condições existentes em relação à geração e gestão do RCD, que pode ser definido como um excedente de matéria-prima que sofreu uma modificação em sua massa e/ou volume conforme o uso ou sua aplicação durante a etapa construtiva em qualquer atividade ou processo. Para isso, propõe-se a seguinte metodologia:

1. Seleção e adequação do projeto a intervir:

   Esta atividade focou-se na seleção de projetos que se desenvolvam dentro da área de influência, ou seja, que estejam na fase de construção. Para isso, foi proposto como caso de estudo a análise de projetos habitacionais de propriedade horizontal em tendências demográficas que permitam uma versatilidade na logística de mobilidade e acessibilidade do projeto.

   A viabilidade em sua execução implicava uma aceitação por parte da empresa construtora, sendo assim, uma análise de variáveis como: Acessibilidade da informação (Plantas, Programação de Obra, Custos e Metodologia Construtiva), Priorização de critérios em atenção aos objetivos da pesquisa como o sistema construtivo de muros delgados de concreto armado e placas colaborantes, e finalmente que sua execução de obra permita coletar dados que representem as condições reais da indústria da construção.

   A geração de alternativas e seleção das mesmas foi realizada em função das opções identificadas respectivamente em função aos critérios antes mencionados, finalmente determinou-se o projeto idôneo.

   A determinação do plano de execução metodológico para o presente caso de estudo foi cuidadosamente estruturada e socializada com a empresa construtora para, em função disso,

estabelecer o cronograma de visitas para coleta de dados e levantamento de informações, o que implicou um planejamento de atividades evidenciando o cumprimento do cronograma de trabalhos do projeto e especificamente a brecha de análise desta pesquisa, que se desenvolveu durante a fase de estrutura.

O monitoramento e controle como uma ferramenta que permita precaver a coleta de dados representativos em função das atividades executadas pela empresa construtora, para o qual foram propostas visitas periódicas quinzenais. Para o caso de estudo e sigilo respectivo, categoriza-se o projeto em análise com a denominação "D4", que se compõe de 384 unidades de habitações multifamiliares.

2. Causas de Geração de Resíduos:

Exploram-se as principais causas que contribuem para a geração de RCD no sistema construtivo proposto. Isso se deve principalmente à informação ou determinação do tipo de resíduo gerado. Além da informação relacionada à quantidade de geração, devem-se identificar as variáveis diretamente relacionadas ao projeto, como: planejamento deficiente, identificação das contingências na execução de atividades específicas, erros de design, excedentes de produção e mudanças nas especificações durante o processo de construção.

Além das variáveis indiretas relacionadas à geração de RCD, como processos ou atividades específicas, como: hábitos de compra, tecnologias utilizadas, políticas de gestão de resíduos, entre outros.

3. Caracterização dos Resíduos de Construção e Demolição em sistemas de muros delgados de concreto armado e placas colaborantes:

Nesta seção, analisa-se a composição e as características dos resíduos gerados no sistema construtivo em questão. Destacam-se os materiais mais comuns presentes nesses resíduos e seus possíveis impactos ambientais. Para isso, descrevem-se a seguinte sequência:

3.1. Coleta de dados: A partir de medições periódicas em função da capacidade de geração, respectivamente.
3.2. Classificação do RCD: Em função da normativa vigente, para o caso de estudo, realizou-se em função dos códigos padronizados como pela normativa local e internacional.
3.3. Caracterização do RCD: Mediante a determinação de suas propriedades físicas, especificamente sua massa unitária e volume.
3.4. Quantificação do RCD: Para isso, realiza-se o registro volumétrico das diferentes medidas mediante o cálculo de figuras geométricas.

4. Avaliações da gestão do RCD:

Elaboração de indicadores de geração do RCD em relação ao volume gerado em relação à área edificada é um parâmetro de medição que representa a capacidade de gestão da empresa construtora no desenvolvimento do projeto.

O cálculo dos indicadores deriva das seguintes equações, sendo relações empíricas que se analisam em função da estreita relação das variáveis analisadas:

$$W_{GR} = \frac{WRCD_i}{WTA * A_i} \qquad \textit{Equação 1}$$

W_{GR}: Índice de geração de RCD (m^3/m^2, kg/m^2), que proporcionará uma apreciação sobre o possível cumprimento ou não da Resolução 0472, será determinado em ton/ton.

$WRCD_i$: Resíduo de construção e demolição expresso em volume ou massa

WTA: Indicador de Peso do projeto por unidade de superfície kg/m^2

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) expõe a relação diretamente proporcional entre a geração de RCD e as atividades executadas. Por essa razão, quanto mais atividades forem executadas dentro da programação de obra do projeto a ser edificado, maior será o resíduo gerado.

QUANTIFICAÇÃO DO RCD

Empregaram-se técnicas de amostragem e análise estatística para avaliar a relação entre variáveis como a superfície construída e o tipo de resíduo gerado durante o desenvolvimento do projeto. A fase de amostragem foi de 4 meses. Os resultados obtidos respaldam a hipótese levantada, mostrando uma correlação significativa entre as atividades executadas pela empresa construtora e a geração de RCD.

Além disso, identificaram-se fatores chave que influenciam na quantidade de resíduos gerados nos projetos de construção e demolição. Esses achados têm importantes implicações para o design de estratégias de gestão de resíduos e a implementação de práticas mais sustentáveis na indústria da construção.

Na Quadro 1, evidencia-se que o volume de RCD gerado durante a etapa de escavação, estrutura e acabamentos, durante o período de amostragem.

Quadro 1 – Geração de resíduos por estrutura e etapa de acabamento

Etapas Construtivas	Volume m^3	Área edificada m^2
Escavação	7913	
Estrutura	361.9	28216.32
Acabamentos	37.5	
Total m^3	**8231.61**	**28216.32**

Fonte: O Autor

Na execução da etapa de movimento de terras ou escavações, todos os resíduos provenientes dessa etapa são classificados como resíduos contaminados. Isso se deve principalmente à falta de gestão, pois durante a execução dessa atividade, os depósitos temporários ou na disposição final nos aterros não possuem gestão de resíduos, e todo o material disposto se contamina, sendo assim impossível seu aproveitamento, apesar de ser a etapa que gera maior resíduo pelas particularidades que esse resíduo representa altos valores de massa e volume.

Classificação do RCD:

Nesta pesquisa, analisou-se a informação existente referente à classificação de RCD e apresenta-se uma proposta na Quadro 2, com a qual se pretende identificar o resíduo de acordo com seu possível aproveitamento na indústria da construção, tomando como referência a normativa brasileira e europeia.

Quadro 2 –Análise para classificação do RCD, nesta pesquisa.

Norma Colombiana Resolução 0472 de 2017	**Norma Brasileia CONAMA 307 de 2002**	**Norma Europeia (UNE EN 933 - 11 de 2010**
Susceptíveis de Aproveitamento	Produtos de Escavação	Tierra Materiais Pétreos e Outros
	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados	Rc: Concreto, produtos de concreto, elementos de alvenaria de concreto. Ru: Agregados não ligados, pedra natural, agregados ligados hidraulicamente. Rb: Elementos de alvenaria de argila, silicato de cálcio e concreto aerado não flutuante Rc + Ru Rc + Rb Otros
	Resíduos Reutilizáveis ou Recicláveis	Plásticos, Papel / Cartão, Metais, Vidro, Madeira e outros
Não Susceptíveis de Aproveitamento	Resíduos para os quais não se desenvolveram tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para sua reciclagem	Gesso, Isoladores Borracha Amianto Outros
	Resíduos perigosos derivados do processo de construção	Contaminados/Pelagrosos Outros

Fuente: UNE EN 933 11 (2010); CONAMA (2002); Ministério de Ambiente y Desarrolho Sustentável (2017b).

A classificação do RCD centra-se principalmente nos seguintes materiais: concreto, madeira, metal, plástico, vidro, cerâmica, gesso e materiais compostos. Esses materiais variam em termos de composição, tamanho e potencial de reciclagem ou reutilização. Os dados mostrados na Figura 1 atribuem-se aos componentes de estrutura e acabamentos respectivamente. Para o caso de estudo, realizou-se a seguinte classificação: Contaminados e Perigosos com uma participação de 32.32%, aproveitáveis em outros usos com uma contribuição de 9.39%, Aproveitáveis como agregado reciclado de concreto sendo uma participação de 58.29% e não susceptíveis de aproveitamento com 0%; isso em função da Normativa Brasileira CONAMA 307.

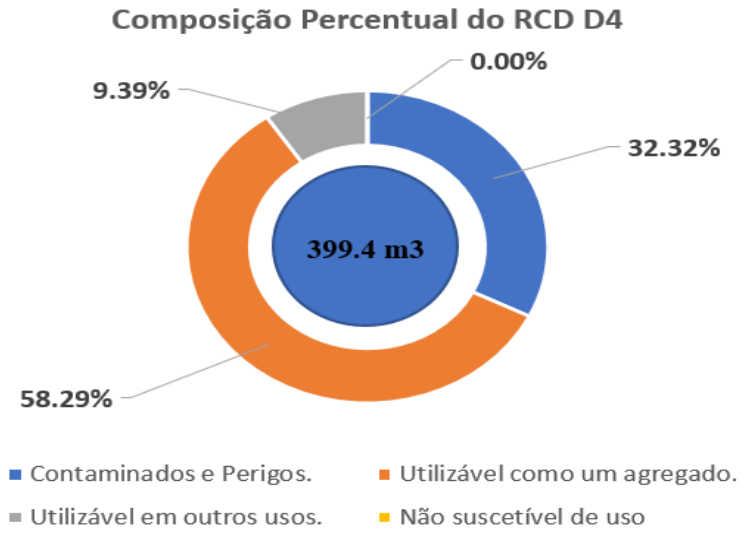


Figura 1– Composição do RCD

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM OBRA

A caracterização do RCD foi determinada a partir da coleta de amostras in situ das diferentes estações de coleta planejadas e distribuídas espacialmente em toda a superfície de execução do projeto habitacional.

Em atenção à etapa construtiva em que se encontrava o projeto, sendo a etapa de estrutura e poucas unidades de habitações na etapa de acabamentos. Portanto, ao realizar a amostragem, as principais atividades desempenhadas foram: fundição monolítica de muros delgados de concreto armado e acabamentos como: assentamento de cerâmica no piso e áreas comuns, revestimentos de paredes e pintura. Por isso, o resíduo predominante foi rebarbas de concreto e cerâmicos.

Peso aparente dos resíduos

Em atenção à identificação dos componentes das amostras intervenientes, as quais foram coletadas em quatro períodos diferentes das zonas de coleta estabelecidas, determinou-se o registro respectivo em diferentes períodos de amostragem para determinar de forma mais real e precisa a caracterização dos componentes da amostra, sendo um valor de 10.000 kg amostrados respectivamente, os mesmos que se descrevem na Quadro 3.

Quadro 4 – Peso unitário médio dos projetos analisados

Componente	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média
Metal kg/m^3	1.583,3	147,7	3.000	1.142,9	1.468,5
Plástico kg/m^3	-	-	305.9	-	76,5
Rc kg/m^3	1.156,7	1.123,1	1.018,0	1.261,4	1.139,8
Total	2.740,0	1.270,8	4.323,9	2.404,2	2.684,8

Fonte: O Autor.

Sendo os materiais com maior participação de metal com uma massa unitária de 1.468 kg/m^3, seguidos do resíduo de concreto e cerâmicos com um valor de 1.140 kg/m^3 aproximadamente e o componente de plástico com uma massa de 75,5 kg/m^3.

INDICADORES DE GERAÇÃO

Indicador de geração volumétrica por unidade de superfície

Os indicadores são valores estatísticos que permitem a determinação da análise de variáveis dentro de uma temática de pesquisa. Para o presente caso de estudo, analisam-se as variáveis: Volume de Geração do RCD e Superfície Edificada, ver Quadro 4.

Quadro 5 –Análise de indicadores por etapa de construção

Etapa	Descrição	Unidade	D4
Escavação	Volume do RCD	m^3	7.913
	Área do projeto	m^2	28.216
	IGR^V (m^3/ m^2)	**m^3/ m^2**	**0.28**
Estrutura	Volume do RCD	m^3	331
	Área do projeto	m^2	10.949
	IGR^V (m^3/ m^2)	**m^3/ m^2**	**0.03**
Acabamentos	Volume do RCD	m^3	69
	Área do projeto	m^2	4.629
	IGR^V (m^3/ m^2)	**m^3/ m^2**	**0.015**
Indicador de geração volumétrica por unidade de superfície			**0,340**

Fonte: O Autor.

Em função das relações empíricas e variáveis analisadas, determina-se o indicador de geração volumétrica por unidade de superfície de 0.340 (m^3/ m^2).

Os indicadores de geração são parâmetros que relacionam o volume do resíduo gerado e a área edificada, os quais variam dependendo do uso da estrutura e do sistema construtivo. Nesta pesquisa, estabelece-se a comparação entre um sistema construtivo aporticado na construção de 26 casas e na construção e demolição de 100 habitações, ambos registrados na Espanha, e o sistema construtivo industrializado. Os indicadores presentes na literatura referidos à geração de RCD para cada etapa construtiva descrevem-se na Quadro 5.

Quadro 6 – Análise de indicadores volumétricos por etapa de construção

Descrição	[a]Llatas m^3/m^2	[b]Solis m^3/m^2	D4 m^3/m^2
Escavação	0,2805	-	0,2804
Estrutura	0,0603	0,0318	0,0301
Acabamentos	0,0094	0,0042	0,0151

Fuente: El Autor.

A geração de RCD por metodologia construtiva é menor em sistemas industrializados do que em sistemas aporticado, com valores de 0,0301 m^3/m^2 e 0,0603 m^3/m^2 para a etapa de estrutura, e para a etapa de acabamentos os valores são próximos entre si, sendo 0,0151 m^3/m^2 e 0,0094 m^3/m^2.

Na literatura existente, a informação de indicadores de geração de RCD para diversas metodologias construtivas é limitada. Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa pretendem incentivar o desenvolvimento referido à temática da geração, gestão e aproveitamento do RCD.

Indicador de geração gravimétrica por unidade de superfície

Outra maneira de expressar a geração de RCD é relacionando as variáveis como a massa do resíduo e a área construída, representando em kg/m². Ver quadro 6.

Quadro 7 – Análise de indicadores gravimétricos por etapa de construção

Etapa	Descrição	Unidade	D4
Escavação	Massa do RCD	Kg	15042613.00
	Área do projeto	m^2	28216.00
	IGR^V (kg/ m^2)	**Kg / m^2**	**533.12**
Estrutura	Massa do RCD	Kg	426000.00
	Área do projeto	m^2	10949.00
	IGR^V (kg/ m^2)	Kg **/ m^2**	**38.91**
	Massa do RCD	m^3	87000.00
Acabados	Área do projeto	m^2	4629.00
	IGR^V (kg/ m^2)	**Kg / m^2**	**18.79**
Indicador de geração gravimétrica por unidade de superfície			**57.70**

Fonte: O Autor.

Este tipo de indicador é o mais empregado na literatura. Para o caso de estudo na presente pesquisa, determina-se que para o sistema construtivo de muros delgados com aço reforçado e placas colaborantes é de 57.70 Kg / m^2.

Na Quadro 7, indica-se o estado de indicadores descritos na literatura, sendo a União Europeia o maior gerador com uma quantificação de330 Kg / m^2., e o país com menor produção de RCD é os Estados Unidos com 21 Kg / m^2, enquanto a presente pesquisa oscila com valores de 57 Kg / m^2.

Quadro 8 – Análise quantitativa dos indicadores de geração de RCD, em comparação com outros países.

Tipo de indicador	Unidade	UE	Espanha	Vasco	China	Tailândia	Brasil	USA	Esta Pesquisa
Ind. De Gen. De RCD en construcción	kg/m^2	330	120	84	41	21.4	97	21	57.70

Fuente: (Akhtar, 2013; González-Vallejo et al., 2015; Llatas, 2011; Ramírez De Arellano & Agudo Guzmán, 2010; Wu et al., 2016).

CONCLUSÕES

Que a geração de RCD tem uma relação direta entre a metodologia construtiva e o uso específico destinado à edificação. Para o caso de estudo, o sistema construtivo constituído por "Muros delgados com placas colaborantes" em edificações de habitações multifamiliares apresenta uma capacidade de geração de 0.03 m^3/m^2 em relação aos sistemas aporticados de 0.06 m^3/m^2, sendo uma redução de 50% respectivamente em atenção ao volume gerado por unidade de superfície edificada.

Que a geração representada como massa do resíduo em relação à superfície edificada na presente investigação representa valores de 57 kg/m^2, enquanto que para a União Europeia encontra-se com valores de 330 kg/m^2. Este análise comparativo representa uma capacidade de geração de 600% superior ao entorno local da cidade de Santiago de Cali, em atenção às variáveis analisadas. Determina-se que a razão do incremento exponencial se deve ao desenvolvimento populacional e às necessidades de crescimento populacional existentes na União Europeia.

Que os países com menor geração de resíduos do hemisfério oriental são China e Tailândia, com um indicador de geração de 41 e 21.4 kg/m^2, respectivamente. A razão principal é a escassez de matéria-prima e os lineamentos ambientais rigorosos para a produção de agregados e matérias-primas estabelecidos em sua normativa, enquanto que no hemisfério ocidental se registram os Estados Unidos e Brasil com 21 e 97 kg/m^2, respectivamente. Para este caso, relaciona-se em atenção à metodologia construtiva e ao tipo de uso da infraestrutura projetada

Que a maior atividade de geração de RCD se realiza durante a etapa de escavação, sendo uma estimativa de 0.28 m^3/m^2, onde dificilmente se pode realizar uma adequada gestão do resíduo, enquanto que nas etapas de estrutura e acabamentos representam uma quantia de 0.03 e 0.015 m^3/m^2, respectivamente. O que representa um incremento de 930% em relação à etapa de estrutura e de 1800% em relação à etapa de acabamentos.

Que existe uma capacidade operativa do RCD limitada em atenção às seguintes variáveis: Gestão por parte das empresas construtoras na execução de seus projetos, Inoperância Logística por parte das estações de coleta ou aterros devido a uma gestão de RCD limitada ou nula, além de Limitação de Controles por parte de empresas de saneamento público.

Que os indicadores resultantes nesta investigação representados em unidade de volume por área edificada, além da massa do resíduo por superfície edificada, é um tema de ampla necessidade investigativa, onde os resultados permitirão realizar e implementar ações que desenvolvam e impulsionem a indústria da construção em direção a sistemas construtivos mais amigáveis com o meio ambiente e possa assim reduzir a pegada de carbono.

REFERÊNCIAS

Akhtar, S. (2013). Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures. *Journal of Construction Engineering, 20132013*, (2008). http://downloads.hindawi.com/journals/jceng/2013/834572.pdf

Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas de Los Áridos. Parte 11: Ensayo de Clasificación de Los Componentes de Los Áridos Gruesos Reciclados. (2010).

González-Vallejo, P., Solís-Guzmán, J., Llácer, R., & Marrero, M. (2015). La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica. *Informes de La Construcción*, *67*(539), e111. https://doi.org/10.3989/ic.14.017

Greg Roumeliotis. (2011). *Crecimiento construcción mundial superará al PIB esta década:PwC*. Reuters.

Hsiao, T. Y., Huang, Y. T., Yu, Y. H., & Wernick, I. K. (2002). Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. *Resources Policy*, *28*(1–2), 39–47. https://doi.org/10.1016/S0301-4207(03)00004-7

Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.023

Llatas, C., & Fuertes, R. H. (2017). *Una aproximación metodológica a la verificación en obra de la cuantificación de residuos de construcción en Andalucía*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *RESOLUCION 472 DE-2017.pdf*.

Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., & Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *201*, 110–120. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200

Pepe, M. (2015). *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications*. 7–17. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8

Ramírez De Arellano, A., & Agudo Guzmán, J. S. (2010). *Evaluación de la huella ecológica del sector edificación (uso residencial) en la comunidad andaluza*.

Reliability. (2018). *Indicadores de Gestión*. https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/los-indicadores-de-gestion

Resolución Del CONAMA 307 (2002).

Thomas, C., Setién, J., & Polanco, J. A. (2016). Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. *Construction and Building Materials*, *114*(April 2002), 536–546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.203

The European Commission. (2016). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. *62*(September), 49.

Wu, H., Duan, H., Zheng, L., Wang, J., Niu, Y., & Zhang, G. (2016). Demolition waste generation and recycling potentials in a rapidly developing flagship megacity of South China: Prospective scenarios and implications. *Construction and Building Materials*, *113*, 1007–1016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.130

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MÉTODO DIGITAL PARA PREPARAÇÃO DE OBRA

Ângelo Ferreira[a]; Filipe Ribeiro[a]; Luís Chaves[a]

[a]Tecnorém – Engenharia e Construções S.A., E.N. 113, Moinho da Areia, 2490-444 Ourém, Portugal, geral@tecnorem.pt

RESUMO

No presente artigo, pretende-se mostrar o impacto que as tecnologias digitais têm na gestão de construção e preparação da obra. Será usado como caso de estudo a construção do novo Hospital de Proximidade de Sintra pela Tecnorém – Engenharia e Construções, S.A, cuja projeção da infraestrutura técnica e estrutural foi feita com recurso a tecnologias digitais e BIM ("Building Information Modelling"). A validação passará por uma verificação da literatura existente na realização da obra, através de mostras da modelação de sistemas técnicos e respetivas implementações. Inicialmente, serão apresentados os requisitos pedidos pela gestão do Hospital, seguidos de algumas das soluções desenhadas e implementadas pela Tecnorém, realçando a perícia técnica na compatibilzação de infraestrutura respeitante às diferentes especialidades (mêcanica, elétrica e hidráulica), e a relação que o uso das tecnologias digitais tem no avanço de uma maior sustentabilidade no setor da construção. Além disso, será evidenciada uma solução no âmbito de uma maior eficiência energética do Hospital: o sistema de gestão técnica centralizada (SGTC). Atendendo à bibliografia existente e à correta implementação das diferentes especialidades e do SGTC, foi possível concluir qualitativamente que o uso de tecnologia computacional de vanguarda contribui para a uma maior sustentabilidade na na preparação de obra.

Palavras-chave: Instalações técnicas; Tecnologias digitais; BIM; MEP

GLOSSÁRIO

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BIM - Modelagem de Informação da Construção (“Building Information Modeling”)

Chiller [estrangeirismo] - Unidade de produção de água refrigerada

DDC - Controlo Digital Direto (“Direct Digital Control”)

GTC - Gestão Técnica Centralizada

MEP - Mecânica, Elétrica e Encanamento (“Mechanical, Electrical and Plumbing”)

NZEB - Edifício de Energia Quase Nula (“Nearly Zero Energy Building”)

Q.GTC - Quadro de Gestão Técnica Centralizada

SGTC - Sistema de Gestão Técnica Centralizada

UPS - Fonte de Alimentação Ininterrupta (“Uninterruptible Power Supply”)

UTA - Unidades de Tratamento de Ar

VC - Ventiloconvector

VE - Ventilador de Extração

VI - Ventilador de Insuflação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área do telhado coberta por painéis fotovoltaicos. 7

Figura 2 – Vista 3D de um corte do Piso 2 com condutas de ventilação e climatização. Note-se em cima a cinzento as UTA's e logo abaixo condutas de ar novo. À direita destas encontra-se uma corete, responsável pela distribuição vertical de uma grande variedade de condutas. 9

Figura 3 – Área do telhado coberta por painéis fotovoltaicos. 9

Figura 4 – Conduta AVAC (ao fundo) alternada com uma calha de suporte de cabos elétricos (ao meio) e com a rede hidráulica (mais próxima e com o isolamento de cor preta).– Área do telhado coberta por painéis fotovoltaicos. 10

Figura 5 – Conduta da desenfumagem em cima à esquerda passando por cima e rente a tubos de climatização e com a rede hidráulica passando à direita. 10

Figura 6 – Compatibilização de várias condutas de desenfumagem e insuflação com condutas vindas de UTA's exteriores e com a rede hidráulica no Piso 3. 12

Figura 7 – Tela gráfica incorporada nos chillers para fim de monitorização e análise de dados de desempenho no local. Este gráfico em particular representa a evolução temporal das temperaturas e comando de caraga no chiller. 12

Figura 8 – Tela gráfica localizada numa sala de controlo para verificação e controlo do estado de operação dos registos corta-fogo. 13

Figura 9 – Implementação do Q.GTC acima representado, com inúmeras ligações de e para os sistemas presentes no edifício técnico, além de DDCs, a azul escuro no canto superior esquerdo. . . 13

Figura 10 – Fabrico de quadro de potência KNX (para iluminação) pela Tecnorém. 14

Figura 11 – Marcação CE e normas internacionais que especificam os requisitos de operação e controlo de quadros, bem como de disjuntores de baixa tensão. 14

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem enfrentado desafios crescentes em termos de complexidade dos projetos e gestão eficiente dos recursos, bem como garantir. Nesse contexto, a Modelagem de Informação da Construção (BIM, do inglês "Building Information Modeling") surge como uma solução revolucionária, promovendo uma abordagem integrada e multidimensional para o planeamento, projeto, e gestão de construções (Eastman, 2011). BIM é particularmente útil em projetos de grande escala e alta complexidade, como é o caso da construção de escolas, hospitais e outras grandes infraestruturas, onde a precisão e a eficiência são de extrema importância (Jason & Umit, 2009).

Dentro do BIM, as áreas da Mecânica, Eletricidade e de Redes Hidraúlicas (MEP, do inglês "Mechanical, Electrical, and Plumbing") representa uma área crítica, responsável pelo projeto e execução dos sistemas vitais que garantem o funcionamento adequado de instalações de grandes dimensões. Estes sistemas incluem, mas não se limitam a: AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado), iluminação, abastecimento de água, esgotos, e sistemas de emergência.

O uso de BIM através de uma ferramenta MEP permite não apenas uma visualização detalhada e integrada de todos esses sistemas, mas também facilita a coordenação e a compatibilização entre as diversas disciplinas envolvidas, minimizando conflitos e otimizando o uso de recursos ao longo de toda a construção (Smith & Tardif, 2009; Hu & Zhang, 2011; Nawari & Kuenstle, 2015; Wang & Leite, 2016; Wang et al., 2016). Esta agilização, permite uma redução no tempo necessário para fazer uma avaliação de impacto ambiental e permite também comparar o impacto de diferentes soluções ao nível da sustentabilidade logo desde os primeiros estágios do projeto (Carvalho et al., 2020), contribuindo assim para uma maior sustentabilidade no ramo da construção (Wong & Fan, 2013; Zanni et al., 2017).

Nos últimos anos, a indústria da construção tem também enfrentado crescentes pressões para melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e minimizar o impacto ambiental. Em resposta a esses desafios, a implementação de Sistemas de Gestão Técnica Centralizada (SGTC), emergiu como uma solução vital. Estes sistemas integrados não apenas facilitam uma gestão mais eficiente dos recursos edificados, mas também promovem a sustentabilidade através da otimização do consumo de energia e da melhoria da qualidade ambiental interna (Beucker et al., 2016).

A evolução tecnológica no campo da automação predial e os avanços em tecnologias de informação e comunicação têm transformado os SGTC em componentes essenciais da infraestrutura moderna em edificações. Esses sistemas permitem um controlo centralizado e automatizado das diversas funções críticas em AVAC, iluminação e segurança, entre outros sistemas de gestão de energia. A integração dessas funções numa plataforma centralizada não só melhora a operacionalidade dos edifícios, mas também contribui significativamente para a redução do consumo de energia e para a eficiência operacional (Minoli et al., 2017).

Este estudo visa explorar a aplicação prática e os benefícios da utilização de tecnologias digitais e de BIM com recurso a uma ferramenta MEP na construção do Hospital de Proximidade de Sintra pela Tecnorém – Engenharia e Construções, S.A, destacando como estas tecnologias podem melhorar a eficiência, reduzir custos, promover a sustentabilidade e acelerar o cronograma de entrega de projetos de construção de alta complexidade.

Através da ferramenta MEP utilizada, foi possível corresponder realisticamente aos mais variados requisitos pedidos para o novo hospital através da modelação com alta precisão das mais diversas componentes. Neste documento, serão apresentados os requisitos mais fundamentais pedidos tanto para a parte de AVAC como para a parte de eletricidade, mencionando ademais a integração das componentes destes sistemas no SGTC. Posteriormente, serão mostrados alguns dos subsistemas desenhados para AVAC e eletricidade, tanto no edifício técnico, com foco nas centrais térmicas e elétricas, como no edifício principal, realçando os corredores principais, onde se encontram infraestruturas correspondentes a todas as especialidades (incluindo saneamento, desenfumagem, etc.). Será feita por fim, a análise de como o correto dimensionamento de componentes tanto em termos funcionais como estrutuais através da ferramenta MEP, bem como a implementação do SGTC contribuem para uma maior sustentabilidade no setor da construção.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 FERRAMENTA MEP

A ferramenta MEP usada na projeção do Hospital foi Autodesk Revit, ou simplesmente Revit. Revit é uma aplicação de modelagem de informações de construção em diversas dimensões (espaço, tempo, custo, operação, manutenção, entre outras) que inclui ferramentas para planear e acompanhar várias etapas do ciclo de vida de um edifício, desde o conceito até a construção e, posteriormente, a manutenção e/ou demolição.

Com recurso a Revit, os usuários podem criar edifícios, modelos ou outros objetos e usar o motor de renderização da ferramenta para tornar imagens mais realistas. Isto é feito usando ferramentas pré-definidas ou criando os próprios modelos, paredes, materiais, etc. O programa vem com uma ampla variedade de materiais pré-definidos que podem ser modificados conforme desejado pelo usuário.

2.2 SISTEMA DE GESTÃO TÉCNICA CENTRALIZADA (SGTC)

O SGTC é um sistema de supervisão, comando, controlo e registo histórico de variáveis relacionadas às instalações mecânicas e elétricas, conforme detalhado no projeto de execução do Hospital de Proximidade de Sintra. O SGTC integra a gestão de diversas instalações, incluindo climatização, ventilação, iluminação, electricidade, gases medicinais, elevadores, entre outros. Este sistema integrado e hierarquizado permite a otimização das operações e manutenção das instalações através de programas automáticos ou programáveis a partir de diferentes interfaces existentes pelo Hospital, existindo até um Posto de Supervisão para uma supervisão e controlo mais ubíquos. A operação do SGTC contribuirá por conseguinte para a segurança e para a eficiência energética dos edifícios técnico e principal.

3 CASO DE ESTUDO - REQUISITOS

Em termos energéticos, é exigido que o Hospital seja um Edifício de Energia Quase Nula (NZEB em inglês, ou “Nearly Zero Energy Building”) de acordo com a legislação em vigor.

A abordagem para atingir o status de NZEB no projeto do Hospital de Proximidade de Sintra é dividida em três fases:

- Arquitetura: O design do edifício maximiza a eficiência energética através da organização espacial que permite iluminação natural e fluxo térmico otimizados, além de uma envolvente construtiva que minimiza pontes térmicas e maximiza a inércia térmica.
- Equipamentos: Implementação de sistemas energeticamente eficientes, como motores EC[1], chillers de alto EER[2], e sistemas de recuperação de calor.
- Colmatação de consumos: Instalação de sistemas de produção de energia renovável (elétrica e térmica) para compensar os consumos externos, garantindo um balanço energético quase nulo.

Essas estratégias visam cumprir as diretrizes regulatórias e alcançar uma alta eficiência energética, classificando o edifício na Classe A, conforme a legislação aplicável sobre NZEB.

3.1 AVAC

Todas as componentes AVAC estão integradas no SGTC, estando equipadas com sistemas avançados de monitorização, controlo e gestão, permitindo que operem de forma integrada e eficiente. Estes sistemas foram projetados para minimizar o consumo de energia.

3.1.1 AQUECIMENTO

A água quente para fins de climatização e sanitários tem três proveniências diferentes: caldeiras a gás propanado ou da rede, coletores solares e recuperação de calor resultante da operação dos chillers, minimizando assim o uso de combustíveis fósseis na obtenção de energia térmica.

3.1.2 ARREFECIMENTO

É garantido pelos chillers, que, estando integrados com as outras instalações do hospital, garantem que a climatização seja garantida de forma centralizada e automática, assegurando uma elevada eficiência energética.

3.1.3 VENTILAÇÃO

O projeto requer uma ventilação meticulosa para garantir a qualidade do ar interior. Esta é assegurada por UTA's antissépticas, onde existe transferência de calor entre água (quente ou fria) vinda das centrais térmicas e ar, que por sua vez será ventilado para as diferentes salas e corredores do edifício principal através de ventiloconvectores (VC's). Foram dimensionados para as cargas térmicas específicas de cada espaço, sendo controlados independentemente e permitindo ajustes de temperatura conforme as preferências individuais. Existe ainda ventilação adicional forçada por VIs e VEs, garantindo uma renovação de ar adequada em todas as áreas do hospital.

[1] EC - Comutáveis eletronicamente ("Electronically Commutated")
[2] EER - Rácio de eficiência energética ("Energy Efficiency Ratio")

3.2 ELETRICIDADE

Existem sistemas de distribuição de energia normais e de emergência. A eletricidade vinda da rede em média tensão é encaminhada para transformadores de potência e seguidamente para quadros de baixa tensão. Parte do fornecimento será também efetuado por painéis solares instalados para o autoconsumo. Em caso de emergência, a alimentação do Hospital é assegurada por UPS ("Uninterruptible Power Supply", ou fontes de alimentação ininterrupta) e geradores.

Figura 1 – Área do telhado coberta por painéis fotovoltaicos.

3.3 SGTC

No caso do Hospital, os requisitos abrangem as instalações mecânicas de AVAC, instalações elétricas, sistema de comando de estores, sistema de iluminação, monitorização de equipamentos avulsos (gases medicinais, elevadores, etc.) e monitorização de sistemas de segurança (como válvulas de corte, etc.).

O nível de gestão permite a operação através de telas gráficas dinâmicas, a otimização do funcionamento, gestão de alarmes, gestão de eventos e arquivo histórico com a capacidade de geração de relatórios. A gestão será feita através de um Posto de Supervisão, conforme os dados disponíveis, recolhidos pelos servidores de automação distribuídos pelos quadros de gestão técnica (Q.GTC) do edifício.

A transferência de dados entre as diferentes redes de campo e o nível de gestão deverá utilizar como espinha dorsal uma rede Ethernet 10/100bT de nível superior, podendo ser utilizados os protocolo BACnet/IP, Modbus TCP, e/ou Modbus RTU, assegurando a compatibilidade dos protocolos de transporte com os servidores de automação. O Hospital é dotado de um *data center*, onde serão continuamente armazenados dados recolhidos pelos dispositivos de campo, que estão acessíveis ao nível da gestão através de software com interface gráfica.

O equipamento de campo é constituído por sensores de temperatura, humidade, pressão, CO_2, actuadores de dampers e válvulas, relés, contactores, contadores e analisadores de energia elétrica/térmica, e comando dos equipamentos de AVAC, iluminação, instalações eléctricas etc. As instalações técnicas dispõem de telas gráficas integradas.

No que toca à monitorização de energia, os quadros elétricos Q.GTC (de baixa tensão) foram fabricados de modo a permitir a monitorização e controlo das unidades de controlo dos disjuntores, disponibilizando ao SGTC (unidades DDC (controladores), software de gestão, etc.) informações atualizadas sobre os seus estados.

Foram principalmente asseguradas as funções de comando, controlo e monitorização: da produção de água gelada, refrigerada e quente; das condições do ar ambiente interior, as quais são asseguradas pela Unidades de Tratamento de Ar (UTA's), ventiladores de insuflação (VI's) e de extração (VE´s) e dos ventiloconvectores (VC's). Para garantir uma elevada eficiência, foi garantida a otimização no arranque e paragem de máquinas/dispositivos, o controlo de temperatura e luminosidade em função das condições externas e a diferenciação entre dias úteis, não úteis e especiais, entre outros.

4 CASO DE ESTUDO - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção serão apresentadas algumas das componentes projetadas pela Tecnorém através de tecnologias digitais de vanguarda e a respetiva implementação no Hospital. É de salientar a construção dos quadros GTC construção na sede da Tecnorém, constituindo uma prova de perícia técnica da empresa.

4.1 USO DA FERRAMENTA MEP E IMPLEMENTAÇÕES

O uso de Revit possibilitou a modelagem das mais diversas componentes em 3D, tendo este sido um fator importante na conversão do projeto de desenho a implementação, e na compatibilização de componentes referentes a diferentes disciplinas, sendo este o fator mais diferenciador na obra (o software permite a identificação de possíveis incompatibilidades espaciais entre componentes de diferentes disciplinas). O elevado detalhe do projeto em Revit também permitiu uma maior precisão e eficácia na parte logística da obra, nomeadamente no que toca à aquisição de componentes adequadas e compatíveis.

Seguidamente apresentam-se dois cortes de planos AVAC onde se pode verificar um elevado realismo no que toca à visualização de componentes e integração precisa na estrutura do hospital.

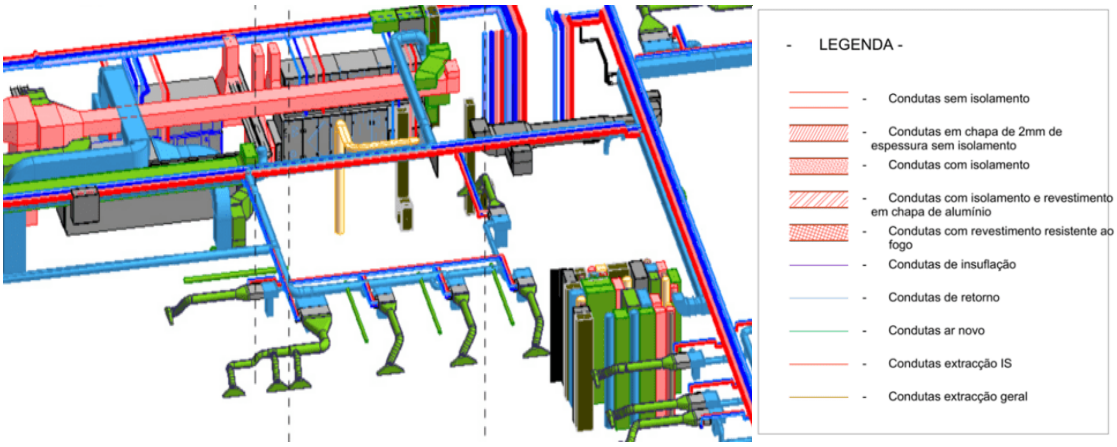


Figura 2 – Vista 3D de um corte do Piso 2 com condutas de ventilação e climatização. Note-se em cima a cinzento as UTA's e logo abaixo condutas de ar novo. À direita destas encontra-se uma corete, responsável pela distribuição vertical de uma grande variedade de condutas.

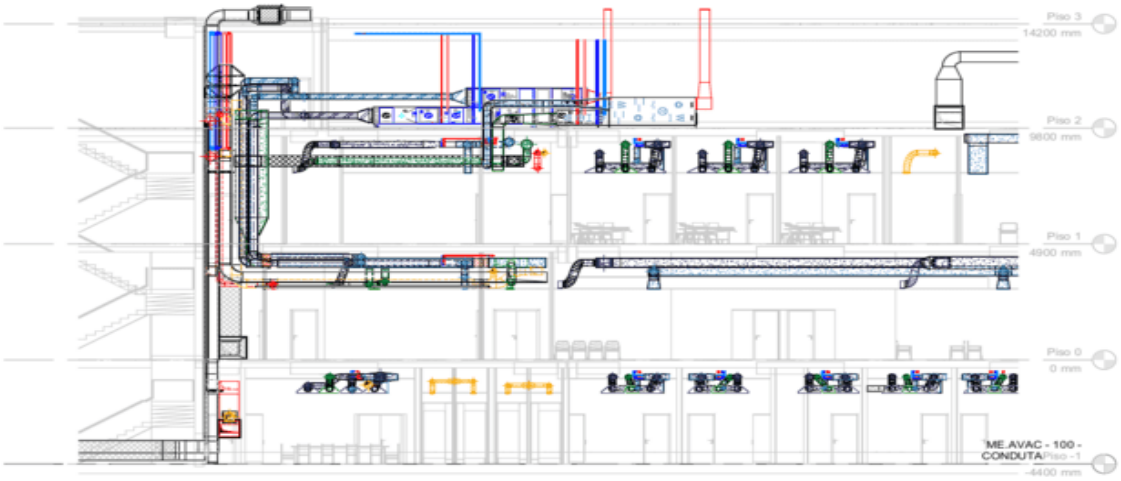


Figura 3 – Corte transversal numa zona a nordeste do Hospital, com destaque a uma corete à esquerda, e a condutas de climatização e ventilação em diferentes salas.

Tal como foi feita a modelação para AVAC, foram também feitas as modulações para as restantes disciplinas. Enquanto que mostrar os diversos projetos referentes a outras disciplinas não acrescentaria valor a este artigo, pode-se no entanto mostrar o resultado real da implementação de todos os projetos (AVAC, hidráulica, desenfumagem, caminhos de cabos, etc.) no hospital, o que é apresentado seguidamente.

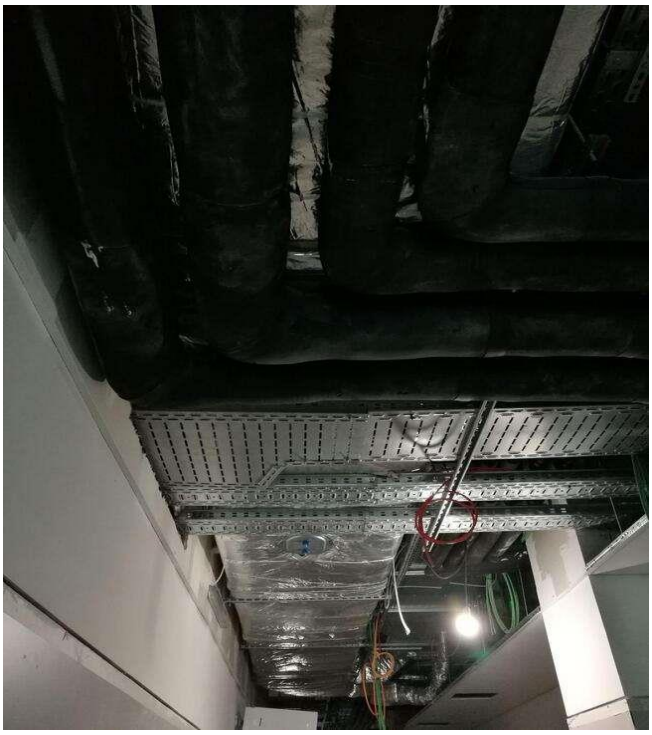


Figura 4 – Conduta AVAC (ao fundo) alternada com uma calha de suporte de cabos elétricos (ao meio) e com a rede hidráulica (mais próxima e com o isolamento de cor preta).

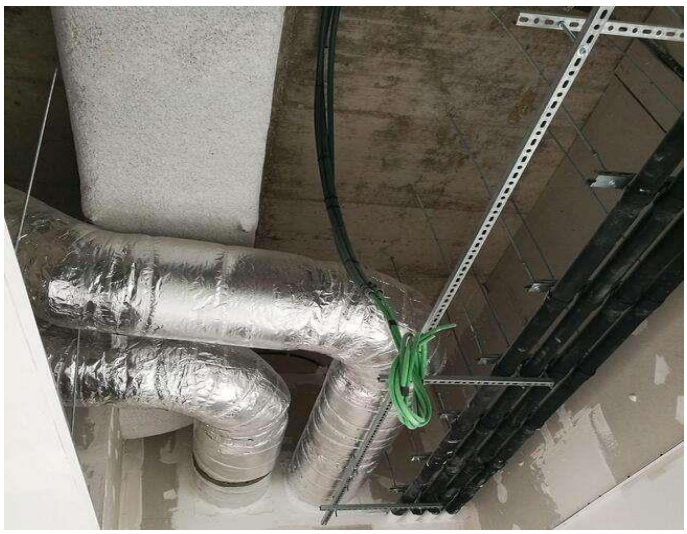


Figura 5 – Conduta da desenfumagem em cima à esquerda passando por cima e rente a tubos de climatização e com a rede hidráulica passando à direita.

Figura 6 – Compatibilização de várias condutas de desenfumagem e insuflação com condutas vindas de UTA's exteriores e com a rede hidráulica no Piso 3.

As diferentes fotografias acima constituem portanto uma prova de como através de Revit foi possível converter um projeto altamente complexo e de grande precisão numa realidade funcional, poupando assim tempo (que poderia resultar de uma compatibilização menos harmoniosa das diferentes disciplinas) e materiais de construção (que podiam resultar da necessidade de ter que refazer partes, devido a uma tradução pouco fiel do projeto para a realidade). Consequentemente, ao poupar-se no tempo e nos materiais de construção, acaba por se poupar nos custos da obra.

4.2 SGTC

Nesta secção são apresentados diferentes aspetos relacionados ao SGTC ao nível de campo e de supervisão e controlo. Seguidamente serão apresentadas duas interfaces de visuazliação: uma ao nível de campo, incoportada num dos chillers, e outra ao nível de aplicação, de acordo com o modelo TCP/IP.

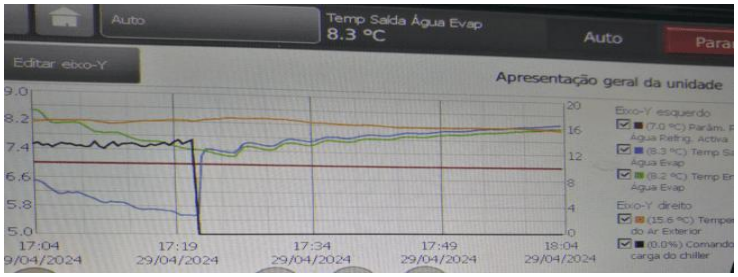


Figura 7 – Tela gráfica incorporada nos chillers para fim de monitorização e análise de dados de desempenho no local. Este gráfico em particular representa a evolução temporal das temperaturas e comando de caraga no chiller.

Figura 8 – Tela gráfica localizada numa sala de controlo para verificação e controlo do estado de operação dos registos corta-fogo.

De modo a que os dados possam chegar do nível de campo para o nível de aplicação, estes são agregados primeiramente em formato digital em quadros compostos por DDCs, que tanto realizam algum controlo básico de diversas componentes baseando-se nos inputs das mesmas, como transmitem essa informação ao nível da aplicação/gestão.

Como exemplo, numa das salas técnicas do edifício técnico, encontra-se um pequeno cérebro de controlo do Hospital, recebendo informação sobre todos os sistemas presentes nas várias salas técnicas do edifício técnico. Esta informação é processada nos DDCs, de modo a que são originadas e transmitidas respostas diretamente às diversas componentes existentes no edifício técnico, de acordo com parâmetros pré-definidos. Por outro lado, essa informação é também integrada no SGTC, ficando acessível ao nível da gestão e permitindo assim um controlo e monitorização centralizados dos sistemas responsáveis pela produção de calor, frio, abastecimento elétrico do Hospital, entre outros.

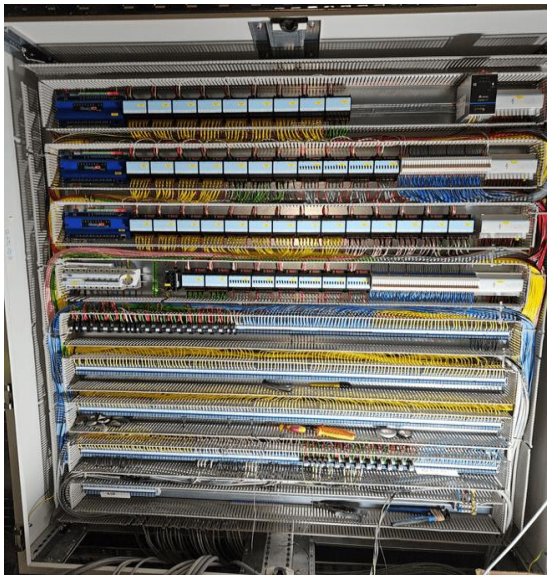


Figura 9 – Implementação do Q.GTC acima representado, com inúmeras ligações de e para os sistemas presentes no edifício técnico, além de DDCs, a azul escuro no canto superior esquerdo.

Ainda que existam quadros exclusivamente dedicados ao SGTC como o que se pode ver em cima, outros quadros como os quadros elétricos deciados a AVAC ou à iluminação também tiveram que ser integrados no SGTC. Esta integração foi conseguida através montagem dos quadros elétricos pela Tecnorém. Seguidamente apresenta-se o fabrico de um dos quadros que foram integrados no SGTC, neste caso referente à iluminação.

Figura 10 – Fabrico de quadro de potência KNX (para iluminação) pela Tecnorém.

Figura 11 – Marcação CE[3] e normas internacionais que especificam os requisitos de operação e controlo de quadros, bem como de disjuntores de baixa tensão.

[3] assegurando que o quadro atende às regras do estado da arte em matéria de segurança em vigor na UE, não colocando em risco, a saúde e segurança de pessoas, animais domésticos ou bens

5 CONCLUSÕES

Graças à tecnologia BIM utilizada através de uma ferramenta MEP avançada (Revit), foi possível projetar e implementar as diversas infraestruturas técnicas com precisão milimétirca, evitando o conflito e a colisão entre cabos, condutas e canos dos sistemas elétricos, AVAC e hidráulicos, respetivamente. Esta eficácia na integração de infraestrutura correspondente às diferentes disciplinas envolvidas na construção levou à poupança de recursos e consequentemente à minimização de custos, a uma maior celeridade na entrega do projeto e a uma maior sustentabilidade na construção. A este fator inovador propulsionado pelas tecnologias digitais, acrescenta-se a integração no Hospital de um SGTC, com os quadros elétricos correspondentes construídos pela Tecnorém. Este sistema digital inteligente, responvável por uma recolha intensiva de dados, monitorização e controlo de variáveis (temperatura, iluminação, humidade, etc.) e sistemas de segurança, contribuirá para uma maior eficiência energética do Hospital, e consequentemente para uma maior sustentabilidade do edificado e redução de custos. Foi comprovado assim como o recurso a BIM através de uma ferramenta MEP e um SGTC contribuiram para que o Hospital tenha a designação legal de Edifício de Energia Quase Nula (NZEB).

REFERÊNCIAS

Beucker, S., Bergesen, J. D., & Gibon, T. (2016). Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. *Journal of Industrial Ecology*, *20*(2), 223–233. https://doi.org/10.1111/jiec.12378

Carvalho, J. P., Bragança, L., & Mateus, R. (2020). A Systematic Review of the Role of BIM in Building Sustainability Assessment Methods. *Applied Sciences*, *10*(13), Artigo 13. https://doi.org/10.3390/app10134444

Eastman, C. M. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.

Hu, Z., & Zhang, J. (2011). BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 2. Development and site trials. *Automation in Construction*, *20*(2), 167–180. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.014

Jason, U., & Umit, I. (2009). *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies: Concepts and Technologies*. IGI Global.

Minoli, D., Sohraby, K., & Occhiogrosso, B. (2017). IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, *4*(1), 269–283. https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2647881

Nawari, N. O., & Kuenstle, M. (2015). *Building Information Modeling: Framework for Structural Design*. CRC Press.

Smith, D. K., & Tardif, M. (2009). *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers*. John Wiley & Sons.

Wang, J., Wang, X., Shou, W., Chong, H.-Y., & Guo, J. (2016). Building information modeling-based integration of MEP layout designs and constructability. *Automation in Construction*, *61*, 134–146. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.10.003

Wang, L., & Leite, F. (2016). Formalized knowledge representation for spatial conflict coordination of mechanical, electrical and plumbing (MEP) systems in new building projects. *Automation in Construction*, *64*, 20–26. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.020

Wong, K., & Fan, Q. (2013). Building information modelling (BIM) for sustainable building design. *Facilities*, *31*(3/4), 138–157. https://doi.org/10.1108/02632771311299412

Zanni, M. A., Soetanto, R., & Ruikar, K. (2017). Towards a BIM-enabled sustainable building design process: Roles, responsibilities, and requirements. *Architectural Engineering and Design Management*, *13*(2), 101–129. https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1213153

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PÓS-VENDA

Diogo Conceição[a]

[a]MAP ENGENHARIA, Diretor de Garantia e Pós Venda

RESUMO

O artigo que se segue, pretende, de forma breve, esclarecer o que é a garantia de uma obra e quais as vantagens da mesma para o Dono de Obra. Por outro lado, pretendemos também demonstrar as vantagens para uma empresa de construção em prestar uma boa assistência de garantia ao seu cliente, transformando a existência de reclamações, numa mais-valia para a empresa de construção e sempre aliado ao objetivo principal de satisfação do cliente. O artigo aborda conclusões em áreas específicas nomeadamente ao nível da Qualidade Assegurada; Ação Corretivas; Ação Preventiva e Redução de Custos.

Palavras-chave: Garantia, Reclamação, Pós-Venda, Satisfação do Cliente**.**

1 INTRODUÇÃO

A garantia e pós-venda de uma obra de construção representam o compromisso legal e/ou contratual, assumido pela empresa de construção, assegurando que a obra é construída e entregue conforme as especificações definidas nos elementos de projeto e nos padrões de qualidade acordados e/ou estandardizados, de que quaisquer defeitos ou anomalias que surjam ao abrigo da garantia, dentro de um período específico, após a conclusão e entrega da obra, serão corrigidos pela empresa, sem custo adicional para o cliente. Este serviço, prestado ao cliente, é fundamental para a sustentabilidade e a reputação de empresas de construção. As empresas não apenas asseguram a satisfação do cliente mas, também, refletem a qualidade e a confiabilidade dos serviços prestados e produto entregue.

Por se tratar de uma fase do projeto cada vez mais contratualizada mas, também, legalmente obrigatória, a garantia de obra cumpre determinados conceitos temporais definidos no Código dos Contratos Públicos, que em boa parte, são transportados para os Contratos Privados, estabelecendo-se prazos de garantia consoante o defeito de obra e respetivo elemento constituinte. Nos termos do disposto no n.º 2 do artigo 397.º do Código dos Contratos Públicos (CCP), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 18/2008, de 29 de janeiro e Decreto-Lei n.º 84/2021, de 18 de outubro, os prazos são os ilustrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Prazos de garantia por elementos construtivos

Elemento Associado c/ Defeito	Prazo de Garantia
Elementos construtivos estruturais - as partes resistentes fundamentais da construção que suportam as ações a que a mesma está sujeita, funcionando em conjunto e sendo objeto de projeto específico; correspondendo a elementos que comprometem a estabilidade da construção e que, por vezes, não estão visíveis e/ou acessíveis.	10 Anos
Elementos construtivos não estruturais - as partes não resistentes da construção que são suportadas pelos elementos estruturais, com funcionalidades diferenciadas, sendo geralmente definidas no projeto de arquitetura; correspondendo a elementos que não comprometem a estabilidade da construção, sendo normalmente visíveis ou de acessibilidade fácil.	5 Anos
Instalações técnicas - as partes da construção necessárias à satisfação das exigências programáticas referentes ao fornecimento de serviços de apoio às funções da obra, podendo incluir redes com tubagens, cabos e acessórios.	5 Anos
Equipamentos afetos à obra, mas dela autonomizáveis - as partes da obra que se referem a equipamentos, que funcionam independentemente da mesma, podendo incluir máquinas, aparelhos com funções específicas ou mobiliário e respetivos acessórios.	3 Anos

Neste artigo, abordaremos a importância da existência de um departamento de garantia, para o cliente e sua influência na fidelização do mesmo, bem como, para a empresa construtora, caracterizando pelas melhores práticas da assistência em garantia e pós-venda, criando oportunidades de melhorias nas

metodologias de trabalho da empresa, focando as equipas na melhoria continua e prevenção dos problemas e aumentando a competitividade no mercado de construção civil.

2 MÉTODOS E BOAS PRÁTICAS / ASSISTÊNCIA EM GARANTIA

2.1 GESTÃO DE RECLAMAÇÃO

A atividade mais importante da assistência em garantia é a gestão das reclamações reportadas pelo Cliente à empresa construtora. Este é o principal objetivo desta área de trabalho e é sobre esta gestão que a existência de um departamento específico e profissionalizado se torna uma mais-valia para a empresa mas, acima de tudo, para o Cliente. A começar por existir uma pessoa, ou equipa, presente, focada e conhecedora dos processos de acompanhamento e tratamento das reclamações. Por outro lado, o cliente sente mais segurança pelo facto de saber que existe uma pessoa, encarregue de tratar as suas reclamações, processo esse sempre delicado e fundamental para qualquer cliente.

Por esse motivo, é fundamental que exista um processo de gestão de reclamações, claro, eficaz e capaz de assegurar que todas as reclamações têm uma resposta final ao cliente e respetivo encerramento.

Abaixo ilustramos na figura 1, um exemplo do processo de resolução de uma reclamação, através de um fluxograma de atividades:

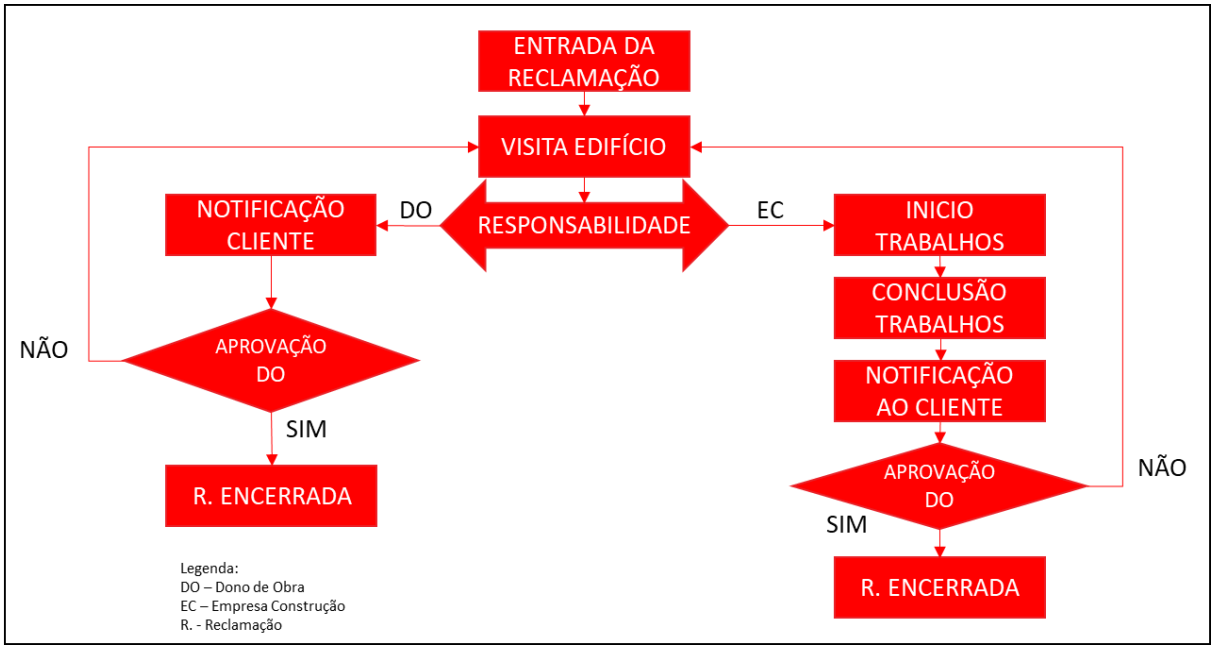


Figura 1 – Fluxograma de resolução de reclamações

De forma resumida, explicamos o fluxograma passo a passo, com o intuito de assegurar a correta interpretação do mesmo e de esclarecer a importância de cada fase.

Tudo começa com a receção da reclamação, enviada pelo Dono de Obra (DO), para a empresa de construção (EC). Obrigatoriamente esse reporte deve ser efetuado por escrito, com o pressuposto de assegurar o registo formal da reclamação entre o DO e a EC. A EC, deve dar entrada da reclamação, no seu sistema de gestão de reclamação. Segue-se o agendamento de visita ao edifício com o DO, com o intuito de verificar e analisar a reclamação. Esta fase é fundamental para que se atribua a responsabilidade da reclamação. Se se verificar que a reclamação tem origem num defeito ao abrigo da garantia, a responsabilidade de resolução é atribuída à EC. Se, por outro lado, se concluir que a

reclamação tem origem em má utilização ou numa não conformidades de projeto, nesse caso atribui-se a responsabilidade da resolução ao DO, considerando-se a reclamação fora do âmbito de garantia da obra. Muitas vezes esta fase é demorada, uma vez que pode ser necessário fazer testes ou trabalhos de despiste prolongados, a fim de aferir a causa e consecutivamente se conseguir atribuir a responsabilidade da reclamação.

Neste sentido, e se se verificar que a responsabilidade é da EC, deve a mesma definir e planear os trabalhos necessário, e agendar com o Dono de Obra o início dos trabalhos e a suposta conclusão dos trabalhos. Quando estes são finalizados é importantíssimo enviar uma comunicação ao DO, notificando-o da conclusão dos trabalhos e do encerramento em conformidade dos mesmos. Nesta fase o DO deverá dar o devido retorno, aprovando a conclusão da reclamação, encerrando formalmente a mesma. Na eventualidade de o DO não aprovar a reparação, ou seja, rejeitar a conclusão, deverá o ciclo reiniciar, com o objetivo de se obter a aprovação do DO.

Por outro lado, e caso se considere que a reclamação está fora do âmbito de garantia, deverá a EC notificar o DO, esclarecendo tecnicamente das razões para tal, solicitando a sua aprovação para encerrar a reclamação. Da mesma forma, que anteriormente explicado, a reclamação só será encerrada formalmente após a aprovação do DO.

Toda a documentação, utilizada e necessária, para análise, tratamento e encerramento da reclamação, deve ser compilada e arquivada, para memória futura. Não só, para o caso de a ocorrência voltar a acontecer, e desta forma ser de fácil acesso a obtenção dessa documentação, mas também, para poder ser utilizada com o intuito de aprendizagem e prevenção.

Mais, a compilação da informação de uma reclamação, quando corretamente pensada e arquivada, permite à EC, criar um histórico de informação, que quando analisado permite extrair muito conhecimento para a empresa, fundamental para a melhoria continua. Cabe à EC, saber utilizar a seu favor os erros criados na execução de um projeto, aprendendo, crescendo e evoluindo através dos mesmos. Por esse motivo, o capítulo que se segue ser tão importante.

2.2 PREVENÇÃO / APRENDER COM OS ERROS

Como transmitido no título anterior, há que criar do erro, uma oportunidade de melhoria. Só assim, errando e falhando, aprendemos e crescemos, tendo sempre como objetivo atingir o sucesso desejado e sermos o melhor.

É com esse intuito, que existem dezenas de frases, de líderes mundiais, filósofos e mesmos engenheiros, com um papel crucial na história, inspiradoras para aprender a enfrentar o erro, projetando-nos para a sabedoria, crescimento, desenvolvimento e sucesso. O Quadro 2 que se segue, apresenta alguns exemplos dessas frases.

É desta forma que a MAP Engenharia encara as não conformidades detetadas nos seus projetos, razão pela qual, em 2021, apostou na inovação e informatização da gestão das reclamações, assegurando a compilação da informação, num software próprio para a atividade, exponenciando a capacidade de análise, de criação de histórico, criação de conhecimento e não menos importante, tornando totalmente transparente para o seu Dono de Obra, que passou a ser parte integrante nesse software, com um “Login” próprio, permitindo-lhe reportar e acompanhar o estado de todas as reclamações do seu edifício.

Quadro 2 - Frases inspiradoras relacionadas com aprender com o erro.

Frases Motivacionais	Frases Motivacionais (Traduzido p/ Português)	Autor
"Success is stumbling from failure to failure with no loss of enthusiasm."	"O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo."	Winston Churchill
"Life is 10% what happens to you and 90% how you react to it."	"A vida é 10% o que acontece a você e 90% como você reage a isso."	Charles R. Swindoll
"The only man who never makes a mistake is the man who never does anything."	"O único homem que nunca comete erros é aquele que nunca faz nada."	Theodore Roosevelt
"I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work."	"Eu não falhei. Apenas descobri 10.000 maneiras que não funcionam."	Thomas Edison
"Success is not final, failure is not fatal: It is the courage to continue that counts."	"O sucesso não é final, o fracasso não é fatal: é a coragem de continuar que conta."	Winston Churchill
"The greatest mistake you can make in life is to be continually fearing you will make one."	"O maior erro que você pode cometer na vida é estar continuamente com medo de cometer um."	Elbert Hubbard
"It is through mistakes that one grows, learns, and achieves true success."	"É através dos erros que se cresce, aprende e alcança o verdadeiro sucesso."	John C. Maxwell

2.2.1 Análise de Dados

Com a implementação do Software de Gestão de Reclamações, a MAP passou a ter uma capacidade de análise da informação arquivada e compilada, totalmente diferente, conferindo-lhe muito mais capacidade para tomada de decisão, fidedigna e assertiva, acrescentando valor a um departamento muitas vezes evitado, e naturalmente, acrescentando valor à Empresa. Como exemplo disso, iremos apresentar de seguida, uma amostragem de extração de informação, utilizada pelo departamento de garantia para gestão e análise de reclamações e suas vantagens para a empresa.

Começamos por apresentar na figura 2, um exemplo de um gráfico circular, extraído do software, representando o diferente estado das reclamações reportadas, para um intervalo de tempo e um conjunto de edifícios definidos à priori. Este tipo de visão macro, é fundamental para o bom desenvolvimento e gestão do departamento de garantia e pós-venda.

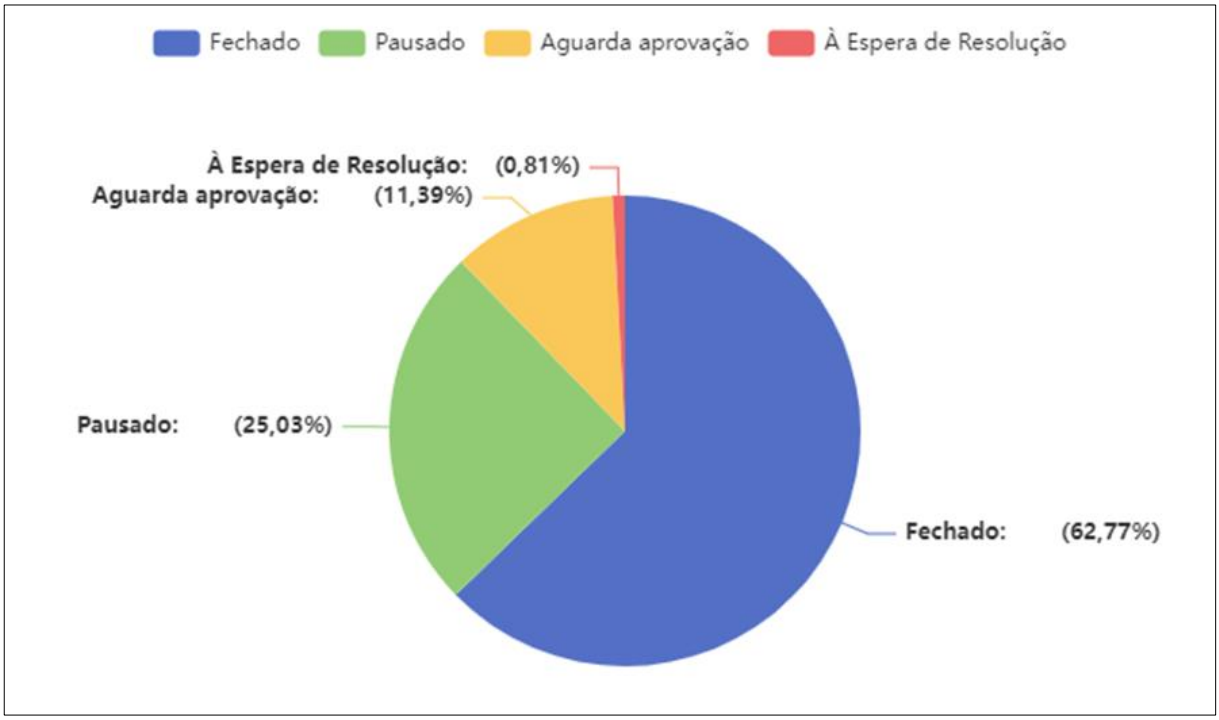


Figura 2 - Estado das reclamações

Continuando numa visão macro, na seguinte Figura 3, apresentamos, o desenvolvimento da atividade do departamento para um conjunto de edifícios, ao longo de um ano, permitindo-nos, por exemplo, avaliar a prestação e capacidade de resposta do departamento num intervalo de tempo definido, compreender e encontrar razões para tal dinâmica de reporte de reclamações e naturalmente preparar melhor o futuro, do departamento.

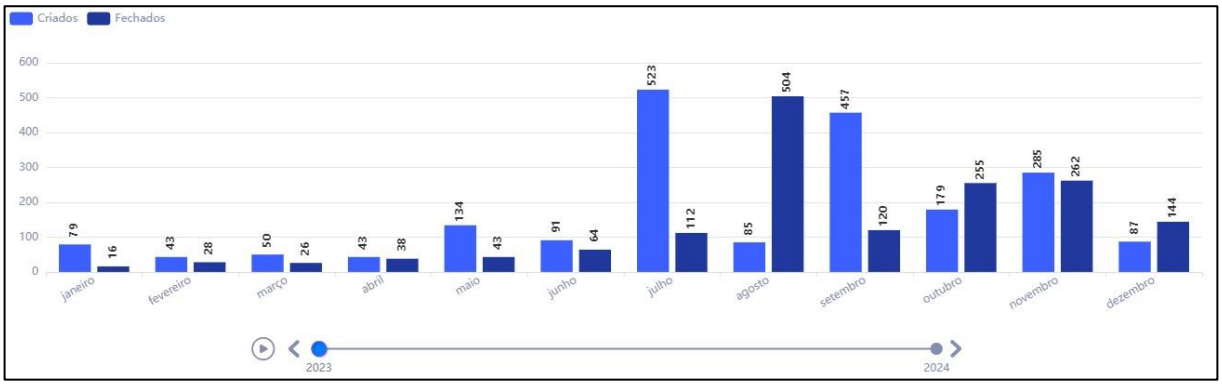


Figura 3 - Desenvolvimento num ano do reporte e conclusão de reclamações

A análise que se segue, na Figura 4, apresenta diversas vantagens, incluindo o departamento comercial, já que permite à empresa saber, quais os tipos de construção e respetivo sector, com mais reclamações apresentadas. Naturalmente, para estes tipos de projeto, a nossa atenção, cuidado e

acompanhamento, devem ser ajustados e adequados em virtude destes resultados.

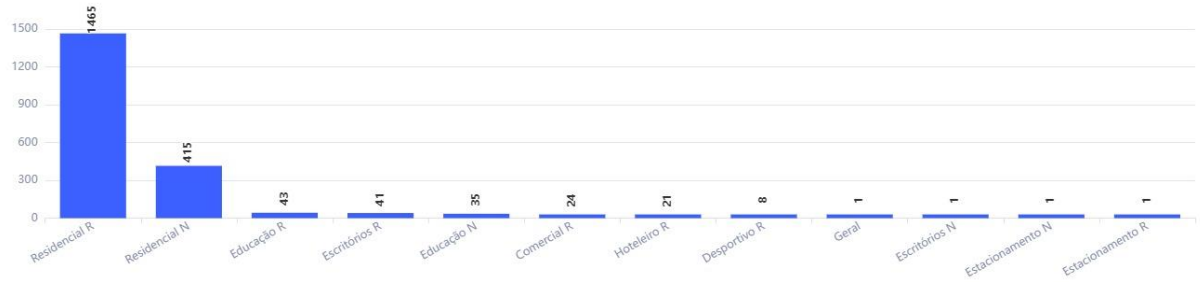


Figura 4 - Reclamações por tipo de construção/utilidade (N - Nova; R - Reabilitação)

Com um carácter mais detalhado, na Figura 5, o gráfico apresenta o número reclamações abertas, por edifício (cada barra represente um edifício na alçada do departamento de garantia da MAP, contudo por questão de confidencialidade, os nomes dos clientes são ocultos), num intervalo de tempo definido. Este gráfico, permite ao departamento avaliar e gerir as equipas necessárias para cada edifício, com o intuito de dar a resposta mais adequada aos seus clientes.

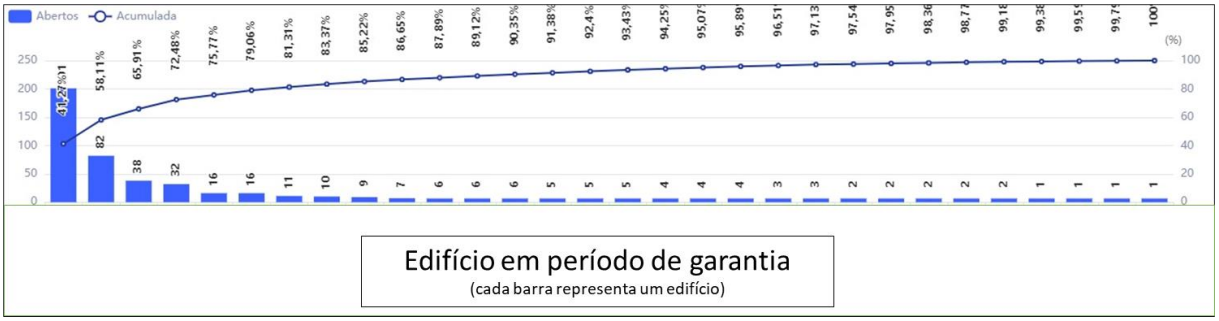


Figura 5 - Reclamações abertas por edifício com percentual

Por outro lado, a análise que apresentamos na figura 6, está relacionada com o número de reclamações existentes por área de atividade, relativamente a um edifício ou vários, e num intervalo de tempo definido. Esta informação é fulcral para se perceber quais as atividades com mais reclamações, permitindo à equipa de produção, focar os seus recursos no acompanhamento destas atividades, bem como, avaliar os subempreiteiros ou fornecedores envolvidos. Com este tipo de análise, o departamento de garantia dota a produção e todos os envolvidos, de um conhecimento fundamental para criar ações preventivas.

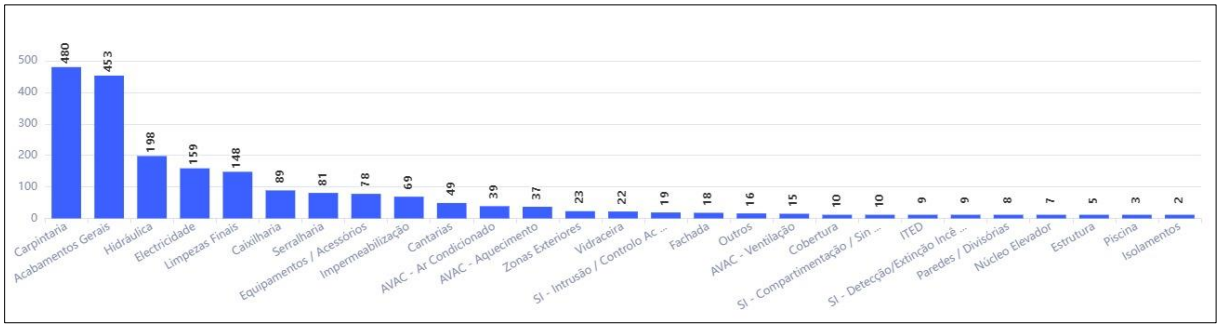


Figura 6 - Reclamações por área de atividade num intervalo de tempo

Na Figura 7, apresentada de seguida, aumentando o detalhe da análise das reclamações da especialidade, neste exemplo de carpintaria (apresentada na imagem anterior), por tipo de atividade.

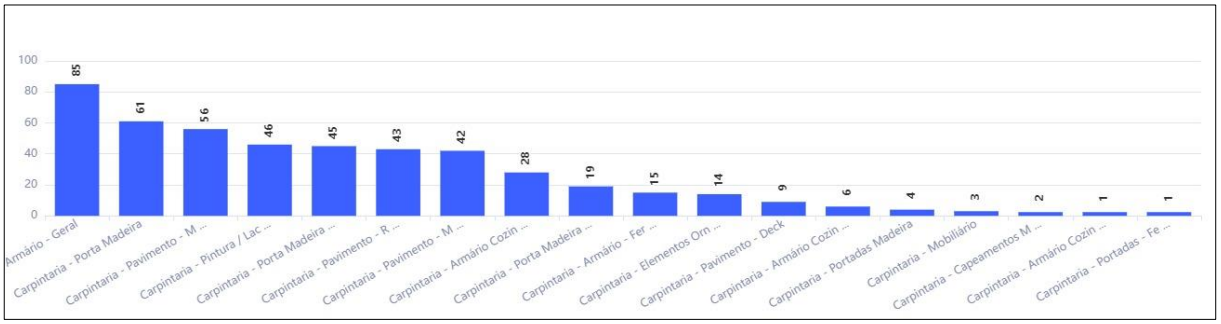


Figura 7 - Reclamações da área de carpintaria por tipo de atividade

Por fim, e apesar de este tipo de análise ter inúmeras possibilidades, tendo em conta, todos os parâmetros definidos na implementação do software, pela MAP Engenharia, concluímos com a Figura 8, ilustrando um possível "Dasboard / Painel Informativo", fundamental para numa visão geral e rápida, conferindo ao gestor a capacidade de avaliar o desenvolvimento do departamento de garantia.

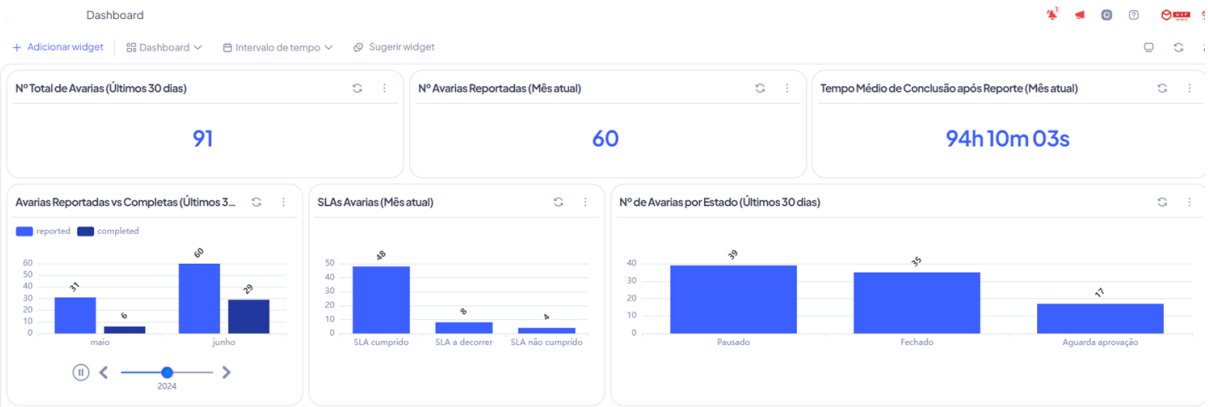


Figura 8 – "Dashboard" para análises gerais

Como nota explicativa, todas estas análises são possíveis, tendo em conta a definição inicial de diversos parâmetros e informação necessária a ser considerada pelo software, com o intuito de no futuro, tornar possível a extração e análise dessa informação, como mais-valia para a MAP.

2.2.2 Ações Preventivas

Como possível definição, prevenção é um conjunto de ações e medidas para evitar ou reduzir a ocorrência de não conformidades e consequentemente reclamações.

Para além de ser, provavelmente uma das formas mais eficaz de assegurar a satisfação do cliente, é também, uma forma importante de reduzir custos. Fazer mal, é mais caro que fazer bem à primeira. Neste sentido, apresentamos de seguida um exemplo de uma reclamação apresentada por um cliente, reclamação essa que mereceu uma atenção especial, pelos possíveis danos colaterais que estas situações podem causar, bem como, as medidas tomadas para evitar que tal volte a acontecer.

Exemplo de Não Conformidade

Reclamação do Cliente: Sinais de infiltração no teto e parede

Local: Edifício A – Piso 2 - Fração 2.5 – Varanda

Após agendamento da visita ao edifício, e por se tratar de uma infiltração, a análise da mesma terá de acontecer na fração 2.5 do piso 2, bem como, no piso superior.

Após se constatar, que o revestimento do piso das varandas, é constituído por deck de madeira, verificou-se necessidade de analisar a impermeabilização da varanda do piso 3, por cima da varanda com as patologias reclamadas.

Com esta análise, pretende-se verificar as zonas de escoamento das águas pluviais, perímetro da impermeabilização e/ou algumas zonas considerada críticas ou mais prováveis para existência de alguma falha no sistema de impermeabilização. Como nota à parte, todas os sistemas de impermeabilização, depois de executados, são testados com água estagnada, num intervalo de tempo definido, para assegurar a boa execução das mesmas.

Após remoção do deck e análise da impermeabilização, percebeu-se a origem da infiltração.

Na instalação do deck de madeira, assente em sarrafos de madeira, o parafuso utilizado para a fixação da tábua ao sarrafo, tinha uma dimensão superior, em algumas zonas, à espessura do conjunto sarrafo e deck. Por esse motivo o parafuso, perfurou a impermeabilização. Esta não conformidade ocorreu, uma vez que não foi tido em conta a existência de pendentes na camada de forma, onde o sistema de impermeabilização foi aplicado, sendo necessário diferentes alturas de sarrafos para assegurar a planimetria do pavimento em deck, razão pela qual, apenas em algumas zonas se verificaram os danos.

De seguida apresentamos na figura 9, 10, 11 e 12, as fotografias das patologias, das causas e da resolução, respetivamente.

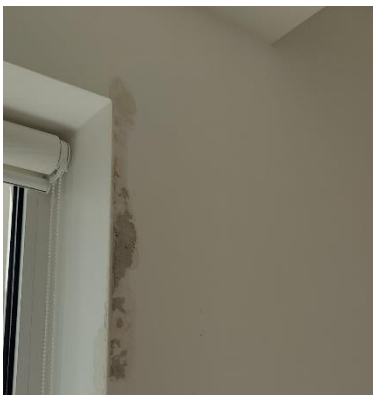


Figura 10 - Patologias reclamadas

Figura 9 - Furação da impermeabilização

Figura 11 - Sarrafo de madeira perfurando pelo parafuso do deck

Figura 12 - Reparação do sistema de impermeabilização

A partilha desta informação, a todas as equipas envolvidas na produção, bem como, ao departamento de qualidade, é um exemplo, de como tornar o erro, numa ação de aprendizagem e de prevenção futura noutros projetos.

A MAP Engenharia, por considerar fundamental esta partilha de conhecimento, todos os anos reúne todas as equipas envolvidas na construção, e apresenta as situações que considera mais pertinentes, importantes e relevantes das não conformidades reclamadas, com o intuito de prevenir erros futuros, tendo este sido uns dos casos apresentados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência das análises apresentadas no capítulo 2, pretendemos neste capítulo apresentar os resultados e respetiva discussão, com o intuito de definir medidas que mitiguem reclamações futuras.

Face ao exposto, os resultados e medidas corretivas consideradas fundamentais para ajudar a mitigar reclamações e aumentar a satisfação do cliente são as seguintes:

Como indicado na Figura 2, a percentagem de reclamações fechadas é de 62,77%. Naturalmente há que perceber se i) existe alguma razão especifica para tal, como existência de um edifício recentemente transferido para o departamento de garantia, uma vez que numa fase inicial o número de reclamações é normalmente superior, ii) existe falta de resposta por parte do departamento na resolução das reclamações. Neste caso, em específico, a MAP sabe que está correlacionado com a entrada de um edifício novo no departamento. Contudo, isso não significa que nenhuma medida deva ser implementada. Neste caso, a equipa do departamento de garantia, terá de se ajustar, assegurando que esse Cliente tem uma equipa adequada ao número de reclamações reportadas, seja essa equipa interna ou externa à MAP.

Da análise da Figura 3, é possível perceber que no mês de julho existe um número muito grande de reclamações reportadas. Explica-se esse acréscimo de reclamações, à receção de 2 edifício por parte do departamento de garantia, fazendo disparar a média de reclamações do ano. Contudo, percebe-se que a MAP, mediante esta situação, adotou as medidas necessárias para uma resposta rápida e eficaz à resolução das mesmas. Mais uma vez, a gestão de equipa internas e externas foram fundamentais nesta situação.

Através da Figura 4, os resultados são explícitos, no que respeita aos edifícios com maior número de reclamações. Em toda a construção do sector residencial, e em particular na reabilitação (R), são reportadas bastante mais reclamações que noutro sector qualquer. Este é um resultado expectável, uma vez se tratar, em grande parte, do investimento de uma vida dos proprietários. Naturalmente que uma reclamação comum e sem gravidade, na nossa habitação, causa muito mais transtorno que a mesma reclamação no nosso local de trabalho. Face ao exposto, podemos desde logo, na fase comercial, adotar medidas preventivas de ajustar, em função da tipologia do projeto, a percentagem de provisão para a atividade do departamento de garantia, tornando-nos mais competitivos. Por outro lado, ajustar as equipas da produção, a escolha dos subempreiteiros ou fornecedores e aumentar o controlo interno, em função da tipologia do projeto, são ações preventivas de redução de reclamações.

No que respeita à Figura 5, tratando-se um uma análise exclusiva para a gestão do departamento de garantia, uma vez refletir o edifício ou os edifícios, com maior número de reclamações pendentes de resolução. É em função deste tipo de informação, que mais uma vez podemos ajustar e definir as equipas necessárias para fazer frente às reclamações e assegurar uma resposta eficaz a cada cliente.

Por fim, no que respeita à Figura 6 e Figura 7, podemos aferir, em função do número de reclamações, qual a área e tipo de atividades com mais reclamações apresentadas, seja por edifício seja num conjunto de edifícios. Neste caso a atividade de carpintaria é q que apresente maior número de reclamações. Esta informação é importantíssima, para toda a empresa, por permitir-nos adotar várias ações de melhoria. Começamos pela escolha dos nossos fornecedores e subempreiteiros, tendo em conta que todas as reclamações estão associadas a uma entidade responsável. Assim, a MAP pode avaliar a qualidade final do produto entregue e dessa forma, avaliar a entidade fornecedora ou executante. Esta informação é bastante útil ao departamento comercial, no momento de consultar as entidades para preparação de propostas, bem como é fundamental para o departamento de produção, no ato de adjudicação dos trabalhos.

Por outro lado, a equipa de produção pode ajustar as suas equipas e estar mais atento às atividades com maior número de reclamações, apostando na prevenção.

Por fim, e também com o objetivo de prevenir reclamações futuras, ao partilharmos esta informação com o departamento de qualidade, vai permitir ao mesmo ter a capacidade de planear de uma forma mais eficaz e selecionada, o controlo efetuado em obra (muitas vezes com fichas de controlo de atividades), focando-se nas reclamações mais críticas ou importantes, alinhando objetivos comuns entre toda a equipa da MAP.

4 CONCLUSÕES

O respetivo artigo, teve como foco, abordar temas relativos com a garantia de obra, a existência de um departamento de garantia focado nessa atividade, bem como, elencar algumas vantagens da existência de um departamento de garantia, tanto para a empresa, como para o cliente final.

Face ao exposto e de acordo com os resultados apresentado e discutidos, é nossa convicção, não só pelo transmitido no artigo, que são um pequeno exemplo, mas acima de tudo pela experiência própria, como empresa de construção, das vantagens da existência de um Departamento de Garantia, para ambas as entidades.

Certos de que a estruturação do departamento de garantia da MAP, e sua inovação, foi criada e implementada para melhorar a capacidade de resposta ao cliente final e assegurar a sua satisfação.

Resumidamente, apresentamos algumas das conclusões que consideramos fundamentais para a empresa de construção:

- Qualidade Assegurada: Incentiva a empresa de construção a manter altos padrões de qualidade, sabendo que será responsável por eventuais correções.
- Ação Corretivas: A MAP ao possuir um departamento de garantia, assegura respostas mais rápidas e eficazes, na resolução das reclamações;
- Ação Preventiva: Existindo processos bem definidos e bem implementados, como a MAP têm, possibilita à empresa de construção aprender e, naturalmente, tomar medidas preventivas que melhorem a capacidade de trabalho, mitigando o número de reclamações em projetos futuros;
- Redução de Custos: Mediante partilha de informação, e respetiva mitigação de reclamações, permite à empresa reduzir custos de reparação, a médio e longo prazo;
- Melhorar Propostas Comerciais: Conciliando a experiência adquirida, pela equipa de produção e mais tarde pela equipa de garantia e pós-venda, possibilita a empresa de apresentar propostas mais competitivas e eficazes;
- Nova confiança: A prestação de uma boa garantia de obra, pode, num futuro, fazer ganhar a confiança, por parte do Cliente, por vezes perdida na fase de construção;
- Satisfação: Asseguramos a satisfação do Cliente, objetivo principal da MAP Engenharia;
- Novas angariações: Um cliente satisfeito, tem tendência a retornar e comprar novos projetos.

Por fim, por considerarmos fundamentais as vantagens para o Dono de Obra, apresentamos de seguida as nossas conclusões:

- Segurança: A garantia proporciona ao cliente a segurança de que qualquer reclamação, ao abrigo da garantia, será resolvida sem custo adicional;
- Qualidade: O Dono de Obra tem uma garantia adicional, de que o projeto será executado em conformidade, de acordo com as regras de boa execução, com os níveis expectáveis e de padrão de qualidade acordados e previstos;

- Confiança: Pelo facto de existir uma garantia formal/contratualizada e um técnico responsável pela assistência, o Dono de Obra sente mais confiança e tranquilidade, quando reporta uma reclamação, pois sabe que existe alguém dedicado a esse assunto;
- Valor de Revenda: A existência de uma garantia sobre a construção, aumenta o valor de revenda do imóvel, pois oferece uma segurança adicional ao futuro comprador.

Em resumo, a garantia de uma obra de construção é um elemento crucial, protegendo os interesses do cliente, assegurando que o investimento efetuado está protegido por um compromisso de qualidade e durabilidade para com a empresa construtora.

Como responsável e diretor do departamento de garantia da MAP Engenharia, e convicto de que existe sempre como melhorar, termino este artigo parafraseando Mohammed bin Rashid Al Maktoum, conhecido como, O Sheik CEO, “If you want to do something, make sure you are doing something spectacular and worthwhile. What is the point of doing something average? Always strive to do something better than the others around you.” and, “Do not think of small starts, dream of big finishes.”

REFERÊNCIAS

Diário da República, 2.ª série — N.º 146 — 31 de julho de 2014

The Sheikh CEO – Lessons in leadership from Mohammed bin Rashid Al Maktoum by Dr Yasar Jarrar;

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O BIM COMO RECURSO NA CONSERVAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO PATRIMÓNIO CULTURAL EDIFICADO: UMA APLICAÇÃO AO PALÁCIO MONSERRATE

Rita Machete [a]; Ana Paula Falcão [a]; Maria Gloria Gomes [a]; Rita Bento [a]

[a] CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, rita.f.machete@tecnico.ulisboa.pt; ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt; maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt; rita.bento@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O uso de modelos BIM no apoio às atividades de gestão e manutenção do edificado, tem merecido atenção por parte dos responsáveis pela sua conservação. A sua aplicação a edifícios com valor patrimonial (H-BIM - Heritage Building Information Modelling) destaca-se pela capacidade de armazenamento, numa plataforma centralizada, da informação relativa à gestão corrente do edifício e informação relativa ao seu contexto histórico, cultural e patrimonial.

O Palácio de Monserrate foi selecionado como caso de estudo, pela sua representatividade como um dos mais distintos elementos do património cultural português, da Paisagem Cultural de Sintra. Pela inexistência de informação geométrica detalhada sobre o edifício, foi necessário adquirir uma nuvem de pontos com recurso a um sistema de varrimento laser, e para a compreensão mais clara da composição estrutural foram aplicados ensaios não-destrutivos recorrendo à técnica GPR (*Ground-Penetrating Radar*). A decisão sobre o nível de detalhe foi crucial, não só para o registo adequado do estilo arquitetónico existente, mas também para garantir a funcionalidade do arquivo digital resultante, para gestão de informação e de apoio para a criação de modelos de simulação do comportamento estrutural e energético. No modelo H-BIM resultante foram registadas as propriedades dos elementos construtivos e estruturais, como atributos, e vertidos os dados de monitorização recolhidos com sensores de baixo custo. A metodologia desenvolvida neste trabalho permite garantir que o modelo H-BIM recebe os dados necessários à gestão otimizada do edifício, incorporando os resultados da simulação do comportamento energético e estrutural como atributos, assegurando um fluxo contínuo de informação e a atualização do modelo.

Palavras-chave: H-BIM; Digital Twin; Monitorização; Gestão

1 INTRODUÇÃO

A conservação do património construído, visando a valorização e preservação, é um processo que requer a aquisição e armazenamento de informações de natureza muito diversa: dados associados à sua história, às diferentes influências arquitetónicas, ao seu processo de construção, aos dados de manutenção e gestão, as mudanças de propriedade e transformações ao longo do tempo, entre outros (Osello et al., 2018).

Uma estratégia eficaz para preservar o conhecimento associado ao edificado, funcionando como uma base de dados centralizada, é a abordagem BIM (*Building Information Modelling*), que através da criação de um modelo geométrico do construído armazena todas as informações conhecidas sobre a construção nos elementos que definem o modelo. Assim, a aplicação da metodologia BIM demonstra-se adequada numa abordagem integrada dos processos de design, representação, produção e gestão do ambiente construído na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). A aplicação destes modelos estende-se a aplicações enquadradas num diagrama conceptual de sete níveis: representação geométrica 3D; seguindo os níveis 4D, que estende a utilização do modelo para incluir atividades de planeamento ou simulação; o 5D, que permite calcular quantidades e os custos dos elementos construtivos; o 6D, relacionado com a sustentabilidade e a análise do ciclo de vida; e o 7D, direcionado a atividades de gestão de operações e de instalações (Charef et al., 2018).

No domínio da conservação do património, a metodologia BIM está a desenvolver-se num paradigma de H-BIM (*Heritage Building Information Modelling*) que lida com a digitalização e modelação de estruturas históricas/patrimoniais (Murphy et al., 2013, 2009). Neste caso, as dimensões e convenções desenvolvidas para a abordagem BIM não podem ser aplicadas diretamente, dado que a construção de um modelo de um edifício existente apresenta desafios tais como a informação limitada sobre os elementos constituintes da estrutura e a modelação de geometrias complexas e irregulares. Assim, entre os primeiros passos da criação de H-BIM encontra-se o levantamento dos registos históricos e da situação existente através do levantamento geométrico. Neste contexto, a geometria atual do edificado pode ser obtida através de um levantamento tridimensional (3D) utilizando técnicas de aquisição extensiva de dados *in situ*, como a digitalização por sistemas de varrimento laser terrestre ou aérea e/ou métodos fotogramétricos (terrestres ou apoiados por UAV). A recolha destes dados e consequente modelação é acompanhada de uma sequência de desafios, dos quais são de referir, a limitações no processo de digitalização apenas às partes visíveis do edifício, a representação simplificada de formas e decorações arquitetónicas complexas e a atualização continuada das intervenções e transformações que ocorrem ao longo da vida de um edifício (Hull and Ewart, 2020). Para a aquisição de informação referente a materiais e técnicas construtivas, são obrigatórias campanhas experimentais *in situ*. Dada a identidade patrimonial dos casos em estudo tipicamente ser realizados ensaios semi-destrutivos e/ou não-destrutivos, tendo em conta as limitações locais e os recursos disponíveis, podendo variar entre a remoção de amostras de alvenaria, ensaios de macacos planos, ensaios de vibração ambiente e ensaios de GPR (*Ground-Penetrating Radar*) (Ponte et al., 2021). Portanto, a implementação do H-BIM requer muitas vezes uma abordagem personalizada à singularidade de cada edifício patrimonial, seguindo os seus componentes lógicos e adaptando-se a um conjunto de requisitos de modelação de informação. Da mesma forma, a gestão de edifícios históricos com recurso a abordagens BIM não está isenta de desafios, mas os benefícios são também bem conhecidos, desde a visualização à monitorização e documentação, realçando a importância de uma de base de dados centralizada (Hull and Ewart, 2020; Rocha et al., 2020; Yang et al., 2020).

No seguimento destas tecnologias, a implementação de *Digital Twin* tem-se mostrado promissora nas atividades em sistemas complexos nas disciplinas AEC. Ainda sem uma definição única e consensual

do que constitui efetivamente um *Digital Twin*, a sua implementação encontra-se associada com a aplicação de processos e ferramentas que são uma mais-valia para a gestão de ativos. Entre outros, a conexão a instrumentos/sensores para a implementação de soluções IoT (*Internet of Things*) e plataformas de armazenamento e visualização (*cloud-based platforms*) são algumas das tecnologias associadas a este termo (Vieira et al., 2022). No contexto AEC, *Digital Twin* pode ser entendido como "a conexão entre tecnologias na forma de um modelo digitalizado de um ativo físico, que suporta a transmissão de dados em pelo menos uma direção e a monitorização do ativo físico em tempo real" (El-Din et al., 2023). Segundo Kritzinger et al. (2018), consoante o nível de integração dos dados, existem três categorias de *Digital Twin*: o modelo digital, com um modelo digital de um objeto físico sem uma troca automática de dados; a sombra digital, um modelo digital com fluxo de dados automatizado unidirecional entre o físico e o digital; e o gémeo digital, um modelo em que os fluxos de dados entre o físico e virtual são totalmente automatizados. O nível de detalhe geométrico que constitui um modelo digital também é um tópico em aberto na comunidade científica. É evidente que este paradigma se encontra numa fase de desenvolvimento, com a sua adoção no domínio AEC, particularmente para a conservação do Património Cultural Construído, ainda na sua fase inicial (Vuoto et al., 2023).

O enriquecimento de um *Digital Twin* com um modelo geométrico detalhado como um H-BIM reforça a capacidade de representação detalhada num único ambiente, tanto da componente geométrica como da informativa proveniente da monitorização em tempo real. No presente artigo apresentam-se as etapas necessárias à construção de uma sombra digital do Palácio de Monserrate em Sintra, iniciando-se com processo de criação de um modelo H-BIM, a instalação de sensores baixo custo e a respetiva ligação dinâmica ao modelo.

2 CASO DE ESTUDO

O caso em estudo é o Palácio de Monserrate em Sintra, classificado Património Mundial pela UNESCO em 1995. Inserido no universo do romantismo inglês, com influências de William Beckford e do Lord Byron que visitaram o local antes da construção desta iteração do palácio em 1863, o palácio apresenta características revivalistas com influências mouriscas e góticas venezianas. O sistema estrutural do palácio baseia-se em paredes de alvenaria de pedra, aproveitando as paredes exteriores da ruína existente. Com esta informação é de notar que o atual edificado não foi a única iteração de edificado que ocorreu neste local.

Os primeiros registos de utilização do local datam a 1540 com a construção da capela a nossa senhora de Monserrate, que posteriormente deu nome ao palácio. De seguida, o terreno muda o uso para exploração agrícola, com a compra do terreno pela família Mello e Castro, contudo em 1755 o terremoto torna quase inabitável a área marcando o primeiro registo de destruição no local. De Visme, como arrendatário em 1790, encarregou-se da recuperação de Monserrate e construiu no local um castelo neogótico, com especial atenção a características como simetria, proporção e equilíbrio, condicionando a identidade local ao longo dos séculos. Seguidamente, este foi arrendado a William Beckford, que devido ao clima de guerra, em 1799 regressou a Inglaterra. Com isto, Monserrate ficou mais uma vez ao abandono, levando o castelo à ruína. É neste momento no tempo, em 1863, que o atual palácio é construído por solicitação de Francis Cook, segundo o projeto do arquiteto James Knowles Jr. (Neto, 2015).

3 MÉTODOS E RESULTADOS

Para o desenvolvimento de um modelo H-BIM o processo iniciou-se com a investigação de registos históricos de forma a encontrar informação pertinente, nomeadamente no que diz respeito às soluções e técnicas construtivas e as propriedades dos materiais constituintes, assim como as alterações a que o objeto em estudo foi sujeito ao longo do tempo. Como a informação em arquivo não foi extensa o suficiente para elucidar sobre todos os materiais e métodos construtivos, foram realizados ensaios não-destrutivos com radar de penetração no solo (GPR - G*round Penetrating Radar*). Pela inexistência de informação geométrica do estado atual do edifício foi necessário efetuar o levantamento por nuvem de pontos com recurso à tecnologia laser-scanning. Os dados obtidos em *in situ* foram posteriormente tratados de forma a obter nuvens de pontos ordenadas que ajudaram na determinação da geometria do modelo H-BIM. e Foram incluídos no modelo elementos associados com informação gráfica e não gráfica, atualizável sempre que necessário, sob a forma de atributos. Como último passo, e para tornar este modelo digital numa sombra digital, os dados de sensores de baixo custo foram conectados ao modelo H-BIM.

3.1 RECOLHA DE DADOS

Em referência à aquisição de dados geométricos, foram executados 336 scans com equipamento laser scanner terrestre (TLS) de forma a obter informação geométrica sobre o Palácio de Monserrate. Este trabalho foi executado através do uso do equipamento laser scanner Faro Focus S70. Equipamento laser de fase com uma resolução de 1 mm a 70 m, abrangendo um campo de visão de 360◦×300◦ em qua cada estacionamento foi configurado para obter uma densidade de pontos de acordo com o espaço a ser levantado e tendo em conta o nível de pormenor que se pretende representar. A densidade de levantamento configurada a 10m para cada scan varia entre o mínimo de 6.1mm e máximo de 12.3mm. Cada scan pode ser acompanhado com fotografias que dão cor a cada ponto levantado e permite a criação de uma vista panorâmica (Figura 1). O processamento, união, limpeza de pontos não relevantes e dizimação numa distância 5mm foi efetuado no *software* Autodesk ReCap®, resultando numa nuvem ordenada composta por cerca de 769643622 pontos (Figura 2).

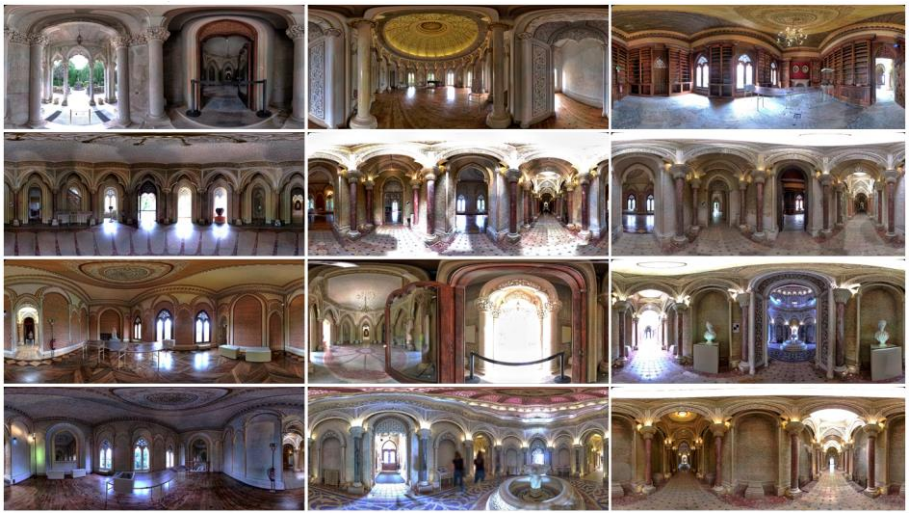


Figura 1 – Scans planificados.

Figura 2 – Nuvem de pontos.

De forma a georreferenciar a nuvem de pontos e consequentemente o modelo H-BIM, foi também efetuado um levantamento topográfico com um recetor GNSS (*Global navigation satellite system*) e estação total com o apoio de alvos topográficos localizados em pontos estratégicos (Figura 3). Os equipamentos usados foram respetivamente o recetor GNSS Trimble R2 e a estação total Leica TCR 703. As coordenadas (M, P) são relativas ao sistema PTTM06/ETRS89, e a coordenada H, altitude ortométrica, é relativa ao marégrafo de Cascais.

Figura 3 – Localização dos alvos de apoio da rede topográfica (quadrados) e ancoras de GNSS (círculos).

Relativamente à informação de soluções construtivas e materiais, foi necessário complementar a informação escrita de registos históricos com ensaios *in situ*. Devido ao âmbito do trabalho, foram aplicados ensaios não destrutivos de forma a manter a integridade dos elementos físicos do palácio. Numa primeira abordagem foi utilizada uma camara termográfica (FLIR i7) com o intuito de observar o aparelho construtivo, contudo a informação recolhida foi inconclusiva dada à temperatura uniforme da estrutura. Este facto pode estar relacionado com a localização na Serra de Sintra, que protege a estrutura da radiação solar direta prolongada em conjunto com o efeito do microclima local.

Uma vez que a abordagem anterior não permitiu aferir a informação necessária, houve necessidade de se efetuar uma segunda campanha de ensaios. Assim, nas áreas onde se desconhecia a técnica construtiva aplicada, foram realizados levantamentos com radar de penetração no solo (GPR) pela Morph Geociências, Lda, e coordenado pela equipa do IST. Foi realizado um total de 22 polígonos de inspeção 3D usando georadar de 1,6 GHz, 4 perfis discretos em pilares e dois perfis discretos de

georadar de 500 MHz no pavimento. Estes ensaios permitiram identificar o sistema construtivo de várias paredes até então não classificadas, como é o exemplo das paredes dos pisos superiores da torre central, que se revelaram feitas de alvenaria de pedra e não de tijolo, como inicialmente previsto. E o oposto foi observado nos nichos do corredor do piso térreo, em que se esperava alvenaria de pedra e constatou-se que na realidade era constituída por alvenaria de tijolo. Para os restantes elementos, as técnicas construtivas foram inferidas a partir de elementos inspecionados ou elementos expostos, como paredes visíveis no nível da fundação.

3.2 MODELAÇÃO BIM

Com os dados recolhidos necessários para a modelação, o modelo H-BIM foi desenvolvido no *software* Autodesk Revit®. A representação geométrica de um edifício num modelo BIM deve ser compatível com o uso a que se destina e ter um nível de detalhe adequado. No caso de edifícios históricos, no contexto de conservação, a informação relativa aos materiais e elementos deve ser registada com elevado detalhe em termos de propriedades e geometria. Para a dimensão de gestão o nível de pormenor pode ser simplificado, enquanto os atributos permitam operações ao longo do ciclo de vida do edifício. Caso se pretenda utilizar o modelo para simulações e análises estruturais, é necessário representar adequadamente os elementos do aparelho estrutural e corretamente atribuir propriedades (por exemplo, propriedades físicas e/ou térmicas a materiais).

Tendo em conta que este modelo pretende ser um H-BIM que engloba aspetos de monitorização (relativos à gestão) e também servir de apoio para a modelação numérica (estrutural e ambiental), a modelação suporta a simplificação da representação dos elementos decorativos e de arquitetura. Assim, os elementos representados foram modelados assumindo alguma redução de detalhe, mantendo a forma e a função globais, mas ignorando os elementos altamente decorativos. É de notar que todos os elementos mantêm os alinhamentos da nuvem de pontos e a forma geométrica global e foram consideradas várias abordagens para encontrar um equilíbrio entre as utilizações pretendidas.

Portanto, a modelação ocorreu com a utilização dos elementos base BIM para os elementos principais permitindo uma mais eficaz utilização de *schema* de dados. Contudo, nos elementos com menor relevância estrutural e de maior complexidade, este foram modelados de forma simplificada com apoio de *Model in Place*, permitindo a atribuição de categorias adequadas, mas perdendo informação associada. Isto sucedeu, por exemplo, no processo de modelação das cúpulas, em que foi importante para a identidade do espaço a modelação do formato complexo da cúpula, porém a forma da estrutura de suporte não é presentemente tão relevante de modelar detalhadamente, uma vez que não têm relevância estrutural. Também é de notar que foram representados elementos do sistema de vigas de suporte dos pavimentos e de telhados em zonas não visitadas; estes foram modelados tendo em conta a informação de registos fotográficos que ocorreram durante trabalhos de reabilitação, como também, através de inferência das zonas de fundações e coretes. Para os vários pilares, que apresentam um cariz arquitetónico mas que também exercem uma função estrutural, foram criadas famílias que representam os vários estilos permitindo a reposição e contagem de elementos. Finalmente, para a representação dos vãos, foram criadas famílias simplificadas de portas e janelas, de forma a manter a atmosfera geral em conjunto com a geometria pretendida. O modelo final é ilustrado na Figura *4*, funcionando como plataforma centralizadora da informação.

Figura 4 – Modelo H-BIM.

Com o objetivo de utilizar plenamente as qualidades do H-BIM de base de dados centralizada e multidisciplinar, foram adicionadas aos elementos pertinentes parâmetros informativos e ligação a relatórios relativos aos ensaios *in situ*. Para este efeito, foram criados parâmetros nos elementos de parede, permitindo identificar as áreas dos vários ensaios. Assim, foram registadas as datas dos ensaios em conjunto com informação detalhada do ensaio, para o caso da fotografia termográfica foram associadas as fotografias relevantes a cada elemento (Figura *5*) e no caso do GPR foi associado as imagens das janelas de inspeção (Figura *6*). Também foi adicionado para cada janela de inspeção GPR a nuvem de pontos que identifica o posicionamento e dimensão em análise, e em casos pontuais esta é acompanhada da janela 3D de inspeção.

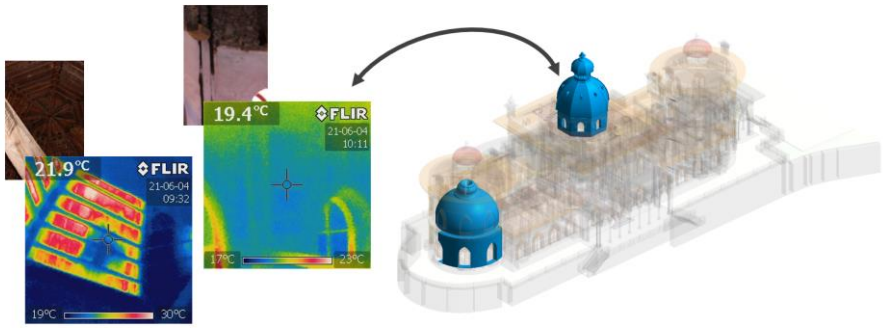


Figura 5 – Localização e fotos da câmara termográfica no modelo BIM.

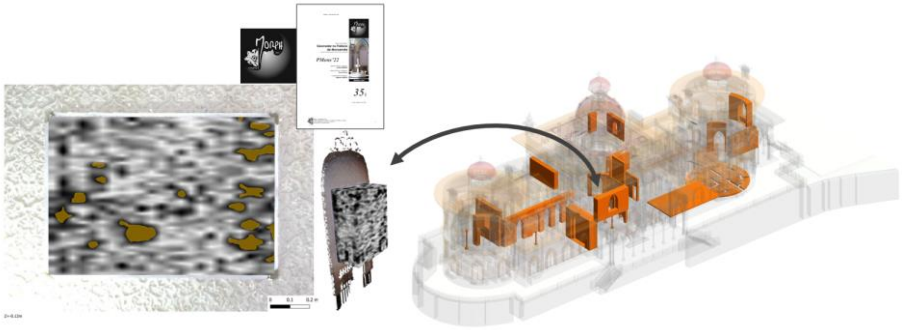


Figura 6 – Localização e dados das inspeções GPR no modelo BIM.

3.3 INSTALAÇÃO DE SENSOR E LIGAÇÃO DINÂMICA DE DADOS

Para a monitorização do palácio em tempo real, de forma a transformar o modelo H-BIM numa sombra digital, foi implementado um sensor de baixo custo numa fase preliminar de teste. O objetivo futuro é a ligação de uma rede de 20 sensores que permita o entendimento do objeto de forma detalhada ao longo do tempo de forma a proceder a uma gestão do património otimizada.

O sensor escolhido foi o OMRON 2JCIE-BU01. Este é um sensor de tipo USB, que se liga a uma rede através de USB ou Bluetooth® para permitir o envio de dados de medição. As grandezas que este sensor regista são a temperatura, humidade, luz, pressão barométrica, ruído sonoro, eTVOC e aceleração de 3 eixos, adequado para a monitorizar ambiental e estrutural. Devido a limitações encontradas em fases anteriores do trabalho, e com o objetivo de promover a automatização dos processos informáticos, para a implementação do presente sensor foi promovida uma colaboração com o INESC. Cada sensor foi programado e ligado a rede Wi-Fi através de *Raspberry Pi*, e através da rede LAN, o sensor liga-se ao *Google Cloud Project* permitindo que os dados em bruto (com medidas com intervalos de 1 segundo) sejam arquivados num ficheiro de texto 'csv' no google drive a cada 10 minutos (**Error! Reference source not found.**). Cada sensor terá então um ficheiro 'csv' associado que estará sempre a ser atualizado com a inserção de mais entradas de registos enquanto o sensor tenha acesso a rede.

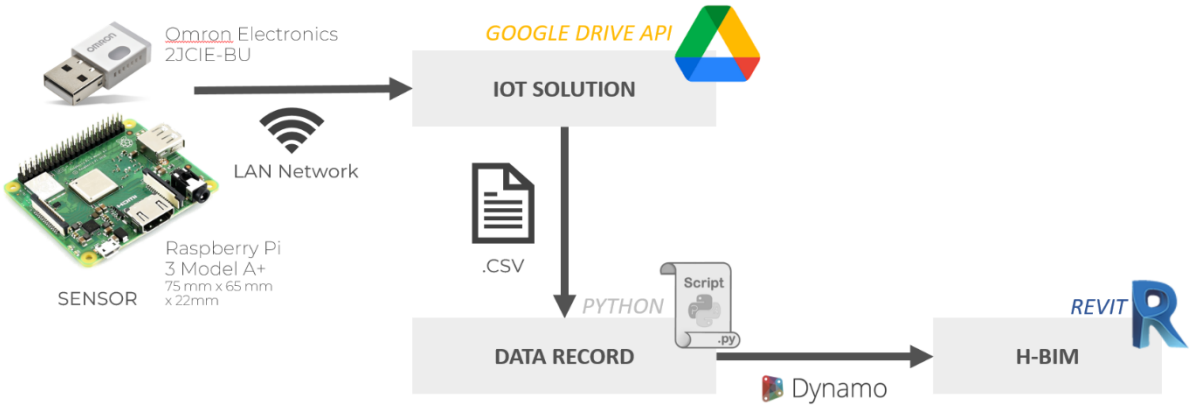


Figura 7 – Processo de implementação de sensor.

Com o ficheiro 'csv' resultante, de forma a retirar dados que sejam manuseáveis é necessário a implementação de rotinas *Python* que permitam a extração das entradas mais recentes de forma a verter estes dados no ambiente H-BIM. Numa primeira iteração, através de rotina *Python* foi extraída a última entrada do 'csv' geral, contudo este valor era pouco representativo da realidade observada pelo sensor. Deste modo, optou-se pela extração das últimas 3600 entradas referentes a última hora e foi calculada a média por cada parâmetro e registado num novo ficheiro texto 'csv'. Estes valores foram posteriormente vertidos no modelo efetuado em Autodesk Revit® através de rotinas *Dynamo*. Esta rotina converte o ficheiro 'csv' numa lista de parâmetros, que através de um *node* permite a inserção destes valores nos parâmetros de um objeto representativo do sensor, posicionado no modelo no local equivalente à posição real. Estes parâmetros são do tipo 'partilhados' para garantir que os valores aparecem nas tabelas de elementos e que também possam ser colocados em vista através de etiquetas. Com os valores inseridos no modelo é agora possível a criação de filtros cromáticos que permitem a interpretação expedita das medidas observadas pelos sensores. É de notar que devido aos filtros de visualização só permitirem a utilização de parâmetros partilhados por todos os elementos da categoria (como é o caso de parâmetros de projeto), foi optado pela utilização de

etiquetas que podem apresentar os parâmetros 'partilhados' (Figura 8**Error! Reference source not found.**).

Figura 8 – Localização do sensor no palácio e no modelo (com etiqueta).

Para a compreensão das grandezas registadas é importante entender o impacto destas para a gestão e/ou conforto do utilizador e do edifício. Medidas como a temperatura e humidade são relevantes tanto devido ao seu impacto no consumo energético (devido ao seu controlo com equipamentos AVAC) como para o controlo do conforto. Estes valores têm uma relevância acrescida quando se trata de um espaço museológico, onde as amplitudes relevantes para um estado sem risco devem contabilizar não apenas o utilizador como também o espólio em exposição e podem também variar com a estação do ano ou temperatura exterior (Kramer et al., 2018). Nesta abordagem preliminar para a aplicação de filtros, foram implementados patamares de valores, influenciados pela Organização Mundial da Saúde (WHO) e outros guias e regulamentações. Para a determinação de níveis pertinentes de conforto, estes valores foram culminando em três patamares de intervalos, com um patamar intermédio de temperatura recomendada de 20 a 26 °C que indica o conforto ideal, com um patamar de 16 a 20 °C ainda dentro do confortável nos meses de inverno, e com um patamar de 26 a 28°C para os meses de verão (Dimitroulopoulou et al., 2023). Do mesmo modo que foi atribuído patamares de conforto à temperatura, o mesmo pode ser feito para cada uma das restantes grandezas registadas considerando limites de conforto ou risco de saúde para o usuário do espaço. Para a criação destes patamares dentro do *software* BIM, foram criados parâmetros intermédios do que podem ser 'sim ou não' segundo uma fórmula de condições 'se' caso o valor se encontra dentro dos intervalos de valor previamente indicados. Resultando numa representação cromática no elemento etiqueta associado ao objeto representativo do sensor, variando entre azul – amarelo – verde – amarelo – vermelho de acordo com o parâmetro de temperatura.

4 CONCLUSÕES

A utilização da abordagem BIM para apoio às atividades de gestão e manutenção tem-se demonstrado vantajosa tendo atraído a atenção pela parte dos responsáveis pela conservação de edifícios. No caso do património existente, a aplicação de abordagens H-BIM é mais desafiante essencialmente pela falta de informação. Deste modo, a aplicação desta abordagem no caso de edifícios com valor patrimonial requer a digitalização e modelação de estruturas históricas/patrimoniais, a coleção de informação

obtida em registos históricos, levantamentos geométricos e campanhas experimentais *in situ*, entre outras. A articulação do modelo com a recolha de dados em tempo real, através de uma estratégia IoT, permite otimizar a gestão do espaço e informar a decisão sobre estratégias de manutenção. Esta combinação permite a transição do conceito H-BIM para sombra digital.

A solução metodológica apresentada neste artigo revela-se replicável para outros edifícios patrimoniais de forma a obter uma sombra digital com uma forte representação gráfica. O presente trabalho permite concluir: da necessidade de recolha de informação histórica e das intervenções que possam ter ocorrido, da vantagem da recolha da geometria atual fazendo uso de tecnologias laser-scanner, que permite a obtenção de uma nuvem de pontos extensiva que informa a modelação, do benefício de campanhas experimentais não-destrutivas, que permitem a aquisição de informação que se encontra em falta nos registos mas de extrema relevância para o entendimento do objeto, e por fim, da importância do registo continuado do ambiente local em tempo real e a aplicação de filtros/alarmes diretamente no modelo H-BIM que permitem ao gestor a identificação de problemas e ineficiências em tempo útil e a identificação expedita de soluções.

Em trabalhos futuros, prevê-se a implementação da rede completa de sensores no palácio. Com a rede implementada antecipa-se um aumento significativo de dados em análise. Nessa fase, a aplicação de *dashboards* informativos utilizando ferramentas como Microsoft Power BI poderá ser vantajoso, como também a ligação do modelo a uma plataforma *online* como o Speckle, facilitando a apresentação dos dados geométricos e valores dos sensores a vários utilizadores. Num futuro mais imediato, tenciona-se a aplicação de filtros interpretativos para as restantes grandezas, como a adição de valores de máximo e mínimo ao valor de média já calculado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (Ministério da Ciência e Tecnologia da República de Portugal) através de bolsa de doutoramento da unidade de investigação CERIS [bolsa número 2020.09705.BD]. Os autores também agradecem à equipa de trabalho INESC, Diogo Caetano, e Fábio Magalhães Dias. E por fim aos Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A..

REFERÊNCIAS

Charef, R., Alaka, H., Emmitt, S., 2018. Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views. Journal of Building Engineering 19, 242–257. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.028

Dimitroulopoulou, S., Dudzińska, M.R., Gunnarsen, L., Hägerhed, L., Maula, H., Singh, R., Toyinbo, O., Haverinen-Shaughnessy, U., 2023. Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. Environment International 178, 108127. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108127

El-Din, M.N., Martins, J.P., Pereira, P., Ramos, N., 2023. Digital Twins na Indústria AEC: Conceitos fundamentais. Construção Magazine 117.

Hull, J., Ewart, I.J., 2020. Conservation data parameters for BIM-enabled heritage asset management. Automation in Construction 119, 103333. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103333

Kramer, R., Schellen, L., Schellen, H., 2018. Adaptive temperature limits for air-conditioned museums in temperate climates. Building Research & Information 46, 686–697. https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1327561

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51, 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S., 2013. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 76, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S., 2009. Historic building information modelling (HBIM). Structural Survey 27, 311–327. https://doi.org/10.1108/02630800910985108

Neto, M.J., 2015. Monserrate A casa romântica de uma família inglesa. Caleidoscópio.

Osello, A., Lucibello, G., Morgagni, F., 2018. HBIM and Virtual Tools: A New Chance to Preserve Architectural Heritage. Buildings 8, 12. https://doi.org/10.3390/buildings8010012

Ponte, M., Bento, R., Vaz, S.D., 2021. A Multi-Disciplinary Approach to the Seismic Assessment of the National Palace of Sintra. International Journal of Architectural Heritage 15, 757–778. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1648587

Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., Ferreira, V., 2020. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. Heritage 3, 47–67. https://doi.org/10.3390/heritage3010004

Vieira, J., Clara, J., Patrício, H., Almeida, N., Martins, J.P., 2022. Digital Twins in Asset Management: Potential Application Use Cases in Rail and Road Infrastructures, in: Pinto, J.O.P., Kimpara, M.L.M., Reis, R.R., Seecharan, T., Upadhyaya, B.R., Amadi-Echendu, J. (Eds.), 15th WCEAM Proceedings, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer International Publishing, Cham, pp. 250–260. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96794-9_23

Vuoto, A., Funari, M.F., Lourenço, P.B., 2023. Shaping Digital Twin Concept for Built Cultural Heritage Conservation: A Systematic Literature Review. International Journal of Architectural Heritage 1–34. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2258084

Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., Landes, T., 2020. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. Journal of Cultural Heritage 46, 350–360. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE GERAÇÃO DE LINGUAGEM NATURAL PARA A CRIAÇÃO DE MQT – APLICABILIDADE À PLATAFORMA PRONIC

Yanh Ribeiro[a]; Jorge Teixeira[a]; Joaquim Moreira[a]; Hipólito Sousa[b]; Flávia Carvalhido[c]; Henrique Lopes Cardoso[c]

[a] ICS / CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, yribeiro@fe.up.pt, jalt@fe.up.pt, jjm@fe.up.pt

[b] CONSTRUCT-GEQUALTEC - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Ed. G, 4200-465 Porto, Portugal, hipolito@fe.up.pt

[c] Laboratório de Inteligência Artificial e Ciência de Computadores (LIACC) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, up201806857@edu.fe.up.pt, hlc@fe.up.pt

RESUMO

A composição de um MQT (Mapa de Quantidade de Trabalhos) exige a tradução para formato de texto de toda informação pertinente de um projeto de construção. Uma tarefa que, sem os devidos mecanismos de interoperabilidade, demanda um grande esforço em atividades de baixo valor agregado e pode recorrer em incoerências, erros e omissões de informações relevantes do projeto. A crescente complexidade dos projetos tem tornado essa tarefa particularmente desafiadora. A plataforma ProNIC, pioneira na digitalização da informação na construção em Portugal, facilita a criação de MQT a partir de artigos normalizados de trabalhos de construção. A interoperabilidade do ProNIC com a metodologia BIM (*Building Information Modeling*) permitirá a criação de MQT de forma simplificada, reduzindo trabalho manual da equipe de projeto. Porém, os textos-base desses artigos seguem estruturas rígidas e predefinidas, dificultando a criação de MQT excecionais, por exemplo, para inovações contratuais como conceção-construção ou compras públicas verdes (*Green Public Procurement* – GPP).

Recentemente, ferramentas como chatGPT têm ganho grande notoriedade pela habilidade de interpretar e criar textos em linguagem natural. A capacidade dessas ferramentas ou tecnologias de processamento de linguagem natural (*Natural Language Processing* – NLP), permitem vislumbrar a possibilidade de criação de textos de MQT a partir de informações originadas de peças escritas ou desenhadas dos projetos.

A aplicação preliminar, a nível exploratório, de ferramentas existentes de geração de linguagem natural, revelou grande afinidade à composição dos artigos ProNIC. A atual ligação das informações estruturadas dos modelos BIM aos artigos ProNIC, somada a uma futura geração automática de textos evidenciam a evolução dos processos de criação de um MQT.

Palavras-chave: Mapa de Quantidade de Trabalhos, Sistemas de Gestão da Informação, Processamento de Linguagem Natural

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Mapa de Quantidades de Trabalhos (MQT) é um elemento estruturante na conceção de um projeto de construção. Desempenha um papel fundamental na definição do contrato de empreitada, sendo responsável pela "tradução" de toda informação relevante do projeto em elementos de texto, os chamados artigos (Ribeiro et al. 2022). Em outras palavras, o MQT deve discriminar os trabalhos a realizar, as quantidades e incluindo todas as informações que podem influenciar a precificação do trabalho de construção, seja na caracterização do elemento construtivo, do material, da forma de execução do trabalho ou outras informações pertinentes.

Para além da importância do MQT num projeto único, a normalização das informações contidas em MQTs de projetos diversos permite otimizar o controlo do dono de obra sobre os seus projetos, possibilitando a criação de indicadores, a comparação entre projetos e a avaliação dos desempenhos e resultados obtidos, etc. (P. Mêda et al. 2023). Porém, essa importância muitas vezes não se reflete na qualidade do trabalho realizado para a criação dos MQTs. Tradicionalmente, a criação de um MQT de projeto envolve um esforço humano significativo, com a participação de muitos componentes do projeto de várias especialidades, trabalhando num documento único que deve incluir informações contidas tanto em peças escritas, como memórias descritivas e justificativas, memorias de cálculos, cadernos de encargos, especificações e condições técnicas, como em peças desenhadas, como as plantas, cortes, alçados, pormenores, etc. Portanto, a suscetibilidade a erros, omissões e incoerências entre os elementos de informação dos projetos e do MQT acaba por ser bastante elevada (Ribeiro et al. 2022, 2023).

Com a crescente complexidade dos projetos, a procura por métodos mais eficientes e precisos para a criação de MQTs tem aumentado significativamente. Nesse contexto, a plataforma ProNIC surgiu como uma solução inovadora e pioneira em Portugal para a gestão da informação dos projetos (Mêda et al., 2023). Ao integrar um articulado normalizado a uma ferramenta informática, o ProNIC aumentou significativamente a fiabilidade nos MQTs produzidos por meio da plataforma. A utilização de artigos com textos normalizados, que permitem o preenchimento dos parâmetros realizando validações tanto a nível das especificações dos próprios artigos como na verificação de redundância entre diferentes artigos, reduziu substancialmente a quantidade de erros (Ribeiro et al. 2023).

O ProNIC passou por uma grande atualização recente, tanto a nível informático como em termos de conteúdos técnicos, permitindo à plataforma atualizações mais facilitadas do conteúdo. Ao integrar parâmetros dos artigos em códigos únicos, atribuir unidades inequívocas e padronizar os valores admissíveis a estes parâmetros, juntamente com a melhoria do modelo informático, garante que o conteúdo esteja uniforme em todo articulado, mesmo após atualizado. Esta integração facilitará, inclusive, a ligação a modelos BIM e a adaptação às novas demandas, como as Compras Públicas Ecológicas (CPE). No entanto, nesta atualização, identificaram-se elementos de composição do texto que dificultam atualizações mais frequentes e de menor impacto, como os prefixos, sufixos e a própria estrutura fixa do texto do artigo. Nesse sentido, soluções como o Processamento de Linguagem Natural (*Natural Language Processing* - NLP) podem atender às necessidades do ProNIC.

A geração de texto em linguagem natural é uma tarefa do NLP que tem sido amplamente aplicada recentemente, recebendo muita atenção tanto do público como da comunidade científica. Desde o lançamento do chatGPT ao público, as possibilidades de aplicação da geração de textos em linguagem natural têm sido bastante exploradas, levando ao desenvolvimento de muitos trabalhos de investigação sobre como aplicar a geração de texto a diferentes domínios.

A aplicação de NLP na criação de MQTs utilizando modelos como o chatGPT poderia transformar dados estruturados de projetos em textos técnicos. A integração de ferramentas NLP ao ProNIC pode permitir que os textos dos artigos sejam gerados sem a necessidade de uma estrutura fixa onde os parâmetros devem "encaixar", trazendo maior fluidez ao texto do artigo e possibilitando alterações menores sem a necessidade de uma revisão completa do artigo em questão.

Portanto, a possibilidade da utilização conjunta de ferramentas com grandes capacidades justifica a exploração desta aplicação. A integração entre o ProNIC e o NLP poderá potenciar a geração de MQT permitindo que as atualizações estejam focadas no que é mais relevante: a consistência, qualidade e coerência das informações constantes no MQT, delegando a tarefa da composição do texto a ferramentas especializadas nisso.

1.2 PRONIC E A GERAÇÃO DO MQT NORMALIZADO

1.2.1 Breve histórico do ProNIC

O ProNIC – Protocolo para a Normalização da Informação Técnica na Construção – é uma plataforma desenvolvida para a normalização de conteúdos técnicos em projetos de construção de edifícios. Sua criação foi uma resposta à necessidade de melhorar a gestão da informação na indústria da construção, estruturando, gerenciando e distribuindo dados de forma eficiente (Monteiro, Mêda, e Poças Martins 2014). Esta plataforma visa aprimorar a comunicação e coordenação entre os envolvidos nos projetos, reduzindo erros, omissões e incoerências nas informação do projeto (Pedro Mêda, Sousa, e Moreira 2014; Ribeiro et al. 2023).

O projeto apoiado pelo Governo Português iniciou em 2005, com o objetivo de criar estruturas de desagregação de trabalhos (WBS - *Work Breakdown Structure*) completas para obras de construção, capazes de suportar os requisitos de especificação para cada atividade, incluindo as características obrigatórias associadas aos produtos de construção. A plataforma deveria suportar e gerir todos esses conteúdos (P. Mêda, Moreira, e Sousa 2018). A partir de 2009 a plataforma foi amplamente utilizada em um grande programa de remodelação das escolas portuguesas, a Parque Escolar, EPE (Pedro Mêda, Sousa, e Moreira 2014). Neste programa, foi possível entregar, pela primeira vez, uma vasta quantidade de projetos de construção normalizados, sendo amplamente testado e validado em um projeto que envolveu mais de 2000 profissionais a utilizar a plataforma (Pedro Mêda e Sousa 2014; Pedro Mêda, Sousa, e Moreira 2014).

1.2.2 MQT Normalizado

A padronização da informação é crucial para garantir a qualidade e a consistência das informações, facilitando a gestão dos ativos construídos. A falta de padronização pode levar a uma gestão ineficiente onde conceitos iguais podem ser tratados de maneiras diferentes, dificultando análises mais profundas e exigindo esforços manuais para identificar e vincular informações inconsistentes. Portanto, a padronização promovida pelo ProNIC é fundamental para a melhoria da gestão da construção (Pedro Mêda et al. 2021; Ribeiro et al. 2023).

Assim, a criação de Mapas de Quantidades de Trabalhos normalizados destaca-se como uma das principais funcionalidades do ProNIC. A elaboração do MQT no ProNIC requer a seleção de artigos e a inclusão de informações detalhadas sobre materiais, elementos e trabalhos relevantes. Esses dados são inseridos em campos designados como parâmetros do artigo, completando o texto padronizado e resultando em um artigo normalizado, único, que caracteriza as condições específicas de cada projeto.

Um exemplo de artigo padrão do ProNIC segue o seguinte formato: "Execução de PILARES em betão armado normal "cinzento", incluindo fornecimento, colocação, compactação e cura de betão $1, $2,

$3, $4, $5 $6; transporte, montagem, desmontagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem para $7 e escoramento $8; fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras certificadas em aço $9, e todos os trabalhos, materiais e execução de acordo com o projecto." Os $número representam parâmetros que serão selecionados pelos projetistas com valores previamente validados pela equipa técnica. Por exemplo, o $1 neste caso significa 'Resistência à compressão' e pode receber os valores: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105, C100/115. Além do valor, o $número pode também conter um prefixo, um sufixo e uma unidade atrelada. Neste artigo, por exemplo, o $5 chamado 'Dmax do agregado' tem como prefixo o termo "Dmax" e a unidade "mm".

Os valores das listas também podem passar por validações. Neste exemplo o $1 possui validações como: se o valor selecionado for C30/37, o $2 que representa a 'Classe de exposição ambiental' só poderá receber um destes valores: XC2, XA1[a], XF1, XS1[a], XC3, XD2[a], XC4, XC1, XS2[a], XF2, X0, XD1[a]. Assim, valores selecionados em um $numero podem limitar a escolha de outros $numero, ou mesmo invalida-los, neste caso, seria selecionado um valor "N/A".

Em resumo, um artigo padrão do ProNIC tem um formato de texto que pode ter os seguintes elementos: Texto padrão, prefixo, valor admissível, unidade e sufixo, podendo em alguns casos os prefixos, sufixos, unidades e valores admissíveis não existirem ou ficarem omissos devido a uma validação anterior.

Portanto, a revisão dos artigos do ProNIC deve concentrar seus esforços na qualidade e coesão das informações técnicas, e ao nível do artigo, especialmente nos valores admissíveis, unidades dos $numero e em como eles se relacionam entre si nas regras de validação. Revisar o texto, prefixos e sufixos representa um desperdício de esforço em tarefas com pouco valor agregado, sendo por vezes uma revisão relativamente complexa devido à variedade de textos, prefixos e sufixos possíveis para os artigos. Portanto, a possibilidade de utilizar o processamento de linguagem natural para solucionar esse problema é uma alternativa promissora.

1.3 INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE LINGUAGEM NATURAL (NLP)

O Processamento de Linguagem Natural (NLP) é uma área de investigação da inteligência artificial que se foca em tarefas de compreensão e geração automáticas de linguagem natural. Aplicações baseadas em modelos de NLP, como o ChatGPT, têm demonstrado capacidades notáveis em interpretar e gerar textos coerentes em linguagem natural (Brown et al. 2020), abrindo novas possibilidades para automação em diversas áreas, incluindo a engenharia civil.

Os *Large Language Models* (LLMs), ou Modelos de Linguagem de Grande Escala – dos quais são exemplos representativos o GPT-4 (OpenAI et al. 2024) e o LLaMa (Touvron et al. 2023) – são modelos de aprendizagem profunda treinados em vastas quantidades de texto. Estes modelos podem compreender e gerar linguagem natural com alta precisão, tornando-se ferramentas valiosas para tarefas complexas, como a geração de textos técnicos (Li et al. 2022). Para alcançar as mencionadas capacidades de geração complexas e precisas, os LLM necessitam de ter milhões de parâmetros e múltiplas horas de treino (Wei et al. 2022), requerendo uma grande quantidade de recursos computacionais para os treinar e utilizar. Existe um grande esforço da comunidade científica para a criação de LLMs mais pequenos e que usem menos recursos computacionais, mas que alcancem capacidades de geração semelhantes aos grandes modelos que dominam o estado da arte (Ma, Fang, e Wang 2023).

Os LLMs disponíveis de forma pré-treinada – para aplicação mais simplificada, sem necessidade de treino – são na sua maioria treinados em conjuntos de dados textuais extremamente variados, que nem sempre estão ligados ao domínio-alvo de aplicação. Embora haja variabilidade, estes modelos são maioritariamente treinados com conjuntos de texto em inglês, apesar de haver um esforço para treinar modelos em línguas específicas ou em conjuntos de textos multilinguísticos (Li et al. 2022). Além disso, também existem LLMs treinados em dados textuais de domínios de aplicação específicos, como a medicina (Zheng et al. 2024). O treino dos LLM com uma vasta quantidade de dados relativos ao domínio-alvo é fundamental para alcançar capacidades de geração textual satisfatórias em tarefas nas quais é necessário conhecimento e estilo linguístico mais específicos.

Este estudo foca-se num domínio-alvo bastante particular, como documentos técnicos de construção escritos em português europeu, limitando à partida o desempenho de LLMs pré-treinados. Uma vez que o funcionamento base dos LLMs é reproduzir textos de acordo com os exemplos em que foram treinados, uma baixa quantidade de textos disponibilizados para uma determinada função resulta numa baixa qualidade dos textos gerados. Assim sendo, estes LLMs terão de ser aplicados tendo em vista técnicas de *transfer learning*, de forma a induzir capacidades de geração no domínio-alvo usando como base o conhecimento do modelo no seu domínio de treino. Concretamente, os LLMs serão induzidos a aplicar as suas capacidades de geração num contexto de documentos técnicos de construção em português europeu, tendo por base o conhecimento que obtiveram ao treinar em dados de domínios diferentes.

Para o estudo realizado, procurou-se direcionar a geração textual para excertos com estrutura pré-definida, seguindo a lógica da normalização utilizada pelo ProNIC. Neste caso, a avaliação focar-se-á na capacidade da ferramenta de geração de texto em interpretar os comandos, seguir a estrutura sugerida e principalmente, realizar pequenas variações no texto que permitam manter a integridade da escrita do texto. Através de *prompt engineering* foram criados comandos de contexto específicos ao domínio-alvo, que indicarão aos LLM o comportamento esperado na geração de texto, tanto através de múltiplos exemplos de geração pretendida como através de explicações explícitas em linguagem natural da tarefa de geração.

2 CASO DE ESTUDO

A ferramenta selecionada para a realização deste estudo a nível exploratório foi o chatGPT. Sendo uma ferramenta de ampla utilização, fácil acesso e resultado comprovadamente satisfatório em diversas áreas (Ayinde et al. 2023), é uma escolha que já permite vislumbrar a potencial deste uso, sem recorrer a ferramentas de uso específico, como é o objetivo do estudo.

2.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O ProNIC é uma plataforma de gestão da informação da construção que, dentre muitas outras funcionalidades que permitem manter a uniformidade da informação, possibilita a criação de Mapas de Trabalhos e Quantidades normalizados, ou seja, com artigos padronizados (P. Mêda et al. 2023). Esta normalização traz imensas vantagens a nível de gestão, mas pode representar um fator dificultador para atualizações.

A atual forma de funcionamento do ProNIC implica numa quantidade grande de “campos acessórios” que compõem um artigo, ou seja, campos que não carregam nenhuma informação técnica importante, mas que precisam existir para dar sentido ao texto do artigo. A grande quantidade e a variabilidade destes campos dificultam a edição do articulado de forma simplificada.

A atualização acaba por requerer um grande esforço de revisão destes campos acessórios, desviando-se do objetivo das revisões técnicas de garantir a informação mais atualizada, coerente e fiável (Ribeiro et al. 2023).

Os novos desenvolvimentos, como a ligação ao BIM, a integração com o GPP e as futuras implementações possíveis, como a ligação aos passaportes digitais de produto ou aos dicionários de dados, irão representar evoluções a nível estrutural do articulado, que potencialmente irão inviabilizar a existência destes campos acessórios fixos de texto, permitindo maior flexibilidade.

Portanto, com a oportunidade de revisão a níveis mais estruturais do articulado, a exploração inicial de ferramentas que possam permitir a redução de elementos componentes ao texto do artigo é útil e necessária para iniciar o trabalho de revisão, cientes das possíveis novas implementações que visam melhorar a funcionalidade dos artigos.

2.2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseia-se numa abordagem exploratória e prática, combinando revisão bibliográfica, análise de casos de uso e experimentação com ferramentas de processamento de linguagem natural (NLP) (McKim 2017). O primeiro passo foi realizar uma revisão detalhada da literatura existente sobre a criação de Mapa de Quantidade de Trabalhos (MQT) e a aplicação de NLP e *Large Language Models* (LLMs). Esta revisão incluiu a análise de artigos, publicações técnicas e estudos de caso relevantes, com o objetivo de identificar as melhores práticas e desafios associados.

Em seguida, a metodologia focou na aplicação prática de ferramentas de NLP, nomeadamente o chatGPT 3.5, para a geração de textos técnicos. Utilizando a estrutura de texto pré-definida pela plataforma ProNIC, foram realizados testes para gerar artigos normalizados, variando propositadamente as entradas de dados. A análise dos textos gerados centrou-se na coerência, precisão e, principalmente, consistência das respostas. Para isso, variaram-se as entradas de dados, incluindo omissão de valores, erros nos valores da lista, troca de ordem dos valores informados e entrada de valores não numéricos onde se deveria constar valores numéricos. Foram também realizadas combinações destas variações para avaliar o comportamento da ferramenta. Os resultados foram comparados com os esperados e, eventualmente os comandos foram aprimorados e os testes refeitos para reavaliar os resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação preliminar do chatGPT 3.5 na criação de MQTs demonstrou alta afinidade com a composição dos artigos ProNIC. Os textos dos artigos gerados foram, por regra, bem estruturados e seguiam o comando inicial. Como mencionado, o objetivo era que fossem gerados textos o mais próximo possível do original, alterando apenas o que fosse necessário para manter a clareza e a coesão. Três artigos distintos foram testados com opções que abrangiam a uma parcela da variabilidade de opções existentes no ProNIC.

O comando original dado a ferramenta seguiu seguinte modelo:

> *"Context for Article 7.1.1.1.1: Consider the following Portuguese textual entry template, with '$number' as information placeholders:*
>
> *'Execução de PILARES em betão armado normal "cinzento", incluindo fornecimento, colocação, compactação e cura de betão $1, $2, $3, $4, $5 $6; transporte, montagem, desmontagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem para $7 e escoramento $8;*

fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras certificadas em aço $9, e todos os trabalhos, materiais e execução de acordo com o projecto.'

Each placeholder $number has a meaning, a list of possible values and, optionally, a unit:

$1 means [name] 'Resistência à compressão' and has the following list of values [values] C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105, C100/115;

$2 means [name] 'Classe de exposição ambiental' and has the following list of values [values] X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1[a], XD1[b], XD2[a], XD2[b], XD3[a], XD3[b], XS1[a], XS1[b], XS2[a], XS2[b], XS3[a], XS3[b], XF1, XF2, XA1[a], XA1[b], XA2[a], XA2[b], XA3[a], XA3[b], N/A;

$3 means [name] 'Cloretos' and has the following list of values [values] Cl 0.20, Cl 0.40;

$4 means [name] 'Consistência' and has the following list of values [values] S1, S2, S3, S4, S5;

$5 means [name] 'Dmax do agregado' and has the following list of values [values] 6, 8, 12, 16, 20, 32;

$6 means [name] 'Aditivos e Adjuvantes' and has the following list of values [values] com incorporação de hidrófugo, sem incorporação de hidrófugo;

$7 means [name] 'Acabamento da superfície' and has the following list of values [values] betão a revestir, betão oculto, betão à vista com superficie lisa, betão à vista com estereotomias;

$8 means [name] 'Altura de escoramento' and has the following list of values [values] até 4.0 m, acima de 4.0 m;

$9 means [name] 'Tipos de aço' and has the following list of values [values] A400 NR, A400 NR-SD, A500 NR, A500 NR-SD, A500 ER;

Using this context, you may only answer back with a correctly formed sentence following the given template and using the information given to you in a prompt. Do not deviate from this context and prioritize grammatical correctness.

The inputs for the $numbers are: $1=C35/45; $2=XC4; $3=Cl 0,20; $4=S2; $5=16; $6=sem incorporação de hidrófugo; $7=betão oculto; $8=até 4.0 m; $9=A400 NR-SD'.

A resposta obtida a partir deste comendo inicial e dos dados fornecidos foi:

'Execução de PILARES em betão armado normal "cinzento", incluindo fornecimento, colocação, compactação e cura de betão C35/45, XC4, Cl 0,20, S2, Dmax 16; transporte, montagem, desmontagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem para betão oculto e escoramento até 4.0 m; fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras certificadas em aço A400 NR-SD, e todos os trabalhos, materiais e execução de acordo com o projecto.'

Houve uma omissão de uma parte do prefixo e da unidade do Dmax. O texto esperado era "Dmax do agregado 16 mm". Entretanto, esta omissão é aceitável devido por não estar explicitamente destacado no texto esses elementos.

3.1 TESTE COM OMISSÃO DE INFORMAÇÕES

Para o caso de informações omissas, foi informado que a resposta deveria ser uma pergunta solicitando o valor em falta e que apresentasse a lista dos valores possíveis para o parâmetro. O comando adicionado foi o seguinte:

> *In case there is some information missing, you may ask for it using the following template for questions: 'Value missing: [meaning of the $number missing]. The possible values are [list of values of $number]. Please input value:'.*

Nos casos de um valor em falta, o comportamento foi dentro do esperado. Respostas como as abaixo demonstram uma capacidade de perceber bem o contexto da informação solicitada e alterar o texto informado ao utilizador:

> *Value missing: Tipo de tijolo quanto à massa volúmica. The possible values are LD, HD. Please input value:*
>
> *Value missing: Pé-direito [m]. The possible values are numerical. Please input value:*

Ao responder às perguntas com o valor dentro da lista esperada, o texto era gerado exatamente como deveria. Se as respostas não estivessem no valor esperado, as perguntas eram refeitas até que um desses valores fosse informado.

Entretanto, nos casos em que mais de um valor estivesse em falta, houve inconsistência nas respostas. Por regra, a primeira resposta era sempre solicitando um dos valores em falta. No entanto, ao se informar este primeiro valor, as respostas variaram entre: solicitar o segundo valor em falta (resposta esperada); assumir valores de entradas anteriores; assumir valores de outros parâmetros; ou omitir este parâmetro do texto. Portanto, os resultados mostram que a funcionalidade é possível e funciona bem para casos simples, mas, em casos de múltiplos valores em falta, o comportamento foi fora do esperado, sendo este um sinal de alerta para melhorar o comando de entrada na tentativa de evitar este tipo de comportamento.

3.2 TESTE COM VALORES NUMÉRICOS

A verificação de valores numéricos foi solicitada quando, no lugar de uma lista de valores, havia a indicação de que o valor esperado deveria ser um valor numérico. Os comandos para indicar o valor numérico e solicitar correções em casos de erros foram os seguintes:

> *$11 means [name] ' Pé-direito [m]' and has a numerical value;*
>
> *In case there is a numerical value expected and that is not assigned as numerical, you may use the following template for ask for a numerical value: '[meaning of the $number missing] should be numerical, Please input a correct value:'*

Novamente, os resultados, em geral, foram dentro do esperado, mas houve um comportamento inesperado interessante. Nas primeiras vezes em que um número por extenso foi informado, a resposta seguiu o comando, solicitando o valor:

> *'Pé-direito' should be numerical. Please input a correct value:*

Porém, após algumas repetições de tentativas onde o valor escrito por extenso foi informado em formato numérico logo a seguir, de alguma forma foi assumido que os valores também poderiam ser

expressos por extenso. Importa ressaltar que este é um comportamento que, apesar de atrativo, pode não ser útil ou do interesse para a utilização final do ProNIC.

No mais, estes foram os únicos contrapontos para este caso, comportando-se como esperado em todos os testes realizados.

3.3 TESTE COM VALORES FORA DA LISTA

Foram realizados também testes com valores que não estavam na lista inicialmente informada de valores esperados. Este caso foi o que apresentou maior consistência. Sempre que houve uma lista definida no comando original do artigo e o valor informado não estava na lista, o seguinte comando foi aplicado:

> *In case the value assigned for a $number is not on the list of values expected, you may ask for a correct value using the following template for questions: 'The possible values for [meaning of the $number missing] are [list of values of $number], Please input a correct value:'*

Os únicos casos em que valores fora da lista foram ignorados, foram nos casos anteriormente citados em que havia uma omissão de múltiplos valores, e não foi solicitado o valor em falta, acabando por assumir algum valor aleatório de outro parâmetro ou omitindo o parâmetro de vez.

As únicas circunstâncias em que valores fora da lista foram ignorados foram nos casos anteriormente citados, onde havia omissão de múltiplos valores e não foi solicitado o valor em falta. Nestas situações, acabou-se por assumir algum valor aleatório de outro parâmetro ou omitir o parâmetro completamente.

Vale ressaltar que outro teste realizado, que não apresentou nenhum tipo de inconsistência, foi ao informar os parâmetros fora de ordem ($1, $2, $3…). Este caso foi testado em inúmeras entradas e todas tiveram resultados exatamente conforme esperado.

3.4 VALIDAÇÕES DE PARÂMETROS POR EXPRESSÕES

Outro tipo de teste realizado, foram as chamadas validações de parâmetros. Nos artigos, os valores assumidos por alguns parâmetros dependem de outros valores de outros parâmetros, sendo necessária, portanto esta validação. As regras utilizadas no atual ProNIC seguem regras lógicas no formato:

> *{'XC2', 'XA1[a]', 'XF1', 'XS1[a]', 'XC3', 'XD2[a]', 'XC4', 'XC1', 'XS2[a]', 'XF2', 'X0', 'XD1[a]'}.contains('$2') VALID IF '$1' == 'C30/37*

Portanto, considerando uma possível simplificação das regras para um formato de texto de linguagem natural, as regras foram traduzidas para o formato:

> *If the $1 is assigned C30/37, the $2 can only be assigned with one of the following values from the list [XC2, XA1[a], XF1, XS1[a], XC3, XD2[a], XC4, XC1, XS2[a], XF2, X0 or XD1[a]].*

Portanto, o conjunto de regras existentes em um artigo foram adicionadas ao comando original utilizado e solicitado uma mensagem de erro ao inserir valores que não se enquadram nas regras, como o exemplo a seguir:

> *If one of these rules is not obeyed, the following message should be displayed: 'O valor de $1[Value of $1 assigned] não é compatível com o valor de $2 [value of $2 assigned]. Por favor, revise os valores e informe novamente.'*

Entretanto, estas regras não apresentaram um comportamento consistente. Apesar de em muito casos, as respostas estarem sendo apresentadas de forma adequada, como no exemplo a seguir:

> *'O valor de $1[C35/45] não é compatível com o valor de $2 [XA3[b]] atribuído. Por favor, revise os valores e informe novamente.'*

Em vários outros testes realizados, valores que não cumpriam alguma regra eram aceitos, assim como valores que cumpriam perfeitamente a regra não eram aceitos. Este resultado pode apresentar que há um caminho para as regras funcionarem a partir do NLP tentando realizar ajustes ao comando, mas com o tipo de inconsistência apresentada, é possivelmente um indicativo de que esta validação deve ser realizada antes da entrada de valores para a geração de texto do NLP.

3.5 ADIÇÕES, SUPRESSÕES E ALTERAÇÕES DE TEXTO

Por fim, o teste mais direcionado para o objetivo inicial da aplicação do NLP no ProNIC foi a adição, supressão e alteração de textos do artigo, sem a necessidade de informar novos textos completos. Nos testes realizados, voltados principalmente para alterar artigos a fim de incluir informações de GPP ou outras adições, o comportamento foi perfeito. Em todos os testes realizados, a informação sobre o "Betão neutro em carbono" foi inserida como um novo parâmetro do artigo, seguindo o comando:

> *"Consider adding a new $number, $10 which means 'Betão neutro em carbono' and has the following list [values] Sim, Não. If the value of this input is Sim, it should be added to the text 'Execução de PILARES em betão neutro em carbono' replacing the passage 'Execução de PILARES em betão armado normal "cinzento"', If the value of this input is No, there is no change to the original text.*

Em todos os casos em que o parâmetro para betão neutro em carbono foi informado, o comportamento seguiu o esperado a partir do comando acima. Nos casos em que foi solicitada a supressão ou alteração de parâmetros, os textos também foram reescritos de maneira a não interferir na compreensão do texto do artigo. Mesmo nos casos em que a supressão foi resultado de um comportamento inesperado, o texto do artigo foi escrito perfeitamente conforme a omissão do valor em questão, sem prefixos, sufixos ou unidades relacionadas a esse parâmetro.

4 CONCLUSÕES

A aplicação de técnicas de NLP para a criação de MQTs pode representar um avanço significativo na digitalização dos processos de construção. Para um estudo a nível exploratório, conseguiu-se neste trabalho utilizar o chatGPT para gerar textos de artigos MQT de maneira promissora.

Durante a interação com o chatGPT, foi possível obter textos bem estruturados que poderiam ser incorporados aos MQTs e adicionar ou alterar parâmetros sem comprometer a estrutura base do artigo. Esta capacidade de gerar textos técnicos a partir de comando simples destaca o potencial das ferramentas de NLP para transformar o processo de criação de MQTs.

Os principais obstáculos encontrados se deram principalmente em relação à não conformidade das informações enviadas para a geração do texto. Nestes casos, é importante ressaltar que o plano para as futuras implementações do ProNIC prevê que as validações das informações sejam realizadas antes de uma possível atuação do NLP. Tanto com as informações partindo de uma iteração direta com o projetista, como com a interoperabilidade entre modelos BIM, passaportes digitais de produtos ou dicionários de dados, o ProNIC terá sempre a intenção de que o projetista tome sempre a decisão final sobre a informação que irá constar no MQT.

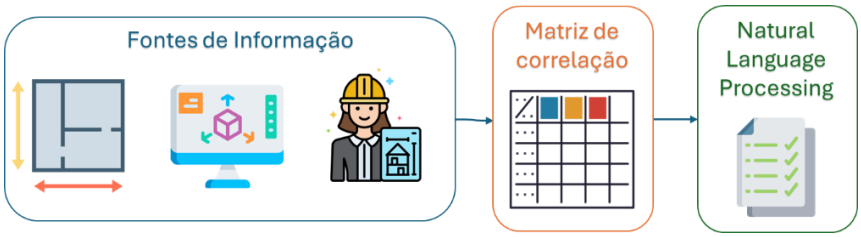


Figura 1 – Esquema do fluxo de informações do ProNIC

Para isso, a conceptualização de uma "matriz" estruturada para ligar as informações, como esquematizado na Figura 1, se faz necessária. Esta "matriz" de ligação dificilmente poderia ser implementada como uma matriz tradicional, mas o conceito de *switchboard* (quadro de distribuição) é mais adequado para interpretar a relação de muitos-para-muitos em múltiplas relações de um-para-um, como esperado (Teixeira et al. 2024).

Portanto, os esforços para implementação destes novos conceitos, que permitem interoperabilidades com modelos BIM, passaportes digitais de produtos e atualizações em vista das novas legislações como as compras públicas ecológicas, não podem ficar limitados à revisão estruturada dos textos fixos do ProNIC. A possibilidade de se utilizar ferramentas especializadas em escrita está bem adequada aos futuros planos de evolução da plataforma e possibilitando uma digitalização ainda maior dos processos de criação de MQTs, alinhando-se com as tendências de inovação no setor da construção.

Os desafios que já se apresentam a partir deste trabalho são principalmente a definição de quando e como (nos casos da necessidade de realização já na geração do texto) as verificações de validação, deteção de erros, omissões, serão realizadas para garantir que os valores inseridos estejam adequados; e consequentemente criar comandos adequados que assegurem a homogeneidade dos resultados obtidos, independentemente da fonte de informação utilizada.

Portanto, como sugestão de trabalhos futuros, ficam a realização de testes utilizando outras ferramentas de NLP além do chatGPT, realização de avaliações da qualidade e precisão dos textos gerados por NLP, avaliar a possibilidade de adaptação a normas e regulamentos específicos e verificar como pode-se automatizar a criação dos comandos para o NLP a partir das informações estruturadas obtidas a partir da matriz de ligação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS

Ayinde, Lateef, Muhamad Prabu Wibowo, Benhur Ravuri, e Forhan Bin Emdad. 2023. «ChatGPT as an Important Tool in Organizational Management: A Review of the Literature». *Business Information Review* 40(3): 137–49. doi:10.1177/02663821231187991.

Brown, Tom B, Benjamin Mann, Nick Ryder, Melanie Subbiah, Jared Kaplan, Prafulla Dhariwal, Arvind Neelakantan, et al. 2020. «Language Models Are Few-Shot Learners». Em Vancouver, Canada.

Li, Junyi, Tianyi Tang, Wayne Xin Zhao, Jian-Yun Nie, e Ji-Rong Wen. 2022. «Pretrained Language Models for Text Generation: A Survey». http://arxiv.org/abs/2201.05273 (22 de maio de 2024).

Ma, Xinyin, Gongfan Fang, e Xinchao Wang. 2023. «LLM-Pruner: On the Structural Pruning of Large Language Models». http://arxiv.org/abs/2305.11627 (29 de julho de 2024).

McKim, Courtney A. 2017. «The Value of Mixed Methods Research: A Mixed Methods Study». *Journal of Mixed Methods Research* 11(2): 202–22. doi:10.1177/1558689815607096.

Mêda, P., J. Moreira, e H. Sousa. 2018. «Delivering COBie with ProNIC—Compliance and Implementation». Em *EWork and EBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, eds. Jan Karlshøj e Raimar Scherer. CRC Press, 215–22. doi:10.1201/9780429506215-27.

Mêda, P., J. Teixeira, D. Calvetti, Y. Ribeiro, J. Moreira, e H. Sousa. 2023. «Legacy Practices Supporting BIM Adoption in Portugal – Reflections from a Large Use Case». Em *ECPPM 2022 - EWork and EBusiness in Architecture, Engineering and Construction 2022*, London: CRC Press, 679–86. doi:10.1201/9781003354222-86.

Mêda, Pedro, Hipólito Sousa, e Joaquim Moreira. 2014. «Pronic on the Schools Refurbishment Program – Contributions for the Construction Process Improvement». Em *REHABEND 2016: Contruction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management (6th REHABED Congress) : Burgos (Spain), May 24th-27th, 2016*, Santander (Spain): University of Cantabria, 1789–98.

Monteiro, André, Pedro Mêda, e João Poças Martins. 2014. «Framework for the Coordinated Application of Two Different Integrated Project Delivery Platforms». *Automation in Construction* 38: 87–99. doi:10.1016/j.autcon.2013.11.003.

OpenAI, Josh Achiam, Steven Adler, Sandhini Agarwal, Lama Ahmad, Ilge Akkaya, Florencia Leoni Aleman, et al. 2024. «GPT-4 Technical Report». http://arxiv.org/abs/2303.08774 (29 de julho de 2024).

Ribeiro, Yanh, Jorge Teixeira, Pedro Mêda, Joaquim Moreira, e Hipólito Sousa. 2022. «Sistemas de informação para a Construção 4.0: Conteúdos, integração e interoperabilidade – Estudo de caso». Em *CONSTRUÇÃO 2022*, Guimarães, Portugal: Universidade do Minho. https://civil.uminho.pt/construcao2022/files/Livros_Atas.zip>.

Ribeiro, Yanh, Jorge Teixeira, Pedro Mêda, Joaquim Moreira, Rui Sousa, e Hipólito Sousa. 2023. «A Construction Information System as a Lean Information Management Enabler – Case Study». Em Lille, France, 104–15. doi:10.24928/2023/0166.

Teixeira, Jorge, Luís Guardão, Pedro Mêda, Joaquim Moreira, Rui Sousa, Hipólito Sousa, e Yanh Ribeiro. 2024. «Processos sistemáticos de extração e de consolidação da informação de elementos em modelos BIM para parametrização de artigos ProNIC». Em *5º Congresso Português de Building Information Modelling Volume 1: ptBIM*, UMinho Editora. doi:10.21814/uminho.ed.142.49.

Touvron, Hugo, Thibaut Lavril, Gautier Izacard, Xavier Martinet, Marie-Anne Lachaux, Timothée Lacroix, Baptiste Rozière, et al. 2023. «LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models». http://arxiv.org/abs/2302.13971 (29 de julho de 2024).

Wei, Jason, Yi Tay, Rishi Bommasani, Colin Raffel, Barret Zoph, Sebastian Borgeaud, Dani Yogatama, et al. 2022. «Emergent Abilities of Large Language Models». doi:10.48550/ARXIV.2206.07682.

Zheng, Yanxin, Wensheng Gan, Zefeng Chen, Zhenlian Qi, Qian Liang, e Philip S. Yu. 2024. «Large Language Models for Medicine: A Survey». http://arxiv.org/abs/2405.13055 (29 de julho de 2024).

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A CONSTRUÇÃO TRADICIONAL NA VILA DE PEDRAS SALGADAS – UM CONTRIBUTO

Filipe Silva[a]; Sandra Pereira[a,b]; Anabela Paiva[a,b]; Cristina Reis[a];Jorge Pinto[a,b]

[a]UTAD (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal), filipe_silva11@hotmail.com, crisreis@utad.pt

[b]CMADE (Centre of Materials and Civil Engineering for Sustainability, Quinta de Prados, 5000-801, Vila Real, Portugal), spereira@utad.pt, apaiva@utad.pt, tiago@utad.pt

RESUMO

A construção tradicional de um lugar faz parte da paisagem desse espaço e também da sua respetiva identidade. É importante preservar e valorizar esse património. Paralelamente, a manutenção e a reabilitação deste tipo de edificado poderá também ser uma opção economicamente mais viável e sustentável. Para o efeito, a caracterização e a inventariação deste tipo de edificado tradicional é uma fase crucial para permitir uma boa gestão patrimonial futura. O trabalho de investigação aqui proposto está centrado nestas temáticas. Mais especificamente, este estudo está focado na caracterização do edificado tradicional da Vila de Pedras Salgadas. Esta Vila é conhecida mundialmente por ser uma importante Vila Termal Portuguesa e em que as suas águas são um bem natural de valor inestimável. Muitos dos edifícios abordados são do estilo Arte Nova e que corresponde ao período de auge de construção nesta Vila Termal. Por isso, este trabalho apresentará uma inventariação de diversos detalhes construtivos assim como uma respetiva análise estatística. Conclui-se que muitos destes edifícios tem sido alvo de processos de reabilitação e também se pretende dar alguma informação neste contexto. A informação vertida neste trabalho poderá ser útil para futuros trabalhos de reabilitação, assim como, para trabalhos construtivos novos.

Palavras-chave: Construção tradicional, Reabilitação, Pedras Salgadas

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de investigação está centrado nas áreas da valorização do património edificado, da construção existentes no interior de Portugal, da construção de zonas termais, da construção tradicional do Norte de Portugal, da arquitetura estilo Arte Nova, da inventariação do património, das técnicas construtivas tradicionais portuguesas, entre outras áreas.

Trabalhos de investigação com caraterísticas similares já foram desenvolvidos (Alice Tavares et al.2013, Javier Ortega et al. 2017, Jorge Pinto et al. 2014, Pinto, J. et al. 2022).

A valorização do património edificado é importante porque este representa um legado de identidade cultural de um lugar. Este facto ainda pode atingir um efeito mais importante nas zonas interiores, de baixa densidade populacional e em risco de desertificação, como é o caso da zona de estudo deste trabalho. Por sua vez, as construções tradicionais existentes nestas zonas apresentam técnicas construtivas peculiares que importa registar e perdurar.

Geralmente, as zonas termais portuguesas encontram-se localizadas no interior do território. São exemplos, as termas de Pedras Salgadas, as termas de Vidago, as termas de Chaves, as termas de Monção, as termas do Gerês, as termas de S. Miguel, entre outras.

Os respetivos edifícios são próprios de uma época e quando ocorreu a grande procura deste tipo de instalações e de serviços.

Hoje em dia, a economia associada às termas está em crescimento e, como tal, é importante renovar o edificado para acatar os atuais padrões de conforto e sustentabilidade.

Face ao exposto, o objetivo principal deste trabalho de investigação está focado no estudo do edificado antigo existente na Vila de Pedras Salgadas.

Após esta breve introdução, o mapa do centro urbano da vila de Pedras Salgadas é apresentado. Depois, alguns exemplos de edifícios emblemáticos desta vila serão mostrados no seu estado original. Seguidamente, alguns detalhes construtivos tradicionais também serão expostos. Na secção seguinte, alguns dados técnicos construtivos e a sua incidência serão indicados. Finalmente, algumas conclusões serão tecidas. Destas, destaca-se que o edificado antigo de vila de Pedras Salgadas é próprio de uma época rica associada à atividade termal decorrente no interior do país.

2 A VILA DE PEDRAS SALGADAS

Tal como foi referido anteriormente, a zona de estudo deste trabalho de investigação foi o centro urbano da vila termal de Pedras Salgadas. Esta vila pertence ao distrito de Vila Real, da região de Trás-os-Montes e Alto Douro, do concelho de Vila Pouca de Aguiar e da freguesia de Bornes de Aguiar. Esta vila tem cerca de 1933 habitantes e uma área com cerca de 45.4 km^2. Na Figura 1 é possível observar esta área e a localização de alguns edifícios estudados neste trabalho de investigação.

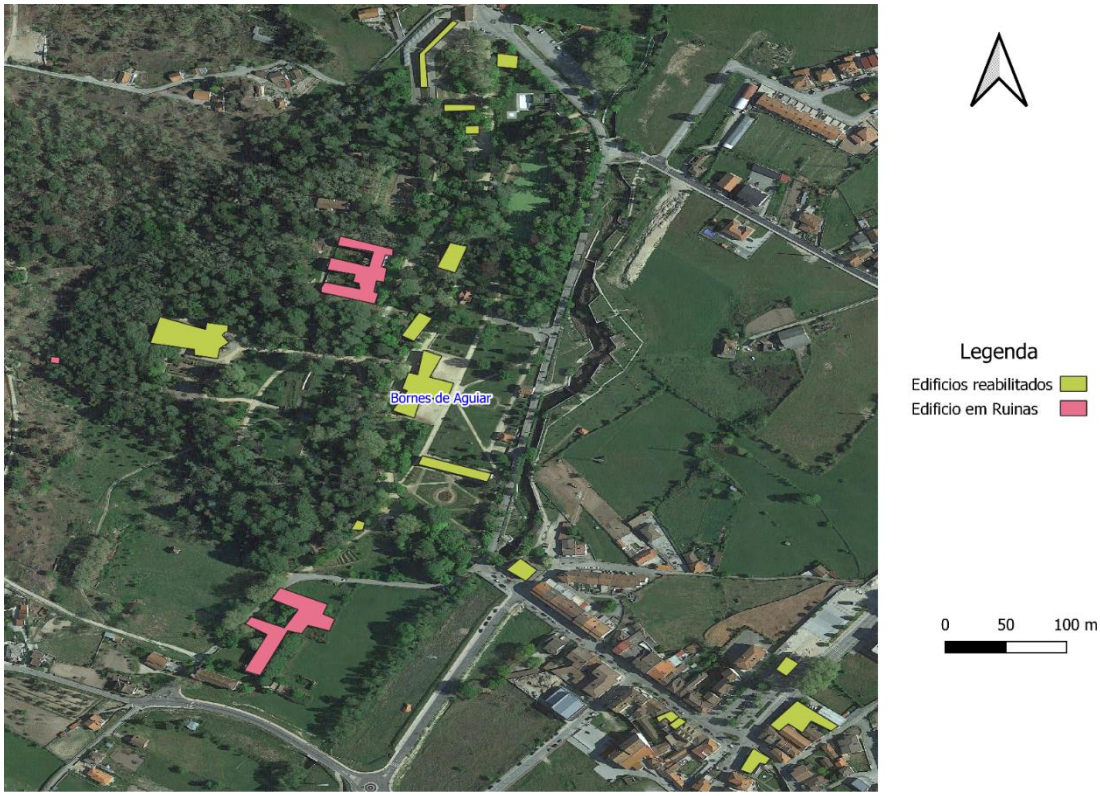


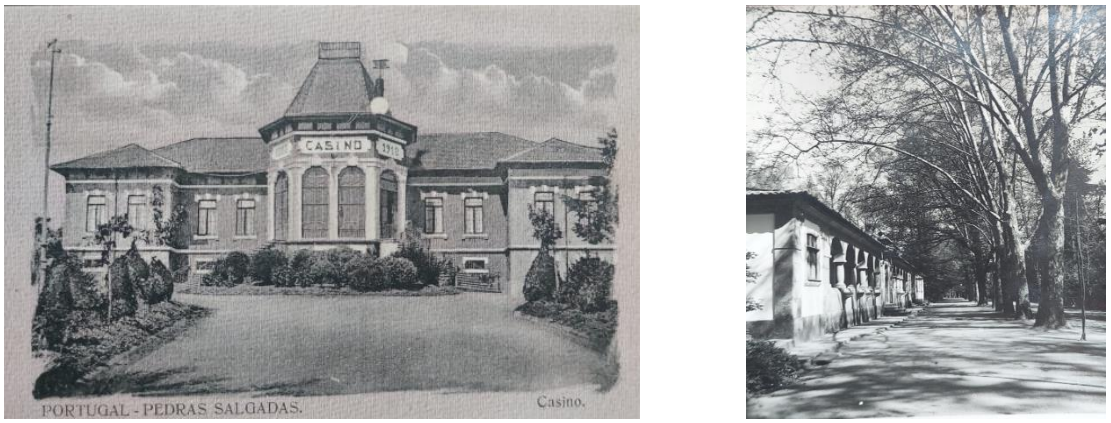
Figura 1 – Mapa da Vila de Pedras Salgadas

3 ALGUNS EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS EMBLEMÁTICOS NO SEU ESTADO ORIGINAL

Nesta vila existem diversos edifícios associado à prática termal tais como hotéis, nascentes, balneários, casino, estação de comboios, observatório metrológico, para além dos edifícios de habitação.

Exemplos emblemáticos destes edifícios são o Casino (Figura 2.a), a Casa de Chá (Figura 2.b), a Nascente Preciosa (Figura 3.a), a Nascente D. Fernando (Figura 3.b), o Hotel Universal (Figura 4.a), o Grande Hotel (Figura 4.b), entre outros.

Estes edifícios foram construídos em finas do Século XIX e início do Século XX.



a) O Casino b) A Casa de Chá

Figura 2 – O Casino e a Casa de Chá

a) A Nascente Preciosa

b) A Nascente D. Fernando

Figura 3 – A Nascente Preciosa e a Nascente D. Fernando

a) O Hotel Universal

b) O Grande Hotel

Figura 4 – O Hotel Universal e o Grande Hotel

4 ALGUNS DE DETALHES CONSTRUTIVOS

Muitos são os detalhes construtivos característicos destes edifícios. A aplicação de elementos construtivos metálicos do tipo colunas, guardas, janelas e portas, Figura 5. O recurso a elementos construtivos de madeira tais como beiradas (Figuras 5.a e 6.a), paredes exteriores e pavimentos (Figura 6.a), escadas interiores (Figura 6.b), janelas e portas, entre outros.

a) Exemplo 1

b) Exemplo 2

Figura 5 – Elementos construtivos metálicos

a) Exemplo 1

b) Exemplo 2

Figura 6 – Elementos construtivos de madeira

5 ANÁLISE ESTATÍSTICA SIMPLIFICADA DE ASPETOS CONSTRUTIVOS

Neste trabalho de investigação foram estudados 19 edifícios antigos no centro urbano da vila de Pedras Salgadas.

Para o efeito, foi aplicada uma ficha de levantamento de edifícios antigos que contempla os seguintes aspetos técnicos: ano de construção; localização; nº de pisos; acesso ao interior; tipo de cobertura; tipo de revestimento de fachada; tipo de caixilharia de vão de janela; tipo de caixilharia de vão de porta; solução estrutural vertical; solução estrutural horizontal; revestimentos em zonas húmidas; trabalhos em ferro fundido e trabalhos em madeira. Na Figura 7 apresenta-se esta ficha de levantamento preenchida para o edifício da antiga estação de comboios da vila de Pedras Salgadas.

Antiga estação de comboio	
Ano de construção:	1907
Localização:	Rua Henrique Maia, Pedras Salgadas
Nº de pisos:	2
Acesso ao interior:	Sim
Tipo de cobertura:	2 águas
Revestimento de cobertura:	Telha lusa
Tipo de revestimento da fachada:	Reboco e pedra á vista
Tipo de caixilharia de vão de janela:	Madeira
Tipos de caixilharia de vão de porta:	Madeira
Solução estrutural vertical:	Parede de alvenaria de pedra e paredes de tabique
Solução estrutural horizontal:	
Pavimentos:	Madeira
Cobertura	Madeira
Escada interior:	Madeira
Revestimentos em zonas Húmidas(Cozinha, Instalação sanitária,etc.)	
Tipo de revestimento de paredes interiores:	Sem infromação
Tipo de revestimento de pavimentos interiores:	Sem infromação
Trabalhos de ferro fundido	
Grade de vão de janela:	Não
Grade de vão de varanda:	Não
Portão:	Não
Trabalhos em madeira	
Porta interior:	Sim
Lambrim nas paredes:	Não
Forro nos tetos:	Sim
Corrimão de escadas:	Sim
Pavimento:	Sim

Figura 7 – Exemplo de ficha de levantamento adotada e preenchida

Com base no trabalho de campo de levantamento do edificado antigo foi possível obter um conjunto de informação que poderá auxiliar a gestão deste património.

Por exemplo, em relação ao número de pisos dos edifícios estudados, verificou-se que a maioria (47%) têm dois pisos, Figura 8.

Por sua vez, em relação aos elementos estruturais, observou-se que as paredes de alvenaria de pedra são a solução mais tradicional, Figura 9. Este resultado é esperado atendendo a que esta região também é rica em pedra de granito e de onde é extraído o famoso granito de Pedras Salgadas.

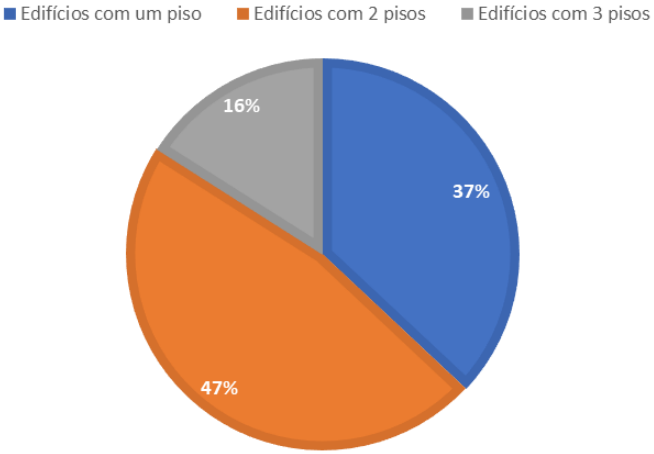


Figura 8 – Número de pisos

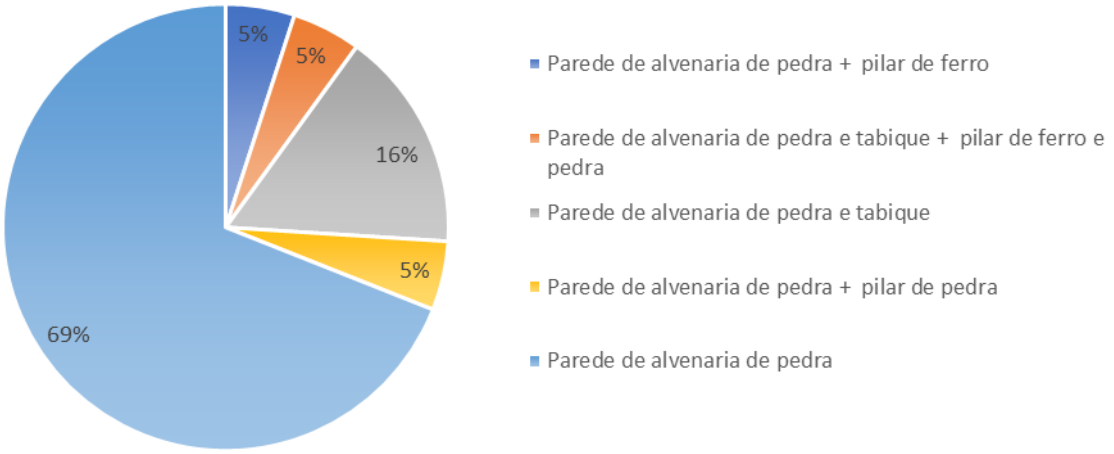


Figura 9 – Elementos estruturais verticais

6 ALGUMAS CONCLUSÕES

Face ao exposto, é possível afirmar que existe um notável património edificado de Arte Nova nesta vila. Muitos destes edifícios são de grande valor cultural e porque marcam uma época grandiosa da vila de Pedras Salgadas. Embora se trate de um território interior e de baixa densidade populacional, existem diversos hotéis e de apoio à atividade termal. Muitos destes edifícios já foram reabilitados.

Conclui-se ainda que a maioria dos edifícios antigos estudados têm 2 pisos, cobertura de 4 águas, uma solução estrutural vertical de alvenaria de pedra, uma solução estrutural horizontal de madeira, revestimento de fachada em reboco e caixilharia de vão de porta e de janela em madeira.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT através do projeto UIDB/04082/2020 (C-MADE).

REFERÊNCIAS

Alice Tavares, Aníbal Costa, Humberto Varum. Análise de estratégias para implementação da reabilitação urbana e salvaguarda do património vernacular. In: Atas do 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço lusófono (2ºCIHEL), LNEC, Lisboa, Portugal, 13 a 15 de Março de 2013. 2013.

Javier Ortega, Graça Vasconcelos, Hugo Rodrigues, Mariana Correia, Paulo B. Lourenço. Traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture and local seismic cultures: A literature review. Journal of Cultural Heritage. Volume 27. 2017. Pages 181-196. ISSN 1296-2074. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.015.

Jorge Pinto, Gülten Gülay, José Vieira, Vatan Meltem, Humberto Varum, İhsan Engin Bal, Aníbal Costa. Save the Tabique Construction. Structural Rehabilitation of Old Buildings. Building Pathology and Rehabilitation. Volume 2. 2014. Editors: Aníbal Costa, João Miranda Guedes, Humberto Varum. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39685-4 (Print) 978-3-642-39686-1 (Online). 157-185.

Pinto, J.; Paiva, A.; Almeida, D.; Pereira, S.; Antunes, A.; Bento, R. (2022). Highlighting the Heritage of Meseta Ibérica. En Proceedings HERITAGE 2022 - International Conference on Vernacular Heritage: Culture, People and Sustainability. Editorial Universitat Politècnica de València. 173-180. https://doi.org/10.4995/HERITAGE2022.2022.14559

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E DESCARTE

José Douglas dos Santos Siqueira Silva[a]; Tais Moreira De Lisboa[b];

[a] (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Rua Prof. Carlos Guedes Alcoforado, s/n, 59291-727. São Gonçalo do Amarante – Centro, Natal, Brasil), jose.douglas@ifrn.edu.br

[b] (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Rua Prof. Carlos Guedes Alcoforado, s/n, 59291-727. São Gonçalo do Amarante – Centro, Natal, Brasil), tais.m@escolar.ifrn.edu.br

RESUMO

O excesso de resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil vem aumentando no decorrer dos anos, associado ao crescimento populacional e à expansão das cidades. Medidas de gerenciamento são necessárias para reduzir os impactos negativos dessa geração. Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo analisar o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) de 5 obras classificadas como grandes geradoras na grande Natal/RN (Brasil). A pesquisa se baseou em 15 indicadores de sustentabilidade (Paz *et al*. 2014) considerando os aspectos de Segregação, Transporte e Armazenamento e Destinação Final dos RCDs, de forma quali-quantitativa e sob a ótica das Legislações e Normas Brasileiras vigentes. A avaliação final indicou um grau de tendência à sustentabilidade (GR) para cada aspecto e para cada Obra. Na análise em conjunto das 5 Obras (média de todos os resultados), foi atingido um GR médio em todos os aspectos. Na análise global e individual, a Obra 1 apresentou um GR baixo, as Obras 2, 3 e 4 apresentaram um GR médio e a Obra 5 um GR alto. Desta forma, observou-se que o gerenciamento de RCD ainda é um grande desafio, que não vem sendo efetivamente praticado nas obras e que pode estar ocasionando diversos impactos econômicos, ambientais e sociais negativos.

PALAVRAS-CHAVES: construção civil, gerenciamento, resíduos sólidos, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento das cidades desencadeiam o aumento do consumo e, consequentemente, a geração de resíduos sólidos. Essa premissa promove alguns impactos ambientais negativos, que vão desde o uso desenfreado dos recursos naturais à destinação inadequada dos resíduos. Quando dispostos incorretamente, os resíduos se assentam em córregos, terrenos baldios e áreas de botas-foras gerando problemas ambientais (poluição do solo, visual e das águas), econômicos (gastos excessivos no manejo dos resíduos) e sociais (prejudicando a saúde da população com a aproximação de agentes patógenos). O setor da Construção Civil é um dos principais responsáveis por esses impactos, pois contribui consideravelmente na geração de resíduos que vem crescendo a cada ano no mundo todo (Elshaboury *et al*. 2022; Vasconcelos 2019; Vidyasekar e Selvan 2019).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), 58,5% dos resíduos sólidos coletados no Brasil são oriundos dos canteiros de obras. Os dados mais recentes apontam que o Brasil produziu cerca de 48 milhões de toneladas de residuos de construção e demolição (RCD) em 2021 (ABRELPE 2022).

Desta forma, é fundamental que haja uma gestão eficiente desses RCDs pelas incorporadoras, pelas construtoras e pelo poder público brasileiro, para que não provoque danos ambientais, sociais e econômicos, considerando que representam a maior parcela de geração de resíduos sólidos do país.

No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), possui uma abordagem e importantes instrumentos a fim de viabilizar os avanços que o país necessita para enfrentar diversos problemas derivados do manejo inadequado dos resíduos sólidos. As empresas de Construção Civil (caracterizadas como grandes geradoras) estão definidas nesta lei com a responsabilidade de elaboração, execução e monitoramento do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) (Brasil 2010).

A Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) é outro instrumento federativo brasileiro que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos de construção. Ela aponta a necessidade do grande gerador em desenvolver o Plano de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil (PGRCC), derivação do PGRS específica para o setor, a fim de apresentar ações planejadas com o objetivo de minimizar os impactos ambientais. Aponta também que o município é um agente responsável por classificar os pequenos e grandes geradores, além de fiscalizá-los (Brasil 2002).

Portanto, observa-se que o Brasil fornece dispositivos aos municípios e às empresas na aplicação e fiscalização de práticas efetivas de gestão de RCD, responsabilizando diretamente as obras que produzem um volume elevado de resíduos através da ferramente PGRCC (Brasil 2002; Brasil 2010).

A gestão de RCD é um tema de grande interesse para a sociedade e vem sendo pesquisada de forma ampla em países em desenvolvimento. O gerenciamento de RCD nos canteiros de obras, quando executado com eficiência, promove benefícios econômicos, ambientais e sociais para a população, além de ser fundamental para atender os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) 9, 11 e 12 da agenda 2030 (Elshaboury *et al*. 2022; Hasmori *et al*. 2020; Kabirifar *et al*. 2020; ONU 2015; Vidyasekar e Selvan 2019; Silva e Lopes 2021). Uma forma de como monitorar a sua eficiência nas obras classificadas como grandes geradoras é com o uso de indicadores de sustentabilidade (Paz 2014; Silva *et al*. 2021).

Logo, esta pesquisa se propõe a realizar uma análise do gerenciamento de resíduos de construção e demolição em 5 obras classificadas como grandes geradoras, no contexto municipal brasileiro, para

identificar a atual situação de sua implantação com base em indicadores de sustentabilidade e avaliando os aspectos: segregação, transporte e armazenamento, além de destinação final dos RCDs.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar o gerenciamento de resíduos da construção civil em 5 obras classificadas como grandes geradoras no Brasil, especificamente na região da grande Natal/RN, com o uso de 15 indicadores de sustentabilidade.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com método científico indutivo, possui caráter exploratório, uma abordagem quali–quantitativa, com procedimento técnico através de estudos de casos na grande Natal/RN, Brasil (Prodanov e Freitas 2013).

A escolha das obras tem relação com os dados e documentos acessíveis, onde as construtoras disponibilizaram os Plano de Gerenciamento Resíduos da Construção Civil (PGRCC) e possibilitaram a visita aos canteiros de obras (Yin 2001).

O trabalho foi realizado durante o período junho a julho de 2023, com 1 visita em cada local analisado. As obras verificadas estão caracterizadas como grandes geradoras conforme legislação local vigente. Com isso, desenvolvem o seu próprio gerenciamento de RCD. O Quadro 1 apresenta as características das obras do objeto de estudo dessa pesquisa indicando as áreas construídas, períodos, identificação e os tipos de construção.

Quadro 1 – Caracterização das obras

OBRA	ENDEREÇO	ÁREA CONSTRUÍDAS	PERÍODO	IDENTIFICAÇÃO DA OBRA	TIPO DA CONSTRUÇÃO
1	Parnamirim/RN	55.773,43m²	2023	Obras comercial	Alvenaria Convencional
2	Parnamirim/RN	15.704,89 m²	2023	Obras residenciais	Alvenaria Convencional
3	Natal/RN	Acima de 1.000,00 m² (Não informado valor exato)	2023	Obras residenciais	Alvenaria Convencional
4	São Gonçalo do Amarante/RN	11.220 m²	2023	Obra Pública	Alvenaria Convencional
5	São Gonçalo do Amarante/RN	Acima de 1.000,00 m² (Não informado valor exato)	2023	Obras residenciais	Alvenaria Estrutural

Os indicadores foram avaliados com base nos aspectos de Segregação, Transporte e Armazenamento e Destinação Final dos RCDs no gerenciamento das obras. Nos Quadros 2, 3 e 4 apresentam-se os 15 indicadores de sustentabilidade específicos para cada aspecto, classificando cada item em uma tendência de sustentabilidade através de uma escala quantitativa (1; 0,5 e 0) e com base nos apontamentos qualitativos apresentando as características de cada indicador avaliado: geração de resíuos, capacitação, acondicionamento, sinalização, transporte, armazenamento, limpeza, uso de agregados reciclados, parcerias com cooperativas, reaproveitamento e destinação de resíduos não recicláveis.

Quadro 2 - Indicadores de sustentabilidade para o aspecto Segregação dos RCD (Paz 2014)

Indicadores de sustentabilidade		Tendência de sustentabilidade		
		1	0,5	0
1	Geração de resíduos	Uso de tecnologias de racionalização de obras e de produção mais limpa	Criação de programas de conscientização	Elevada geração e desperdício de resíduos
2	Capacitação dos trabalhadores	Treinamento periódico com monitoramento	Treinamento de acordo com a necessidade	Inexistente
3	Acondicionamento dos resíduos Classe A	Acúmulo em pilhas em locais demarcados no pavimento	Acúmulo em pilhas em local determinado, sem sinalização	Acúmulo em pilhas espalhadas pelo pavimento
4	Acondicionamento dos resíduos Classe B	Utilização de bombonas para acondicionamento de madeira, metal, plástico e papel	Segregado em pilhas, no pavimento	Acúmulo dos resíduos sem segregação no pavimento
5	Sinalização	Sinalização adequada dos locais de acondicionamento	Sinalização dos locais de acondicionamento, porém pouco visíveis	Sem sinalização dos locais de acondicionamento

Quadro 3 - Indicadores de sustentabilidade para o aspecto Transporte e Armazenamento dos RCD (Paz 2014; Silva 2021)

Indicadores de sustentabilidade		Tendência de sustentabilidade		
		1	0,5	0
6	Transporte interno	Transporte dos resíduos pelo uso de dutos verticais e recicláveis segregados	Transporte dos resíduos segregados em sacos	Transporte dos resíduos misturados em carrinho- de-mão
7	Armazenamento final em caçambas	Segregação entre os resíduos de gesso, madeira e entulho	Caçamba única sem segregação entre gesso, madeira e entulho	Caçamba misturada com outros tipos de resíduos
8	Armazenamento final em bags/baias	Resíduos bem segregados; local sinalizado	Resíduos bem segregados; baias/bags muito cheios	Resíduos misturados
9	Limpeza	Sem presença de resíduo no entorno da área de armazenamento de resíduos	Presença de resíduo na área de armazenamento, em local sinalizado	Presença de resíduos espalhados no entorno da área de armazenamento de resíduos
10	Transporte externo	Empresa cadastrada na SEMUR com monitoramento da licença de operação	Empresa cadastrada na SEMUR sem monitoramento da Licença de Operação	Contratação informal de empresas sem cadastro na SEMUR / Transporte próprio

Quadro 4 - Indicadores de sustentabilidade para o aspecto Destinação Final dos RCD (Paz 2014)

Indicadores de sustentabilidade		Tendência de sustentabilidade		
		1	0,5	0
11	Cooperativas de catadores	Possui parceria com cooperativas com contrato	Doação esporádica	Não possui
12	Resíduos não recicláveis	Logística reversa	Disposição em aterro sanitário	Disposição inadequada
13	Resíduos recicláveis como agregados	Destinação permanente em usina de reciclagem de RCC	Destinação em usina de reciclagem (Classe A) em conjunto com aterros sanitários (Classe C)	Destinação em aterros ou locais inadequados
14	Utilização de agregados reciclados	Utiliza agregados reciclados em argamassa ou concreto	Utiliza agregados reciclados para fins menos nobres	Utiliza agregados naturais para fins menos nobres
15	Reaproveitamento de resíduos	Reutilização de resíduos na própria obra	Venda de resíduo para ser reutilizado em outro local	Não reutiliza nenhum tipo de resíduo

A média dos indicadores relativos as três etapas do gerenciamento de resíduos conduzem a um grau de tendência à sustentabilidade (GR) como sendo: “Muito Baixo” para resultado 0 a 1,0 pontos, “Baixo” para resultado de 1,0 a 2,0 pontos, “Médio” para resultado de 2,0 a 3,0 pontos, “Alto” para resultado de 3,0 a 4,0 pontos e “Muito Alto” para resultado de 4,0 a 5,0 pontos. Foi realizada uma análise média por aspecto dos resultados das 5 obras e uma análise da sustentabilidade global em cada obra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a legislação Municipal da cidade de Natal/RN a Lei Complementar nº 055, de 27 de janeiro de 2004, o Código de Obras em vigor de Natal/RN, são considerados grandes geradores os empreendimentos com área construída superior a 1.000,00 m² (NATAL, 2004). Dessa forma, as obras que atingirem ou ultrapassarem essa área devem assumir a responsabilidade e a corresponsabilidade pelo processo de geração, manejo, transporte e destinação final de seus resíduos, e todas essas etapas devem ser devidamente planejadas por meio de um PGRCC. As demais cidades, apresentam parâmetro similar ou inferior a este, por isso, o critério utilizado por Natal/RN foi a referência para análise deste trabalho.

De acordo com os procedimentos mencionados, a Obra 1 estava na sua fase de estruturas e vedações. Os serviços estavam acontecendo de forma lenta devido a uma escolha da empresa que aguardava mais investimentos financeiros para dar continuidade as etapas construtivas. Todavia, o desenvolvimento estava acontecendo de forma prática, com uma listagem de procedimentos a serem seguidos, informações detalhadas e previstas em planejamento prévio para especificidade da Obra, com o intuito de facilitar a sua aplicação no canteiro. A partir disso, podemos afirmar que a Obra está

sendo conduzida de forma satisfatória em termos de padrões de qualidade e segurança. A seguir, a Figura 1 ilustra a implementação no canteiro da Obra 1.

Figura 1 - Canteiro da obra

A Obra 2 se encontrava na fase de acabamento e apresentou resultados médios na implementação no Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), por ser um empreendimento de alto padrão e ter um investimento considerável em treinamento de pessoal e gereciamento.

A Obra 3 também se encontrava na fase inicial de estruturas e concretagem com 30% executado. Eles apresentaram todos os comprovantes de controle de transporte dos resíduos, além da licença ambiental regular para atuar. Na Figura 2, podemos ver andamento da obra, afirmando o início da estrutura.

Figura 2 - Visão geral do subsolo

A Obra 4 por ser um empreendimento de participação governamental, os entraves burocráticos colocaram ela em atraso e a obra encontra-se em fase de construção e as atividades no canteiro são de fundação, alicerce, baldrame, paredes, colunas, laje, alvenaria e carpintaria. A obra possui o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), porém não é atualizado e nem aplicado na obra. A Figura de 3 é referente a Obra 4 aonde é feito o descarte que está sem sinalização.

Figura 3 - Local de descarte sem sinalização

Na Obra 5, era desenvolvida como padrão de classe média, com o canteiro já implementado. Possuía o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) e a Gestão de Resíduos da Construção Civil (GRCC) em pleno funcionamento (execução de fundações, vedações, estrutura e acabamentos), além de contribuir para a segurança e durabilidade das obras, garantindo que segurança para todos, as identificações do local podiam ser vistas por todos. Na Figura 4 e 5, podemos ver a obra 5 onde localização das baias de resíduos para metal, papelão, plástico e madeira.

Figura 4 – Baias

Figura 5 – Localização das baías de resíduos

No que diz respeito a avaliação das etapas do (GRCC), o Quadro 5 apresenta os resultados obtidos com o uso dos indicadores de sustentabilidade.

Quadro 5 - Avaliação das etapas do Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (GRCC)

Avaliação	Indicadores de Sustentabilidade	Tendência de Sustentabilidade					Índice médio	GR por avaliação
		Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5		
Segregação	1	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	**MÉDIO**
	2	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,3	
	3	0,5	0,5	1,0	0,0	1,0	0,6	
	4	0,5	1,0	0,5	0,0	1,0	0,6	
	5	0,0	0,0	0,5	0,0	1,0	0,3	
	Total	**1,0**	**2,5**	**3,0**	**0,5**	**4,0**	**2,2**	
Transporte e armazenamento	6	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,2	**MÉDIO**
	7	1,0	1,0	0,5	0,0	1,0	0,7	
	8	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	0,4	
	9	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,8	
	10	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,6	
	Total	**2,0**	**4,0**	**2,0**	**2,0**	**3,5**	**2,7**	
Destinação final	11	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,2	**MÉDIO**
	12	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,9	
	13	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,6	
	14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	15	0,0	0,5	0,0	1,0	1,0	0,5	
	Total	**1,0**	**2,0**	**1,0**	**4,0**	**3,0**	**2,2**	
Média do total das 3 avaliações		**1,3**	**2,8**	**2,3**	**2,1**	**3,5**	**2,4**	-
GR por Obra		**Baixo**	**Médio**	**Médio**	**Médio**	**Alto**	**Médio**	-

Analisando as 5 obras, o resultado obtido foi de 2,3 e um GR “MEDIO”. Na obra 1, o GR foi “BAIXO”, pois ela estava sendo conduzida lentamente devido ao investimento financeiro que era aportado de forma reduzida mensalmente. Nas Obras 2, 3 e 4, foi “MÉDIO”, pois já implementam algumas estratégias de gerenciamento do PGRCC que possuem. A Obra 5 foi a que teve melhor resultado que foi “ALTO”, pois a Gestão de Resíduos da Construção Civil (GRCC) está em pleno funcionamento e executando vários itens do PGRCC.

O resultado desta pesquisa confirma a análise desenvolvida por Paz (2014) e por Silva et al. (2021), onde nenhum canteiro atingiu resultados expressivos (acima de 4,0 pontos na tendência de sustentabilidade) nos três aspectos de avaliação.

Ainda, observando cada aspecto da avaliação, os indicadores 3 e 4 do aspecto de Segregação foram relevantes no índice médio de tendência de sustentabilidade, porém os indicadores 2 e 5 foram os mais inferiores; no aspecto de Transporte e Armazenamento, apresentaram-se índices relevantes nos indicadores 7 e 9, apesar dos indicadores 6 e 8 terem sido bem abaixo; e no aspecto de Destinação Final, o indicador 12 foi o mais efetivo nas 5 obras, porém o indicador 11 foi bem abaixo e o indicador 14 não foi atingido por nenhuma obra.

Após esta análise, percebe-se que as obras têm pontos positivos e negativos no que se trata do gerenciamento de resíduos da construção civil, não conseguindo manter uma constância da tendência de sustentabilidade em todas as etapas. Nas avaliações de Segregação, Transporte e Armazenamento e Destinação Final foram detectados diferentes indicadores com o índice 0 em todas as Obras, isso indica que há problemas significativos em várias etapas do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) nessas obras.

Observa-se então que o Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (GRCC) nos estudos de casos não é praticado de maneira efetiva, seguindo os padrões legislativos e normativos vigentes. Isso pode estar provocando diversos impactos negativos, quanto a questão econômica, ambiental e social, envolvendo as construtoras, o poder público e a comunidade local. Foram observadas algumas dificuldades por vários fatores nos indicadores, como a Segregação. Com isso, é importante ter uma programação frequente e efetiva do controle, planejamento, aprimoramento dos processos e renovação e atualização dos métodos já existentes.

O GRCC quando executado de maneira efetiva pode apresentar melhora na eficiência e sustentabilidade dos RCD, reduzindo a poluição do meio ambiente, o consumo excessivo de matéria-prima, riscos a saúde pública e segurança, além de aprimorar o uso racional dos recursos materiais e financeiros da obra (Lindhard *et al*. 2022).

5 CONCLUSÕES

A análise dos dados coletados permitiu verificar o efeito do uso Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) nas cinco Obras distintas. Os resultados apresentaram que todas as Obras têm dificuldades quanto a implantação de práticas efetivas de GRCC.

Diversas dificuldades foram encontradas devido a diferentes fatores, especialmente no que diz respeito aos indicadores do aspecto de Segregação e o de Destinação final de resíduos. Para enfrentar, é fundamental estabelecer um controle frequente desde a geração, o manejo e até destinação final que contemple o planejamento e o aprimoramento dos processos, além da promoção de renovação e atualização dos métodos existentes.

No geral, as Obras da grande Natal/RN apresentaram um GR médio, sendo que a Obra 1 apresentou o menor GR (baixo) e a Obra 5 o maior GR (alto). Desta forma, foi observado de forma quali-quantita que os canteiros de obras da região estudada ainda não implementam efetivamente o GRCC nas obras.

A implementação de um GRCC efetivo contribui não só para a redução dos impactos ambientais, mas também pode trazer benefícios econômicos e sociais significativos para todas as partes envolvidas como capacitação e treinamentos, monitoramento e controle e incentivar a reciclagem.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Msc. José Douglas dos Santos Siqueira Silva pela confiança nos ensinamentos e por sua forma dinâmica de trabalhar que me motivou a concretizar a elaboração e organização desta pesquisa.

Aos demais amigos: pela atenção e disponibilidade. E a todos aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2022) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. ABRELPE. https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/

Brasil. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama nº. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos

resíduos da construção civil. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=18556 Acesso em: 17 de abr. 2024

Elshaboury, N., Al-Sakkaf, A., Mohammed Abdelkader, E., Alfalah, G. (2022) Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis. Int. J. Environ. Res. Public Health , 19(8):4496. https://doi.org/10.3390/ijerph19084496

Hasmori, M. F., Zin, A. F. Md., Nagapan, S., Deraman, R., Abas, N., Klufallah, R., Y., M. (2020) The on-site waste minimization practices for construction waste. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, [*S.l.*], 713:1-11. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/713/1/012038

Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., tam, VWY. (2020) Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: a review. Journal Of Cleaner Production, 263:121265. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265.

Lindhard, SM, Wyke, S, Mahami H, Vaezzadeh, SS, Svidt, K. (2023) Waste Generation Predictions and On-Site Waste Management: A Danish Perspective. *Sustainability*, 15(5):4207. https://doi.org/10.3390/su15054207

Natal. Lei Complementar nº 055, de 27 de janeiro de 2004. Institui o código de obras e edificações do município de Natal e dá outras providências. Natal: Câmara Municipal [2004]. https://natal.rn.gov.br/bvn/publicacoes/lei_complementar_n_055.pdf

Organização das Nações Unidas. (2015) Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/Agenda2030-completo-site.pdf

Paz, D. H. F. da. (2014) Desenvolvimento de um sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil em canteiros de obras de edificações urbanas. 161. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife.

Silva, J. D. dos S. S.; Lopes, R. L.; Freire, J. T. da C.; Ramos, J. B. E.; Navoni, J. A. (2021) III-028 Análise do Gerenciamento de Resíduos da Construção com o uso de Indicadores de Sustentabilidade: Um estudo de caso. XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1:1-9. https://www.researchgate.net/publication/358807993

Silva, J. D. dos S. S.; Lopes, R. L. (2021) Manual para elaboração e implantação do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil [livro eletrônico]. Instituto Federal Rio Grande do Norte Campus Natal-Central, 1:1-49. http://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/2052

Vidyasekar, B.; Selvan, K. G. Implementation of 3R Principle in Construction and Demolition Waste Management. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(12):667-672. http://dx.doi.org/10.35940/ijitee.L2731.1081219

Vasconcelos, R. R. B. A. de. Rastreabilidade de Resíduos da Construção Civil de Duas Modalidades de Obras no Município de Caruaru-PE, 2019

Yin, R. K**.** (2001) Estudo de caso: Planejamento e métodos. Artmed, 2:1-200.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DA DURABILIDADE DA LIGAÇÃO DE ESTRUTURAS MISTAS AÇO-BETÃO COLADAS

Alexandre Rocha[a]; José Luís Barroso de Aguiar[b]; Isabel B. Valente[c]

[a] (Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal), alexandrerochasalles@gmail.com

[b] (CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal), aguiar@civil.uminho.pt

c (ISISE - Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal), isabelv@civil.uminho.pt

RESUMO

A procura pelo desenvolvimento sustentável na construção civil está diretamente relacionada com a racionalização da utilização de recursos minerais em conjunto com a redução do desperdício e o aproveitamento otimizado das estruturas. Com este intuito, procura-se desenvolver soluções construtivas que facilitem a reabilitação de construções existentes e sistemas construtivos com alto desempenho em termos de vida útil.

Este estudo está voltado para o tema da sustentabilidade na medida em que se procura compreender melhor os fenómenos associados à durabilidade dos materiais e das componentes do sistema construtivo misto em aço e betão e, consequentemente, obter soluções mais duradouras e otimizadas.

Neste trabalho, pretende-se abordar os sistemas mistos em aço e betão, onde são utilizados perfis metálicos enformados a frio e galvanizados, em combinação com betão, utilizando adesivos estruturais na ligação entre estes componentes. Neste contexto, pretende-se realçar os processos de degradação e a sua influência no comportamento global dos elementos mistos analisados.

Foram realizados ensaios em elementos estruturais que combinam aço enformado a frio e betão, colados entre si, com a finalidade de avaliar a durabilidade dessas estruturas quando expostas a condições ambientais extremas. Os resultados obtidos mostram que, embora em alguns casos a degradação afete parcialmente a capacidade resistente dos elementos, em outros casos, este tipo de sistema construtivo pode ser utilizado mantendo a capacidade resistente esperada dos elementos constituintes.

Palavras-chave: Estruturas mistas em aço e betão, Durabilidade, Aderência, Adesivos estruturais, Aço enformado a frio.

1 INTRODUÇÃO

Utilizar soluções construtivas mais sustentáveis, seja pelo elevado desempenho, poupança na utilização de materiais, maior durabilidade, ou ainda reaproveitamento de materiais e estruturas pré-existentes, é um desígnio para a sociedade e indústria atuais (Bragança & Mateus, 2012; Torgal, 2010). A combinação de diferentes materiais que acontece nas estruturas mistas aço-betão apresenta vantagens: maior resistência vs. peso, redução da altura total do edifício, elementos estruturais mais esbeltos, maior resistência à flexão, maior rigidez, maior resistência ao fogo, construção mais rápida e flexível, maior durabilidade, etc. (Kumar *et al.*, 2017).

A utilização de adesivos na ligação aço-betão tem potencial em novas construções e em reforço estrutural. Considerando as vantagens associadas à utilização de perfis de aço enformados a frio na construção, julga-se que o conhecimento limitado sobre aderência entre chapa lisa galvanizada e camada de betão, por meio de adesivos estruturais, e sobre a durabilidade desta ligação em situação de exposição a condições ambientais e de carregamento desfavoráveis condiciona a sua utilização. Este trabalho propõe-se estudar o comportamento e a durabilidade deste sistema de ligação e propor novas soluções mais eficientes.

O uso de adesivos estruturais tem vindo a crescer em várias indústrias uma vez que permitem uma redução no peso e nos custos de produção, possibilitam flexibilidade no dimensionamento, maior resistência à fadiga e comportamento melhorado sob efeito de vibração e corrosão. Tem também crescido a aplicação da colagem na reparação de estruturas, evitando a reconstrução *(Barnes & Mays, 2001; Budhe et al., 2017; Meaud et al., 2014; Souici et al., 2013; Sun et al., 2019; Thevenet et al., 2013)*.

As ligações por colagem estão geralmente sujeitas a quatro tipos de esforços: flexão, tração, corte e torção (Sun *et al.*, 2019). Os modos de rotura podem distinguir-se entre rotura: coesiva, do adesivo, da colagem (interface entre elemento e adesivo) e combinada. Rotura coesiva ou rotura do adesivo são preferíveis, porque a ligação pode mobilizar a sua máxima capacidade de carga.

O processo de colagem influencia a qualidade da ligação e a força transferida na ligação depende das propriedades dos elementos e adesivos. Características como área de colagem, espessura do adesivo, rugosidade e tratamento superficial dos elementos, propriedades químicas do elemento e adesivo, tempo de cura e condições ambientais são as mais influentes na eficiência da ligação (Brito *et al*., 2020; Budhe *et al*., 2017; Ferrer *et al.*, 2018; Ghumatkar & Sekhar, 2017; Sun *et al*., 2019).

A utilização de perfis enformados a frio nas edificações de baixo e médio porte tende a tornar o elemento estrutural mais leve (Babu & Selvan, 2021; Valente, 2007). São produzidos a partir de chapas de aço galvanizado com 1,5 mm a 5 mm de espessura e podem assumir várias formas. São geralmente fabricados com um mínimo de 25% de aço reciclado, o que é considerado altamente sustentável (Babu & Selvan, 2021; Diógenes et al., 2015; Hsu et al., 2012, 2014; Samiee et al., 2021; Tao et al., 2021; Valente, 2007)

1.1 ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO COLADAS

De acordo com Kumar *et al.*, (2017), os conectores mecânicos convencionalmente utilizados causam concentração de tensões e têm pouca resistência à fadiga. Além disso, a maior densidade de conectores mecânicos pode prejudicar o processo de betonagem.

De acordo com Berthet *et al*., (2011), investigações para encontrar outros métodos para unir aço e betão foram realizadas por vários laboratórios desde 1962 e, para avaliar o comportamento de estruturas mistas de aço-betão coladas, três tipos de sistemas foram analisados. No primeiro sistema,

a laje de betão foi moldada sobre a superfície da viga de aço, onde previamente foram colados agregados com resina epoxídica. O segundo sistema consiste em juntar uma laje de betão pré-fabricada com uma viga de aço, utilizando resina fresca. No terceiro sistema, o betão foi colocado diretamente sobre a resina fresca, que cobria a superfície de aço. Os resultados mostraram que o primeiro sistema exibe uma elevada deformação, quando comparado aos restantes, o segundo sistema é o que apresenta menor capacidade de carga e o terceiro sistema é o mais resistente, evidenciando porém um comportamento mais frágil (Berthet *et al.*, 2011).

Barnes *et al*., (2001) estudaram a transferência de esforço de corte através da colagem num elemento misto de aço-betão, tendo concluído que:

- A tensão de corte numa junta adesiva de aço-betão apresenta uma distribuição exponencial, com valor máximo junto da extremidade carregada do elemento;
- O aumento na espessura da cola ou adesivo leva a uma redução geral nos níveis de pico de tensão e um aumento na capacidade resistente global.

Barnes *et al*., (2001) realizaram ainda uma análise não linear com elementos finitos bidimensionais de provetes de aço-betão colados. Os resultados obtidos, que dizem respeito a níveis de tensão e espessura de colagem, mostram que na simulação por elementos finitos de um adesivo com espessura de 1 mm, a distribuição de tensão de corte assemelhava-se mais aos resultados experimentais do que aos resultados de uma análise teórica baseada no método de Volkersen (Volkersen, 1938). No entanto, com camadas adesivas mais grossas, de 3 e 5 mm, tanto o método de Volkersen como a análise com elementos finitos forneceram distribuições de tensão de corte semelhantes. Ambos os métodos de análise são apenas aplicáveis a níveis de carga mais baixos, em que a fendilhação do betão ainda não ocorreu (Barnes & Mays, 2001).

De acordo com Berthet *et al*. (2011), para as estruturas mistas de aço-betão coladas, a capacidade resistente da estrutura depende principalmente da aderência. É nítido que um desempenho adesivo mínimo da interface aço-betão é necessário para assegurar o comportamento misto da estrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para entender o comportamento mecânico de um elemento misto de aço-betão que utiliza diferentes tipos de conexões, Berthet *et al*. (2011) sugerem a realização do ensaio de tipo *push-out*.

Considerando o objetivo deste estudo, que pode ser definido como a avaliação da durabilidade da resistência de aderência, foram realizados ensaios com provetes expostos a diferentes ambientes agressivos, e comparados com espécimes mantidos em condições ambientais normais, não sendo considerados neste estudo os efeitos relacionados a fadiga.

Considerando o efeito de tamanho, um fenômeno bem conhecido na ciência dos materiais que consiste no fato de que objetos se tornam mais frágeis à medida que seu tamanho aumenta, isso porque a probabilidade de encontrar uma fissura de determinado comprimento em um objeto maior é maior, somado ao fato de difícil manejo de provetes com grandes dimensões para execução de ensaios de carga, os espécimes devem ter um tamanho adequado para serem representativos, mas não tão grandes para evitar os problemas e dificuldades mencionados. Os provetes foram dimensionados para serem compostos por duas lajes de betão com 300x300x100 mm^3, coladas com a utilização de uma resina epoxídica a um perfil metálico enformado a frio galvanizado, com secção transversal retangular de 100x50x2.0 mm^3 e 300 mm de comprimento.

A Figura 1 apresenta a composição do provete utilizado nos ensaios de tipo *push-out*.

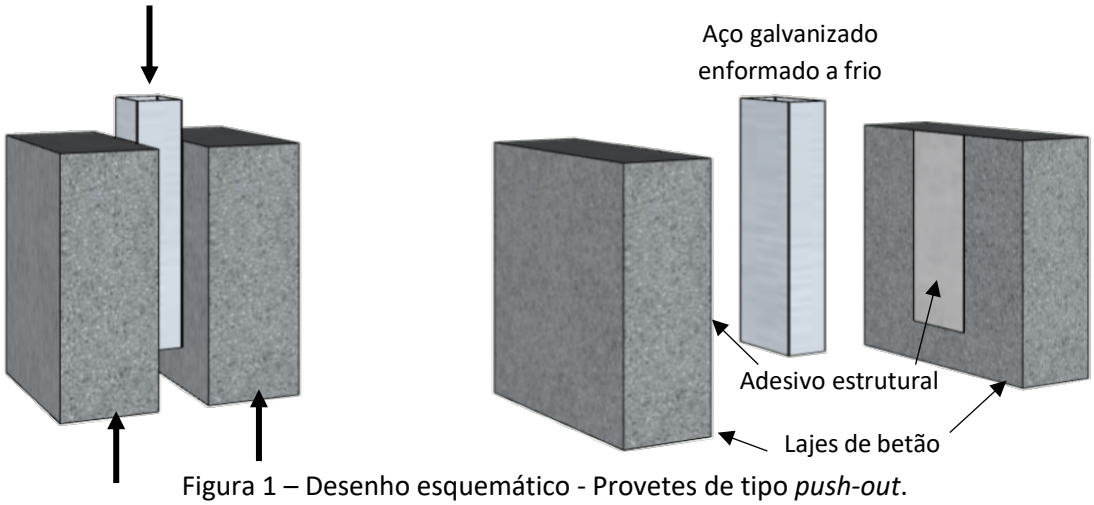


Figura 1 – Desenho esquemático - Provetes de tipo *push-out*.

Foram criados dois ambientes agressivos, baseados em ataques químicos de cloreto e sulfato. Para o primeiro, foi utilizada água salgada do mar, expondo os provetes a condições cíclicas de submersão e secagem com intervalos de 12h, de forma a acelerar seu processo de degradação. Já para o segundo ambiente, foi utilizada uma solução concentrada de sulfato de sódio, repetindo o processo de submersão e secagem, mas seguindo um ciclo temporal de 18h, de acordo com as indicações da norma ASTM C 88. Vale ressaltar que os ambientes criados têm por objetivo expor os provetes a condições extremas, sendo desta maneira expectável levar os provetes expostos aos seus limites. Para analisar o nível de degradação foram definidas duas idades de exposição, sendo T180 com 180 dias de exposição e T360 com 360 dias de exposição.

2.2 COMPOSIÇÃO DO BETÃO

O betão utilizado na composição das lajes do provete foi fornecido por uma central de betonagem, segundo especificações técnicas e propriedades definidas de acordo com a norma NP EN 206-1 de 2007, como descrito no Quadro 1. Para assegurar os parâmetros de resistência do betão, seguindo as indicações da norma, foram betonados cilindros para realizar ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, em diferentes tempos de cura, inclusive quando da realização dos ensaios de tipo *push-out* após o período de exposição. Estes resultados se apresentam no Quadro 2.

Quadro 1 – Especificação técnica do betão utilizado

Classe de Resistência	Classe de Consistência	Classe de Exposição	Tamanho máximo do agregado	Razão água / cimento	Teor de cimento [kg/m^3]
C30/37	S3	XC4, XS1, XA1	D14	0,5	300

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade do betão

Cura [dias]	$F_{máx,m}$ [kN]	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
7	444.60	26.08	27.69
28	573.43	34.12	29.20
225	649.63	38.39	30.25
405	661.27	39.08	30.79

2.3 PERFIS METÁLICOS

Após o pré-dimensionamento dos provetes de tipo *push-out*, tendo em conta a área de colagem, a carga a ser suportada pelo perfil durante o ensaio e a gama de perfis comercializados com diferentes formas e espessuras, foi selecionado um perfil enformado a frio galvanizado com secção retangular 100x50x2.0 mm^3, feito a partir de um aço E220 + CR2s2. O Quadro 3 resume as informações contidas na ficha técnica do material apresentada pelo fornecedor.

Quadro 3 – Certificado de qualidade do aço tubular – Tubos Aranda

Profile [mm]	Steel	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A %
100x50x2,0	E220 + CR2S2	301,27	384,14	24,24

Seguindo as recomendações da *American Galvanizers Association*, os perfis foram limpos e descontaminados a partir da utilização de uma solução alcalina suave, com mistura de dez partes de água e uma parte de uma solução alcalina. Após secagem por 48 horas, utilizando luvas de nitrilo para manusear os perfis, alguns espaçadores de plástico foram colados ao perfil para mantê-lo na posição correta durante o processo de adesão ao betão, e para garantir que a espessura da camada de adesivo estrutural de todos os provetes fosse mantida com 2 mm em toda a área de ligação (Figura 2).

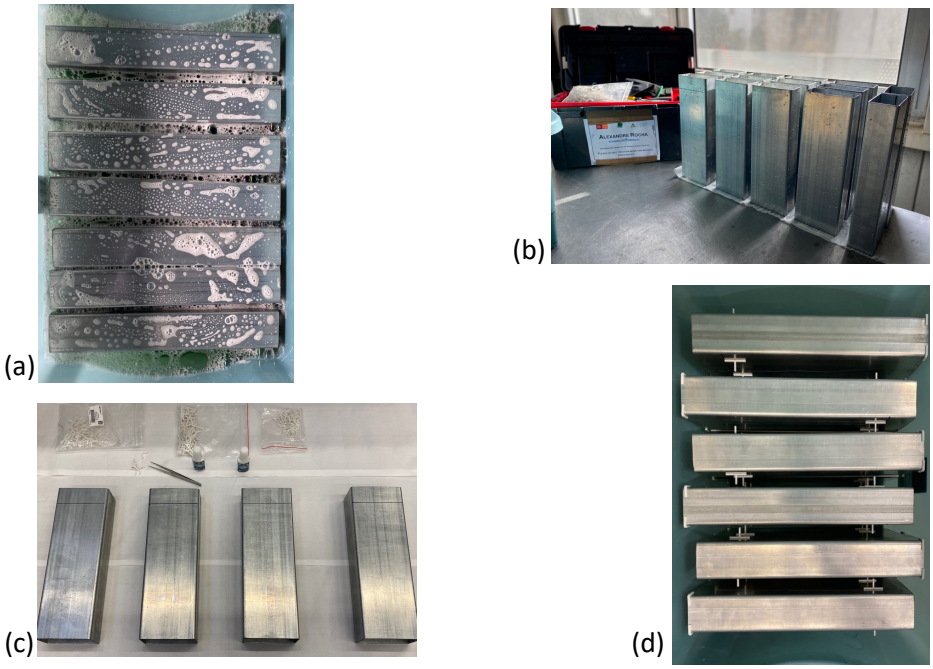


Figura 2 – Perfis metálicos durante: (a)lavagem com solução alcalina (b)secagem (c)posicionamento e colagem dos espaçadores (d)armazenamento

2.4 COMPOSIÇÃO FINAL DO PROVETE DE TIPO *PUSH-OUT*

Esse estudo se limitou a analise de apenas um tipo de adesivo estrutural, sem variações na espessura e ou forma de colagem. A configuração final dos provetes pôde ser obtida a partir da conexão adesiva entre os elementos, utilizando Sikadur - 1 EF, um adesivo epóxi tixotrópico de dois componentes recomendado para ser utilizado tanto em superfícies metálicas quanto em superfície de betão, conforme indicações contidos em sua ficha técnica (SIKA, 2018). Para o processo de colagem, foi utilizando um esquadro com espessura de 2,4 mm e formato da área de adesão, fixado em ambas as

lajes de betão (Figura 3 b). Essa espessura foi definida para garantir que, após a adesão, se obtivesse uma camada de adesivo de espessura igual a 2 mm em toda a área de adesão.

O adesivo foi preparado e espalhado com uma espátula de preenchimento, criando uma distribuição contínua de espessura de adesivo estrutural para posterior adesão entre as lajes de betão e o perfil de aço, conforme mostrado na Figura 3.

Após a aplicação do adesivo, as lajes foram posicionadas, com um espaço para encaixar o perfil no meio. Após posicionar o perfil na posição correta, as lajes foram pressionadas uma contra a outra com a ajuda de um grampo aplicando a força necessária para comprimir a camada de cola até que os espaçadores colados aos perfis tocassem a superfície de betão, garantindo assim uma espessura constante e regularizada para todos os provetes.

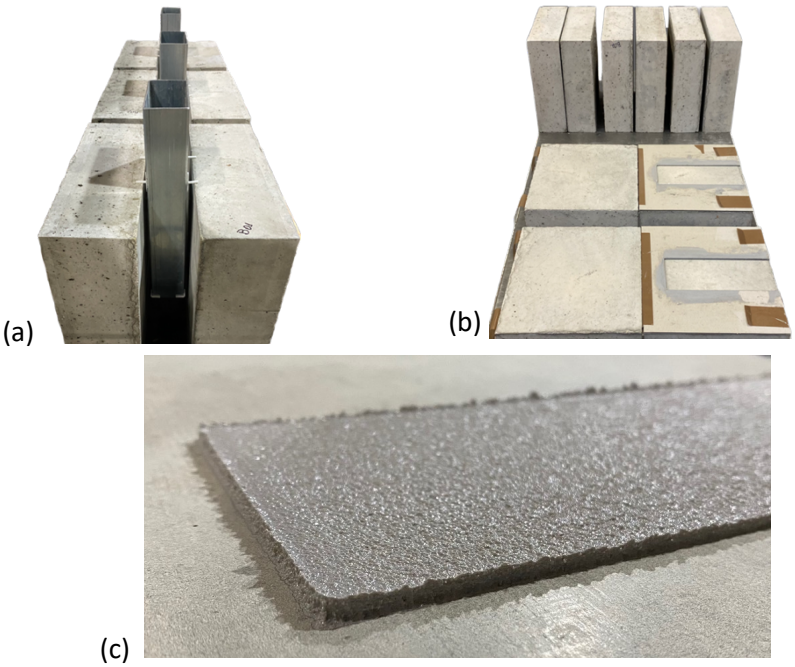


Figura 3 – (a)posicionamento do perfil (b)molde para camada de epóxi (c)detalhe do adesivo.

2.5 PROTOCOLO DO ENSAIO DE TIPO *PUSH-OUT*

A carga foi aplicada através um sistema hidráulico composto por um atuador servocontrolado conectado a uma célula de carga, instalado num pórtico rígido e estável. O atuador servocontrolado é conectado a uma célula de carga com capacidade de 200 kN, e o ensaio foi realizado com controlo de deslocamento, utilizando um LVDT externo para definir a velocidade de 0,002 mm/s associada ao movimento do atuador. Todo o sistema foi conectado ao *software DynaTester*, capaz de controlar o atuador de acordo com os parâmetros fornecidos, incrementando e medindo a carga aplicada durante todo o ensaio.

Além do LVDT de controle, foram instalados outros 6 LVDTs para acompanhar o comportamento do provete durante o ensaio, tendo 4 deles posicionamento vertical (V1, V2, V3 e V4) para medir o deslizamento entre o perfil de aço e as lajes de betão nos 4 cantos do perfil de aço, e 2 deles posicionamento horizontal (H1 e H2) para medir o afastamento ou aproximação entre as lajes na parte superior e inferior (Figura 4).Para evitar que o provete abrisse prematuramente após o início da aplicação da carga, foram colocadas barras de aço com parafusos na parte inferior do provete, apenas

apertadas o suficiente para limitar o movimento horizontal na direção oposta tal como apresentado na Figura 4.

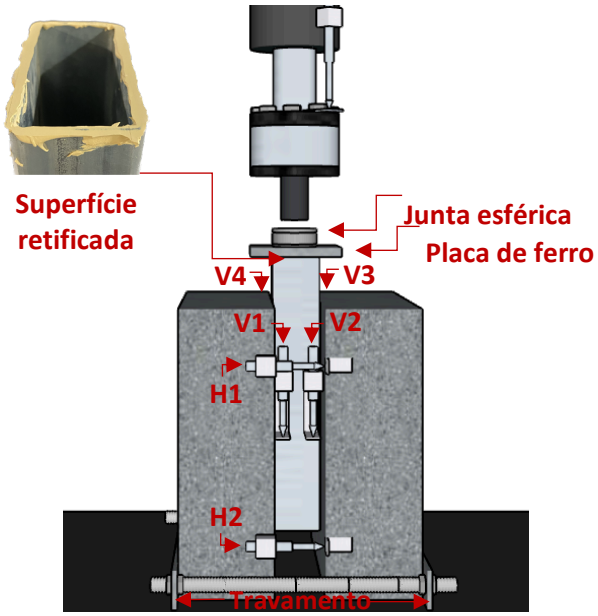


Figura 4 – Esquema da configuração de ensaio, com sensores e acessórios necessários.

Conforme representado na Figura 4, na parte superior do perfil de aço, onde a força é aplicada, após o nivelamento e retificação da superfície com massa de ferro, uma placa de ferro sólido e uma junta esférica são utilizadas para distribuir igualmente a carga por todo o provete.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para este grupo de provetes, dado o protocolo do ensaio, cada ensaio tem uma duração média de 15 minutos do início ao fim, que corresponde ao momento em que a capacidade de carga se reduz a zero.

Após o ensaio, durante uma análise visual, foi possível constatar que nenhum dos provetes apresentou danos significativos além da rotura por adesão para a as séries T180 e T360 (Figura 5 e Figura 6).

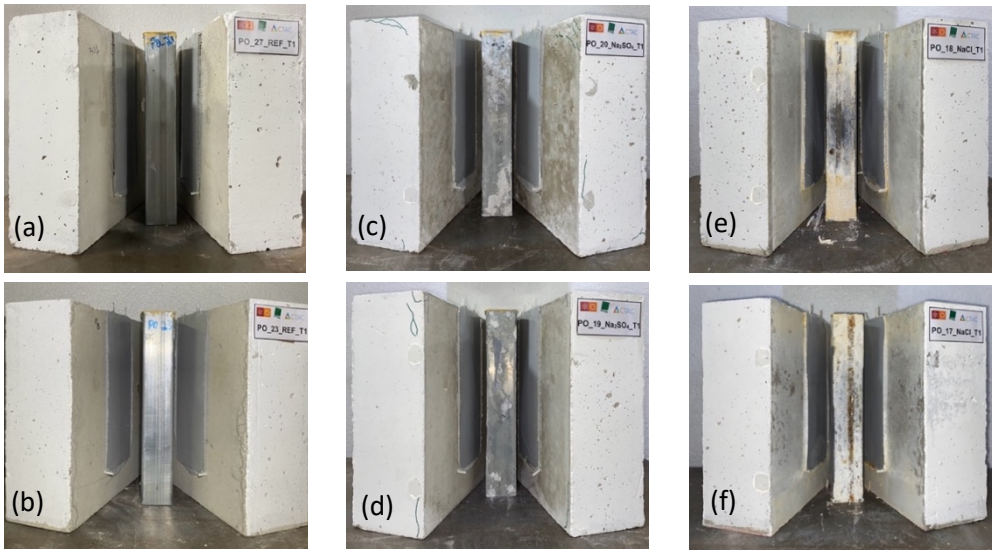


Figura 5 – Série de provetes T180 após rotura: (a)REF_180_1 (b)REF_180_2 (c)SS_180_1 (d)SS_180_2 (e)SC_180_1 (f) SC_180_2.

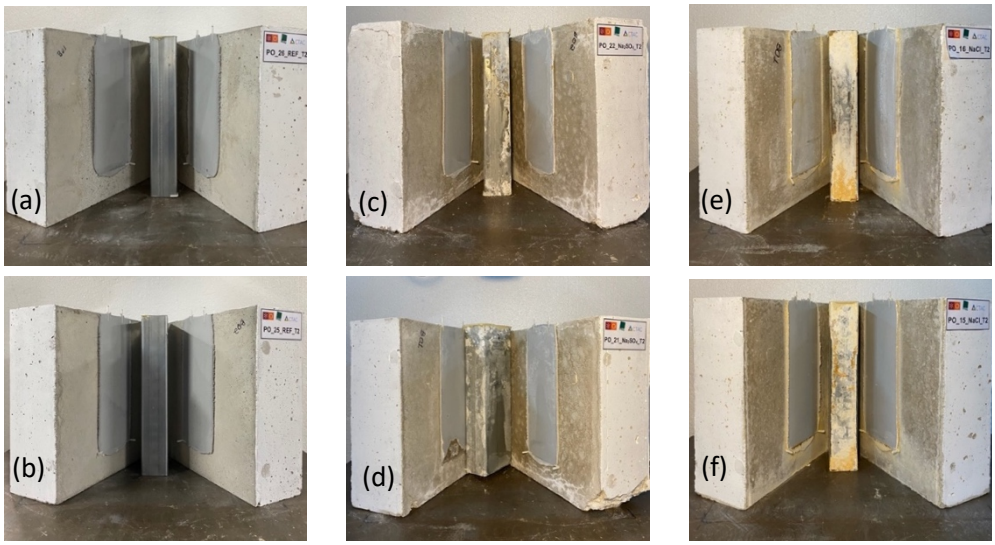


Figura 6 – Série de provetes T360 após rotura: (a)REF_360_1 (b)REF_360_2 (c)SS_360_1 (d)SS_360_2 (e)SC_360_1 (f) SC_360_2.

Ampliando a análise visual para a zona de interesse, o adesivo epóxi, para ambas as séries, verifica-se todas as roturas ocorreram na interface entre o epóxi e o aço. Vale ressaltar que pequenas fissuras nas lajes de betão dos provetes expostos ao ataque por sulfato durante 180 dias (SS_180_1 e SS_180_2) e fissuras relevantes e descolamento do betão nas lajes dos provetes expostos por 360 dias (SS_360_1 e SS_360_2) foram observadas antes do ensaio de corte e foram causadas pela degradação devida à reação entre o sulfato e os constituintes do betão, e não pelo ensaio em si. No que diz respeito à aparência do perfil metálico galvanizado, aos 180 dias de ataque tanto para sulfatos quanto para cloretos nota-se alguma degradação, e quando comparado aos 360 dias de ataque, é possível verificar que essa degradação tem um acréscimo considerável, tal como esperado.

Ao analisar os resultados obtidos para cada provete, é possível observar que em alguns casos existe alguma variação de resultados entre provetes do mesmo grupo, um fator conhecido para este tipo de ensaio, apesar todos os procedimentos que foram estabelecidos para obter espécimes e resultados padronizados, tomando o máximo cuidado durante o processo de adesão, utilizando massa de ferro para regularizar a superfície do perfil de aço onde a carga é aplicada e posicionando um dispositivo articulado para evitar excentricidade na aplicação da carga. Ainda assim foi possível observar, em alguns provetes, que uma das faces aderidas do perfil de aço falhou antes da outra, indicando eventual ação de excentricidade de carga durante esses ensaios.

Um compilado dos resultados obtidos para todos os provetes ensaiados é apresentado na Figura 7 como (a) curvas de força *vs.* deslocamento e (b) curvas de força *vs.* escorregamento (entre o perfil de aço e as lajes de concreto).

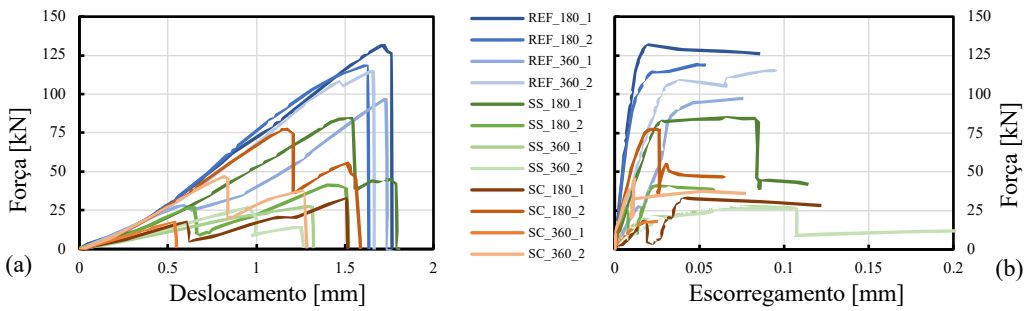


Figura 7 – (a) Compilado de força *vs.* deslocamento (b) Compilado de força *vs.* escorregamento

Tendo em vista que uma curva ideal pode ser obtida quando a rotura ocorre simultaneamente em ambas as faces aderidas do perfil metálico, o que ocorreu em vários dos ensaios realizados, decidiu-se utilizar valores de tensão em vez de valores de carga, de modo a possibilitar o ajuste do valor de tensão para considerar apenas o lado do provete que ainda permanece aderido após a verificação da rotura parcial, tornando os resultados mais comparáveis. Além disso, devido aos ajustes que ocorrem durante a aplicação da carga, os valores de escorregamento são significativamente menores que os valores de deslocamento, como apresentado na Figura 7. Os valores de deslizamento são derivados de 4 LVDTs posicionados verticalmente nos cantos do perfil de aço (Figura 4), medindo o deslizamento relativo entre as lajes de concreto e o perfil de aço. Enquanto os valores de deslocamento são obtidos de um LVDT localizado na base do atuador.

Dado esse contexto, uma curva de tensão *vs.* escorregamento parece mais apropriada para este estudo. Para comparação, a Fig. 5 apresenta ambos os casos: um gráfico com curvas de força *vs.* escorregamento e um gráfico com curvas de tensão *vs.* escorregamento para os mesmos espécimes.

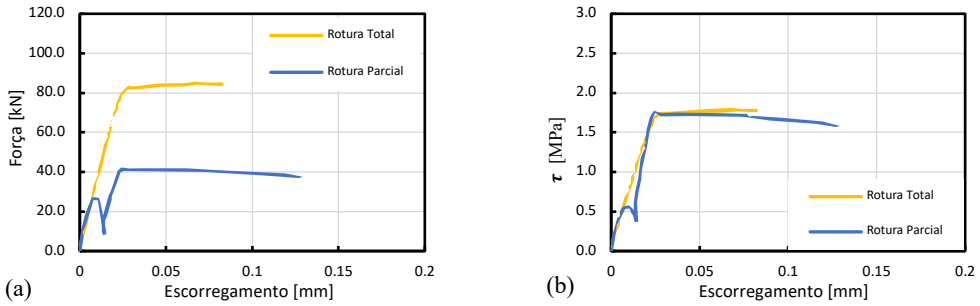


Figura 8 – (a) Curva de força *vs.* escorregamento para provete com rotura total e parcial (b) Curva de tensão *vs.* escorregamento para provete com rotura total e parcial

Tendo em vista que as curvas de força *vs.* Escorregamento (Figura 8 a) consideram apenas os valores da carga aplicada, fica evidente que após haver uma rotura parcial, com o abatimento da carga suportada pelo provete, resulta em uma curva com diferente aspeto quando comparado com uma curva onda não ocorre uma rotura parcial. Quando no lugar de força são utilizados valores de tensão, um gráfico de tensão *vs.* Escorregamento (Figura 8 b) levam em consideração a área de colagem ativa após uma rotura parcial, obtendo curvas mais semelhantes para provetes com rotura parcial e total.

Com base no pressuposto enunciado, a Figura 9 reúne as curvas obtidas para cada um dos provetes analisados, considerando as curvas ajustadas de tensão *vs.* escorregamento.

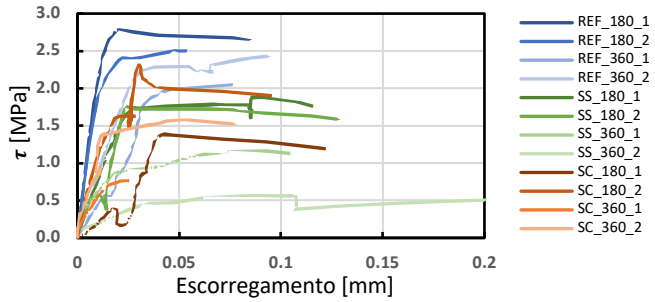


Figura 9 – Gráfico com compilado de tensão *vs*. escorregamento

Nota-se que os provetes analisados têm um comportamento bastante rígido na fase inicial, apresentando valores baixos de escorregamento durante essa fase, até o atingimento de um patamar máximo de cedência, a partir do qual nota-se que mesmo sem que haja incremento de carga, os valores

de escorregamento crescem até a perda total da capacidade de carga da conexão entre os elementos do provete.

Comparando as curvas tensão *vs.* escorregamento dos diferentes grupos de provetes, é possível identificar que os provetes expostos aos ambientes agressivos atingem valores mais baixos de tensão máxima, com valores ligeiramente maiores de escorregamento, demonstrando um comportamento um pouco menos rígido do que os provetes referenciais, mas ainda assim com um comportamento bastante rígido.

O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos para cada um dos provetes, bem como as médias obtidas para cada grupo de provetes, em cada uma das séries.

Quadro 4 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

Provete	P_{MAX} [kN]	P_{AVG} [kN]	Disp [mm]	τ [MPa]	τ_{AVG} [MPa]	Escorregamento [mm]	Tempo de Cura [dias]	Exposição [dias]	Exposição [ciclos]
REF_180_1	132.16	125.70	1.73	2.78	2.65	0.021	225	0	0
REF_180_2	119.25		1.63	2.51		0.049			
REF_360_1	97.29	106.33	1.74	2.05	2.24	0.076	405	0	0
REF_360_2	115.36		1.66	2.43		0.093			
SS_180_1	85.01	63.42	1.52	1.90	1.83	0.085	225	180	180
SS_180_2	41.83		1.47	1.76		0.024			
SS_360_1	27.70	27.36	1.32	1.17	0.89	0.090	405	360	360
SS_360_2	27.02		0.95	0.61		0.344			
SC_180_1	33.12	55.30	1.50	1.39	1.87	0.043	225	180	180
SC_180_2	77.48		1.16	2.35		0.031			
SC_360_1	18.33	32.70	0.54	0.77	1.18	0.024	405	360	360
SC_360_2	47.06		0.83	1.58		0.052			

A Figura 10 detalha resultados da variação da tensão *vs* tempo de exposição, utilizando valores médios de tensão para cada tempo de exposição, onde os provetes referenciais são considerados como resultados para tempo de exposição igual a zero, evoluindo para 180 e 360 dias de exposição.

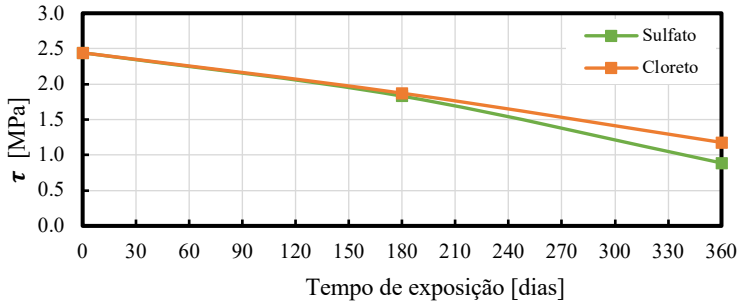


Figura 10 – Gráfico Tensão *vs* Tempo de Exposição.

Para os provetes expostos ao ataque de sulfatos, após completar 120 ciclos de exposição, tempo equivalente a 180 dias, é possível verificar uma perda de 31% em sua capacidade resistente ao corte imposto pelo ensaio do tipo push-out. Esse valor sobe e chega aos 60% quando se completam 240 ciclos de exposição, tempo equivalente a 360 dias.

Já para os provetes expostos ao ataque de cloretos, após completar 180 e 360 ciclos de exposição, tempo equivalente a 180 e 360 dias, é possível verificar perdas de 29% e 47%, respetivamente.

4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu identificar que em alguns casos a capacidade de carga dos elementos estruturais mistos colados que foram objeto deste trabalho foi afetada pelos ambientes agressivos a que foram expostos e que o tempo de exposição aos agentes agressivos é um parâmetro relevante na evolução da capacidade resistente. Embora os elementos tenham mantido uma capacidade resistente considerável depois da exposição, há que explorar mais as alterações de comportamento provocadas pelos ambientes agressivos.

Embora os ensaios do tipo *push-out* sejam indicados por vários autores para analisar a ligação entre elementos, e a campanha experimental tenha sido dimensionada de maneira a explorar diferentes situações e condições, há que considerar em trabalhos futuros que um maior número de provetes por cada grupo pode promover resultados mais precisos, ainda que exista muita dificuldade de trabalhar com um vasto número de provetes e exposições.

Tem em consideração a forma de rotura dos provetes e os resultados obtidos, considera-se que uma análise à superfície do perfil metálico galvanizado se mostra importante, para melhor obter um entendimento dos fenómenos associados à rotura nesta interface aço / epóxi, para que eventuais melhorias possam ser alcançadas.

REFERÊNCIAS

Babu, S. S., & Selvan, S. S. (2021). Study on the flexural and compressive behavior of cold-formed steel sections with and without lips. *Materials Today: Proceedings*, *37*, 265–272. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.240

Barnes, R. A., & Mays, G. C. (2001). The transfer of stress through a steel to concrete adhesive bond. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *21*(6), 495–502. https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00031-8

Berthet, J. F., Yurtdas, I., Delmas, Y., & Li, A. (2011). Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *31*(2), 75–83. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.11.004

Bragança, L., & Mateus, R. (2012). Life-cycle analysis of buildings: Environmental impact of building elements. *International Initiative for a Sustainable Built Environment*, *53*(9), 1689–1699.

Brito, C. B. G., Sales, R. C. M., & Donadon, M. V. (2020). Effects of temperature and moisture on the fracture behaviour of composite adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *100*(December 2019), 102607. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102607

Budhe, S., Banea, M. D., Barros, S. de, & da Silva, L. F. M. (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *72*(October 2016), 30–42. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010

Diógenes, H. J. F., El Debs, A. L. H. C., & Valente, I. B. (2015). Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion, interlocking and friction. *Journal of Constructional Steel Research*, *110*, 170–181. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.012

Ferrer, M., Marimon, F., & Casafont, M. (2018). An experimental investigation of a new perfect bond technology for composite slabs. *Construction and Building Materials*, *166*, 618–633. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.104

Ghumatkar, A., & Sekhar, R. (2017). *Experimental study on different adherend surface roughness on the adhesive bond strength*. *4*, 7801–7809. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.115

Hsu, C., Munoz, P., Punurai, S., Majdi, Y., & Punurai, W. (2012). Behavior of composite beams with cold-formed steel joists and concrete slab. *21st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. https://scholarsmine.mst.edu/isccss/21iccfss/21iccfss-session5/2/

Hsu, C., Punurai, S., Punurai, W., & Majdi, Y. (2014). New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab. *Engineering Structures*, *71*, 187–200. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.04.011

Kumar, P., Patnaik, A., & Chaudhary, S. (2017). A review on application of structural adhesives in concrete and steel–concrete composite and factors influencing the performance of composite connections. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *77*(March), 1–14. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.009

Meaud, C., Jurkiewiez, B., & Ferrier, E. (2014). Steel-concrete bonding connection: An experimental study and non-linear finite element analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *54*, 131–142. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.010

Samiee, P., Niari, S. E., & Ghandi, E. (2021). Fire performance of cold-formed steel shear wall with different steel grade and thicknesses. *Structures*, *29*(May 2020), 751–770. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.073

SIKA. (2018). *Sikadur -31 EF*. 2–5.

Souici, A., Berthet, J. F., Li, A., & Rahal, N. (2013). Behaviour of both mechanically connected and bonded steel-concrete composite beams. *Engineering Structures*, *49*, 11–23. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.014

Sun, L., Li, C., Tie, Y., Hou, Y., & Duan, Y. (2019). Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *95*(June), 102402. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102402

Tao, Y., Mahendran, M., & Review, W. (2021). Fire tests of cold-formed steel walls made of hollow section studs. *Journal of Constructional Steel Research*, *178*, 106495. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106495

Thevenet, D., Créac'hcadec, R., Sohier, L., & Cognard, J. Y. (2013). Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compression-shear cyclic loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *44*, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.01.011

Torgal, F. ; J., S. (2010). Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção. *CM Materials*, 2010–2010.

Valente, I. (2007). *Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges*. *April*. http://hdl.handle.net/1822/8478

Volkersen, O. (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbean spruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerscnitten. *Luftfahrforschung*, 15:41-7.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INOVAÇÃO E LICITUDE: CONTRATAÇÃO E FISCALIZAÇÃO DE SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO BASEADA EM BIM EM ÓRGÃOS PÚBLICOS BRASILEIROS

Stella de Oliveira Cândido[a]; Beatriz Campos Fialho[b]

[a]Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Engenharia Civil, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brasil, s.candido@unesp.br

[b]Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Secretaria Geral de Gestão do Espaço Físico, Rodovia Washington Luís, km 235 – SP-310, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil, beatrizfialho@ufscar.br

RESUMO

A Modelagem da Informação da Construção (BIM) tem sido incorporada ao projeto, construção e, recentemente, à operação de empreendimentos. No Brasil, a legislação estabelece condições para implementação do BIM, especialmente, para instituições públicas. Embora haja consenso sobre os benefícios, o arcabouço legal pode prejudicar a aplicação do BIM nas licitações e no Gerenciamento de *Facilities* (FM) em edificações públicas. Nesse contexto, esta pesquisa busca identificar entraves impostos pelo arcabouço jurídico brasileiro para contratação pública de serviços de manutenção predial em BIM. A metodologia utilizou métodos qualitativos, compreendendo: levantamento bibliográfico e documental, com enfoque na legislação e jurisprudência pertinentes; análise crítica qualitativa para identificação de potenciais entraves entre a adoção do BIM e o arcabouço jurídico; e proposição de inferências lógicas. Para isso, foram apresentados dois cenários: no primeiro, verifica-se a inviabilidade de participação de micro e pequenas empresas em licitações exclusivas; no segundo, percebe-se a implementação ineficiente da metodologia BIM em ampla concorrência. Em ambos, verifica-se potencial para aumento da burocracia e desperdício de recursos públicos. A pesquisa aponta para a necessidade de elaboração de regulamentação BIM em FM e para a necessidade de diálogo entre os diversos agentes para esclarecer e divulgar o funcionamento da metodologia BIM.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção, Licitação Pública, Contratação Pública, Gerenciamento de *Facilities*, Contrato de Manutenção

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente do espaço físico desempenha papel estratégico para as organizações, apoiando suas atividades-fim, garantindo o bem-estar dos usuários e o uso racional e sustentável dos recursos naturais e financeiros, durante todo o ciclo de vida dos edifícios e equipamentos. A fase de Operação e Manutenção (O&M) é apontada na literatura como a principal responsável pelos custos de um empreendimento, correspondendo a 80% de seus custos e recursos totais (Royal Institution Of Chartered Surveyors, 2015).

Ferramentas de Modelagem da Informação da Construção (BIM) têm sido gradativamente incorporadas pela indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) no projeto e construção e, mais recentemente, na fase de O&M, demonstrando potencial para aprimorar a gestão da informação de forma integrada, estruturada, assertiva e acessível a todos os agentes do processo, resultando em práticas mais preditivas, econômicas e sustentáveis (Eastman *et al*., 2014; European Federation Of Engineering Consultancy Associations, 2019; Pishdad-Bozorgi, 2017).

A Universidade Estadual da Pensilvânia (PSU) apresenta cinco usos BIM para a fase de Operação das edificações: monitoramento da manutenção, monitoramento da performance dos sistemas prediais, monitoramento dos recursos, monitoramento da utilização dos espaços e análise do gerenciamento de ações emergenciais (Penn State, 2024).

Os usos citados figuram entre as atividades típicas do Gerenciamento de *Facilities* (FM) e envolvem a combinação de ações gerenciais, administrativas e técnicas para manter ou restaurar a funcionalidade dos diversos recursos e sistemas (International Organization for Standardization, 2024). Aqui, destaca-se a importância da manutenção preventiva e preditiva, apontadas pela literatura como mais econômicas e efetivas que a manutenção corretiva ou reativa (Velmurugan & Dhingra, 2015), com ganhos de eficiência de até 40% na provisão de serviços (Sullivan *et al*., 2010).

Pérez-García *et al*. (2024) defendem que o setor público possui alto potencial para atuar como força motriz na implementação da metodologia BIM e que, para que isso ocorra de forma bem-sucedida, é crucial que se estabeleçam regulamentações BIM e diretrizes contratuais apropriadas para os processos licitatórios.

No Brasil, a disseminação do BIM vem sendo impulsionada pela Estratégia BIM BR (Decreto nº 11.888, 2024) e pelo Decreto nº 10.306/2020 (Decreto nº 10.306, 2020), que estabelecem fases e responsabilidades para criação de um ambiente favorável para seu investimento e difusão. No mesmo sentido, a Lei de Licitações e Contratos Administrativos (Lei nº 14.133, 2021) estabelece que as licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura para órgãos públicos devem ser, preferencialmente, elaboradas adotando-se a metodologia BIM, desde que adequada ao objeto da licitação.

Ainda que haja consenso sobre os benefícios associados à assertividade dos processos em BIM, existe uma cultura conservadora nos órgãos de fiscalização brasileiros que pode prejudicar ou até mesmo inviabilizar a aplicação prática dessa metodologia nos processos licitatórios e de FM nas edificações públicas.

Considerando o contexto nacional, esta pesquisa tem por objetivo identificar os principais entraves impostos pela legislação e jurisprudência brasileiras para a contratação pública de serviços de manutenção predial baseados na metodologia BIM.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa é baseada em uma abordagem exploratória do fenômeno investigado, buscando visão geral e aproximativa sobre o tema (Gil, 2019). Como mostra a Figura 1, foram utilizados métodos qualitativos para coleta e análise dos dados: os dados teóricos foram coletados por meio da revisão de literatura, enquanto os dados empíricos foram levantados a partir da análise documental da legislação pertinente. Baseando-se no método hipotético-dedutivo, a pesquisa compreendeu:

- Levantamento bibliográfico e documental, com enfoque na análise da legislação pertinente e na jurisprudência relativa ao tema;
- Análise qualitativa, para identificação de potenciais entraves entre a adoção da metodologia BIM e o arcabouço jurídico brasileiro;
- Análise crítica e qualitativa dos dados empíricos, baseando inferências lógicas quanto aos principais impedimentos e desafios para a contratação bem-sucedida de serviços de manutenção em BIM em órgãos públicos brasileiros.

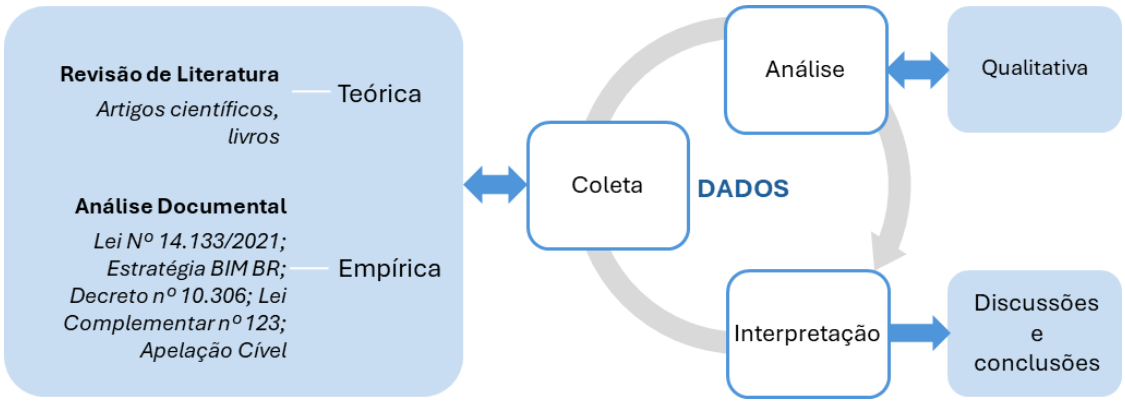


Figura 1 – Metodologia adotada

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Decreto nº 10.306/2020 (Decreto nº 10.306, 2020) estabelece três fases de implementação do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia no âmbito da administração pública federal brasileira:

- Primeira fase, a partir de 1º de janeiro de 2021: estabelece o uso de BIM "no desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia, referentes a construções novas, ampliações ou reabilitações, quando consideradas de grande relevância para a disseminação do BIM" (Decreto nº 10.306, 2020);
- Segunda fase, a partir de 1º de janeiro de 2024: estabelece o uso de BIM "na execução direta ou indireta de projetos de arquitetura e engenharia e na gestão de obras, referentes a construções novas, reformas, ampliações ou reabilitações, quando consideradas de grande relevância para a disseminação do BIM" (Decreto nº 10.306, 2020);
- Terceira fase, a partir de 1º de janeiro de 2028: estabelece o uso de BIM "no desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia e na gestão de obras referentes a construções novas, reformas, ampliações e reabilitações, quando consideradas de média ou grande relevância para a disseminação do BIM" (Decreto nº 10.306, 2020).

O art. 4º, inciso III, alínea b, institui ainda que a terceira fase abrangerá "o gerenciamento e a manutenção do empreendimento após a sua construção, cujos projetos de arquitetura e engenharia

e cujas obras tenham sido desenvolvidos ou executados com aplicação do BIM" (Decreto nº 10.306, 2020). Em tese, isso implica que, em menos de quatro anos, empreendimentos da administração pública federal, de média ou grande relevância e cujos projetos e obras tenham sido desenvolvidos segundo a metodologia BIM, terão suas atividades de FM também vinculadas a essa metodologia.

Apesar de, oficialmente, estar na vigência da segunda fase de implementação, a disseminação efetiva do BIM em contratações públicas encontra-se ainda em estágio inicial no Brasil, em especial na fase de O&M. Não há, até o momento, regulamentação para orientar a contratação e fiscalização dos serviços de manutenção predial nesse sentido.

Em 2018, o Governo Federal instituiu a chamada Estratégia BIM BR, por meio do Decreto nº 9.377, "com a finalidade de promover um ambiente adequado ao investimento em *Building Information Modelling* – BIM e sua difusão no País" (Decreto nº 9.377, 2018). Em 2019, devido à reforma ministerial do período, foi lançado o Decreto nº 9.983 (Decreto nº 9.983, 2019), ajustando a governança do Comitê Gestor da política e instituindo um *roadmap*, mas mantendo os objetivos e as metas. Por sua vez, este decreto foi revogado pelo Decreto nº 11.888/2024 (Decreto nº 11.888, 2024), vigente atualmente. Seis anos depois da criação da Estratégia BIM BR, a regulamentação normativa para orientar a implementação da metodologia BIM no país continua em elaboração.

Pesquisas prévias apontam que as dificuldades em estabelecer normativas adequadas à implementação da metodologia BIM são recorrentes, em especial, em países em desenvolvimento (Gamil & Rahman, 2019; Manzoor *et al*., 2021; Olanrewaju *et al*., 2020; Pérez-García *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2019). Esse quadro é agravado, posto que a literatura especializada ainda é fortemente concentrada nas fases de projeto, orçamento e construção (Kassem & Amorim, 2015; Moreira & Ruschel, 2015). Na revisão de literatura, foram identificadas poucas referências relevantes que tratassem da regulamentação em BIM para serviços de FM e em manutenção predial, especificamente.

Com enfoque nos aspectos legais do uso de BIM para FM no Brasil, Duque *et al.* (2023) avaliam que a legislação vigente apresenta lacunas quanto à obrigatoriedade do BIM em todos os órgãos da Administração Pública, deixando a cargo de seus gestores a decisão de implementar a metodologia em suas organizações. A partir de um estudo de casos múltiplos com setores de FM de universidades do Brasil e Reino Unido, Fialho *et al.* (2023) demonstraram a necessidade do desenvolvimento de padrões e guias para estruturar serviços de FM, baseados não somente em referências externas como normas e *mandates*, mas também nas necessidades individuais de cada organização.

Acredita-se que a carência de estudos na área seja fruto direto do atual nível de maturidade BIM da indústria de AEC e da Administração Pública, de modo que, com a evolução e amadurecimento dos processos das fases anteriores, os serviços de manutenção predial serão naturalmente incorporados e definidos.

Embora a fase de implementação dos processos de FM em BIM tenha início previsto para 1º de janeiro de 2028 (Decreto nº 10.306, 2020), o prazo poderá estender-se na prática. Tendo em vista que a Lei nº 14.133/2021 (Lei nº 14.133, 2021) permite que os contratos de manutenção tenham duração de 5 anos, renováveis por mais 5, a implementação completa da terceira fase poderia ser adiada, no mais tardar, para 1º de janeiro de 2038.

Embora isso proporcione maior margem para definição das estratégias de implementação, a legislação vigente já apresenta pontos críticos que podem inviabilizar a efetividade dos processos.

Um exemplo é uma aparente contradição no âmbito da interoperabilidade entre o Decreto nº 11.888/2024 (Decreto nº 11.888, 2024) – que define a Estratégia BIM BR, em geral – e o Decreto nº

10.306/2020 (Decreto nº 10.306, 2020) – que orienta sobre a aplicação da metodologia BIM em obras e serviços de engenharia, apresentada a seguir. No item "Regras gerais do instrumento convocatório e do contrato", o Decreto nº 10.306/2020 (Decreto nº 10.306, 2020) estabelece que:

> Art. 6º A obrigação de o contratado utilizar o **BIM** deverá abranger, no mínimo:
>
> I - os usos do **BIM** a que se refere o art. 4º, obedecidas as suas fases de disseminação;
>
> II - a disponibilização dos arquivos eletrônicos, que deverão conter os modelos e os documentos técnicos que compõem o projeto de arquitetura e engenharia, em formato aberto (não proprietário) e em outro formato exigido pela contratante no edital de licitação; (Decreto nº 10.306, 2020, grifo do original)

A utilização de formatos abertos (não proprietários) assegura a interoperabilidade, característica essencial da metodologia BIM (Eastman *et al*., 2014) e defendida pelo Decreto nº 11.888/2024 (Decreto nº 11.888, 2024):

> Art. 2º São objetivos da Estratégia **BIM** BR:
>
> […]
>
> X - incentivar o uso de especificações técnicas abertas para a interoperabilidade em **BIM** com o propósito de:
>
> a) estimular a concorrência no mercado;
>
> b) aumentar a participação e o acesso dos profissionais de projetos e obras ao mercado; e
>
> c) estimular o desenvolvimento da documentação digital de ativos de projetos e obras da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios e ampliar suas possibilidades de uso; (Decreto nº 11.888, 2024, grifo do original)

Porém, ao permitir a exigência em contrato da disponibilização de arquivos eletrônicos em formato específico, determinado pela contratante, o Decreto nº 10.306/2020 (Decreto nº 10.306, 2020) não apenas tende a restringir a concorrência de mercado (determinando que as empresas licitantes sejam obrigadas a utilizar uma ferramenta específica, independentemente de seus processos prévios próprios), como contraria a própria lógica dos formatos abertos, que asseguram a interoperabilidade entre quaisquer *softwares* adotados nos processos BIM.

As maiores contradições, no entanto, são evidenciadas na compatibilização desses decretos com a Lei de Licitações e Contratos Administrativos (Lei nº 14.133, 2021). É preciso contextualizar que um país como o Brasil, com dimensões continentais, possui realidades diversas, todas abarcadas pela mesma Lei de Licitações e Contratos Administrativos, igualmente aplicável à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios. Assim, em termos jurídicos, não há distinção entre a potencial contratação de serviços de FM em BIM para, por exemplo, universidades federais, com múltiplos *campi* e áreas construídas na casa de centenas de milhares de metros quadrados, e órgãos públicos com sede única e área reduzida.

Há, no entanto, distinção sobre a possibilidade de participação em processos licitatórios: a Lei Complementar nº 123/2006 (Lei Complementar nº 123, 2006), art. 48, inciso I, determina que a administração pública "deverá realizar processo licitatório destinado exclusivamente à participação de microempresas e empresas de pequeno porte nos itens de contratação cujo valor seja de até R$ 80.000,00 (oitenta mil reais)" (Lei Complementar nº 123, 2006).

Os custos dos serviços de manutenção predial são, comumente, proporcionais à complexidade e ao tamanho das edificações. Logo, é possível inferir que, em diversos órgãos públicos, a manutenção de edificações com área reduzida seria realizada exclusivamente por micro e pequenas empresas, devido ao valor de suas contratações. Por sua vez, serviços de manutenção em instituições de médio e grande porte seriam potencialmente contratados por meio de ampla concorrência.

A partir dessas considerações, são discutidos a seguir os principais entraves impostos pela legislação e jurisprudência brasileiras para a contratação pública de serviços de manutenção predial baseados na metodologia BIM, em dois cenários: Cenário 1 – contratos exclusivos para micro e pequenas empresas e Cenário 2 – contratos de ampla concorrência.

3.1 CENÁRIO 1: CONTRATOS EXCLUSIVOS PARA MICRO E PEQUENAS EMPRESAS

No primeiro cenário, a regulamentação da Estratégia BIM BR estabelece atos normativos precisos que determinam como deverão ser executados os serviços de FM em edificações públicas, a partir da terceira fase de implementação da metodologia BIM no país.

Os investimentos necessários para adoção da metodologia BIM são relatados na literatura, indicando elevados custos iniciais associados ao desenvolvimento de padrões e guias, capacitação de recursos humanos, revisão de processos internos e aquisição de equipamentos e programas compatíveis (Fialho *et al*., 2023; Gamil & Rahman, 2019; Manzoor *et al*., 2021; Olanrewaju *et al*., 2020; Pérez-García *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2019).

A partir da investigação do uso de BIM e outras tecnologias digitais na contratação de serviços de manutenção e instalações na Alemanha, Welsh e Batalla-Martínez (2023) avaliam que muitas empresas de médio porte não estão conscientes dos benefícios dessas tecnologias ou simplesmente não se interessam por mudar seus processos de trabalho.

Pérez-García *et al*. (2024) apontam que empresas de pequeno e médio portes representavam 99,97% das empresas no setor da construção na Espanha em 2022. Os autores afirmam que essas empresas apresentam um nível mais baixo de maturidade BIM, em geral, devido a seus recursos humanos e financeiros limitados e devido ao seu campo de atuação voltado para projetos menores e menos complexos, nos quais a necessidade da metodologia BIM não é percebida como essencial. Os autores alertam ainda que algumas dessas empresas têm menor grau de digitalização e não são receptivas a processos de inovação.

Esse diagnóstico se aplica ao contexto brasileiro, sugerindo que a exigência da metodologia BIM em serviços de FM, em especial voltados para edificações com área reduzida, poderia inviabilizar a participação das micro e pequenas empresas nos processos licitatórios.

Somada à exclusividade contratual para micro e pequenas empresas em licitações abaixo de R$ 80.000,00 (oitenta mil reais), essa inferência indica que existe alta probabilidade de que os processos licitatórios para contratação de serviços de FM em BIM resultem em licitações desertas.

Pérez-García *et al*. (2024) alertam para essa possibilidade, concluindo que as contratantes devem analisar os requisitos do objeto contratual e o nível de maturidade BIM da própria instituição, assim como do mercado de AEC, antes de publicar o edital de licitação. Os autores afirmam: “Altas demandas para incorporação da metodologia, sem considerar as questões acima, podem resultar na licitação sendo declarada inválida ou na empresa vencedora da licitação sendo incapaz de atender aos critérios e prazos especificados no contrato, afetando a qualidade dos resultados” (Pérez-García *et al*., 2024, p.8, tradução livre).

A inviabilidade prática de participação das micro e pequenas empresas nesses processos licitatórios não só contraria um dos princípios básicos da Lei de Licitações e Contratos Administrativos (Lei nº 14.133, 2021) – a competitividade – como ocasiona desperdício de recursos públicos na elaboração de licitações malsucedidas.

Ademais, ao adiar a execução dos serviços de manutenção predial, esse entrave contribui para o sucateamento dos órgãos públicos e para o aumento dos custos de operação das edificações em médio e longo prazos, transformando a manutenção preventiva em manutenção corretiva.

3.2 CENÁRIO 2: CONTRATOS DE AMPLA CONCORRÊNCIA

No segundo cenário, considera-se a participação das micro e pequenas empresas, bem como empresas de médio e grande portes em processos licitatórios de ampla concorrência, para contratos de valores acima de R$ 80.000,00 (oitenta mil reais).

O art. 23, § 1º, da Lei nº 14.133/2021 (Lei nº 14.133, 2021) estabelece cinco possibilidades para a estimativa do valor de contrato:

> I - composição de custos unitários menores ou iguais à mediana do item correspondente no painel para consulta de preços ou no banco de preços em saúde disponíveis no Portal Nacional de Contratações Públicas (PNCP);
>
> II - contratações similares feitas pela Administração Pública, em execução ou concluídas no período de 1 (um) ano anterior à data da pesquisa de preços, inclusive mediante sistema de registro de preços, observado o índice de atualização de preços correspondente;
>
> III - utilização de dados de pesquisa publicada em mídia especializada, de tabela de referência formalmente aprovada pelo Poder Executivo federal e de sítios eletrônicos especializados ou de domínio amplo, desde que contenham a data e hora de acesso;
>
> IV - pesquisa direta com no mínimo 3 (três) fornecedores, mediante solicitação formal de cotação, desde que seja apresentada justificativa da escolha desses fornecedores e que não tenham sido obtidos os orçamentos com mais de 6 (seis) meses de antecedência da data de divulgação do edital;
>
> V - pesquisa na base nacional de notas fiscais eletrônicas, na forma de regulamento. (Lei nº 14.133, 2021)

Os incisos I e III referem-se a itens facilmente padronizáveis, como produtos industrializados, e, portanto, não se aplicam a serviços de engenharia. Os incisos II e V dependem de contratações similares previamente bem-sucedidas, logo, não se aplicam ao contexto em análise, posto que não há, no momento, expertise em contratação de serviços de FM em BIM. Consequentemente, a estimativa dos valores contratuais recairia no inciso IV, com a composição de preço feita por levantamento de mercado.

A lei estabelece ainda que o processo licitatório deve compatibilizar-se com o plano de contratações anual (PCA), sempre que elaborado. Nesse sentido, os orçamentos devem ser rigorosamente embasados e justificados para evitar questionamentos e paralisações processuais pelos órgãos de controle fiscal.

Devido ao investimento necessário, é esperado que empresas especializadas na metodologia BIM apresentem custos mais elevados quando comparados com empresas baseadas na metodologia

tradicional. O custo adicional de aquisição se justifica na economia posterior[1], ao longo do ciclo de vida das edificações, porém é refletido na etapa de composição de preço.

Serviços de manutenção são classificados como serviços comum de engenharia e, portanto, recaem na modalidade de pregão, "cujo critério de julgamento poderá ser o de menor preço ou o de maior desconto" (Lei nº 14.133, 2021).

A partir da composição de preço, publica-se o edital do pregão e as empresas licitantes apresentam suas propostas comerciais. Na etapa competitiva, os licitantes ofertam lances sucessivos, sempre em valor menor que o anterior. Ao fechamento da sessão, as propostas apresentadas são organizadas em ordem crescente de valores e a de menor valor é declarada vencedora da licitação.

O art. 59 da Lei nº 14.133/2021 determina que propostas com preços considerados inexequíveis deverão ser desclassificadas e apresenta como critério: "§ 4º No caso de obras e serviços de engenharia, serão consideradas inexequíveis as propostas cujos valores forem inferiores a 75% (setenta e cinco por cento) do valor orçado pela Administração" (Lei nº 14.133, 2021).

No entanto, a desclassificação por preço inexequível não ocorre automaticamente: a jurisprudência determina que "A proposta ofertada em percentual [de desconto] superior ao previsto na lei gera uma presunção apenas relativa de inexequibilidade, sendo facultado ao licitante, nesse caso, a comprovação de que a sua proposta é exequível" (Apelação Cível, 2022). Assim, a Administração deve realizar diligências junto ao licitante para verificar a exequibilidade da proposta.

Ocorre que, apesar da previsão em lei de desclassificação das propostas com descontos excessivos, não há critério claro para julgar se a justificativa apresentada pelo licitante é exequível ou não. A jurisprudência determina ainda que "Os atos administrativos gozam de presunção de veracidade e de legitimidade, só podendo ser desconstituídos por meio de prova em sentido contrário" (Apelação Cível, 2022). Assim, a Administração se vê obrigada a aceitar quaisquer justificativas apresentadas como propostas exequíveis, independentemente do valor ofertado em pregão.

Na prática, isso propicia que empresas baseadas em métodos tradicionais e, portanto, com menor custo de produção, sejam as vencedoras nas licitações projetadas para a metodologia BIM. Posto que o objetivo contratual é a manutenção predial e não a metodologia em si, enquanto não houver problemas na execução do contrato – isto é, "prova em sentido contrário" – não há como excluir empresas de metodologia tradicional nesses certames.

Pérez-García *et al*. (2024) assinalam que alguns obstáculos na adoção da metodologia BIM tendem a desestimular os profissionais com conhecimento e desejo de implementar a metodologia, fazendo com que retornem aos métodos tradicionais no longo prazo, para adequar-se às tendências do mercado.

Outro agravante é que a grande divergência entre os valores orçados pela Administração e os valores dos contratos efetivamente executados poderia levantar a suspeita de corrupção dos agentes públicos, por gerar dados "inflados" nos planos de contratações anuais, levando a processos de auditoria pelos órgãos de fiscalização.

[1] Com a plena implementação da metodologia BIM, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) estima um aumento de produtividade de 10% na indústria de AEC (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do apresentado, percebe-se um descompasso entre o arcabouço jurídico e a estratégia de implementação da metodologia BIM no Brasil. No cenário 1, o que se verifica é a inviabilidade de participação de micro e pequenas empresas em processos licitatórios direcionados exclusivamente às mesmas. No cenário 2, o resultado é uma implementação ineficiente da metodologia BIM. Em ambos os casos, verifica-se grande potencial para aumento da burocracia e desperdício de recursos públicos, mal direcionados para seus reais objetivos.

Os resultados apontam para a necessidade de elaboração de padrões e guias BIM para estruturar a gestão de informação na contratação de serviços de manutenção, estabelecendo papéis, responsabilidades e requisitos de informação. A ausência de diretrizes comuns e compulsórias para todos os órgãos da Administração Pública pode retardar ainda mais o processo de implementação do BIM nas atividades de manutenção, levando a um descompasso técnico entre os diversos órgãos e a perpetuação de práticas conservadoras e ineficazes.

Ademais, infere-se a necessidade de auxiliar no diálogo entre os agentes da Administração Pública, as empresas licitantes e os órgãos de fiscalização: é preciso esclarecer e divulgar o funcionamento de processos e ferramentas BIM, apontando fragilidades a serem supridas para a efetiva realização de seus benefícios em organizações públicas e em toda a cadeia produtiva da construção.

Diante da relevância das atividades de FM para a otimização de recursos na fase de O&M de edifícios e equipamentos, esta pesquisa contribui para a área do conhecimento discutindo as potencialidades e limitações diante da dicotomia entre a metodologia de vanguarda e a jurisprudência tradicionalmente conservadora.

As considerações e conclusões desta pesquisa não pretendem exaurir todas as possibilidades sobre o tema, mas levantar a discussão em tempo hábil para ajustes e correções das incompatibilidades identificadas. Dentre as principais sugestões para trabalhos futuros, destacam-se a definição de critérios para desclassificação de propostas comerciais consideradas inexequíveis e a elaboração de regulamentação da metodologia BIM em serviços de FM, tendo em conta as características próprias do contexto nacional.

REFERÊNCIAS

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2024, janeiro 22). Lula assina decreto da nova Estratégia BIM BR. https://www.abdi.com.br/presidente-lula-assina-decreto-da-nova-estrategia-bim-br/

Apelação Cível nº XXXXX-81.2022.8.15.0251. (2022). Tribunal de Justiça da Paraíba (4. Câmara Cível). Relator: Romero Marcelo da Fonseca Oliveira. https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/tj-pb/2469676400/inteiro-teor-2469676406

Decreto nº 9.377, de 17 de maio de 2018. (2018, maio 17). Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/d9377.htm

Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. (2019, agosto 22). Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-

2022/2019/decreto/d9983.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%209.983%2C%20DE%2022%20DE%20AGOSTO%20DE%202019&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Estrat%C3%A9gia%20Nacional,que%20lhe%20confere%20o%20art.

Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. (2020, abril 2). Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – Estratégia BIM BR, instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10306.htm

Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024. (2024, janeiro 22). Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil – Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling – BIM BR. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d11888.htm

Duque, M. A., Ferneda, E., Silva, A. P. B., Streit, R. E., Scheer, S. (2023). The use of BIM in FM: legal aspects in the context of the BIM BR strategy. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, 11(84):70-84. https://doi.org/10.17271/23188472118420233675

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. (2014). Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Bookman.

European Federation of Engineering Consultancy Associations. (2019). BIM and ISO 19650 from a project management perspective. European Federation of Engineering Consultancy Associations. https://www.efcanet.org/sites/default/files/2020-01/390764_BIM%20booklet.pdf

Fialho, B. C., Fabricio, M. M., Codinhoto, R. (2023). Required Changes to Unlock Value Generation through Implementing BIM and IoT for Universities FM Services. Buildings 2023, 13(9)2150:1-19. https://doi.org/ 10.3390/buildings13092150

Gamil, Y., Rahman, I. A. R. (2019). Awareness and challenges of building information modelling (BIM) implementation in the Yemen construction industry. Journal of Engineering, Design and Technology, 17(5):1077-1084. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JEDT-03-2019-0063/full/pdf

GIL, A. C. (2019). Métodos e técnicas de pesquisa social (7a ed.). Atlas.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 41001: Facility Management – Vocabulary. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/82405.html

Kassem, M., Amorim, S. R. L. (2015). BIM: Building Information Modeling no Brasil e na União Europeia. Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil. https://eubrdialogues.com/sites/default/files/acoes/documentos/bim.pdf

Lei Complementar nº 123, de 14 de dezembro de 2006. (2006, dezembro 14). Institui o Estatuto Nacional da Microempresa e da Empresa de Pequeno Porte; altera dispositivos das Leis nº 8.212 e 8.213, ambas de 24 de julho de 1991, da Consolidação das Leis do Trabalho – CLT, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, da Lei nº 10.189, de 14 de fevereiro de 2001, da Lei Complementar nº 63, de 11 de janeiro de 1990; e revoga as Leis nº 9.317, de 5 de dezembro de

1996, e 9.841, de 5 de outubro de 1999. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp123.htm

Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. (2021, abril 1º). Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Diário Oficial da União, seção 1. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm

Manzoor, B., Othman, I., Gardezi, S.S.S., Altan, H., Abdalla, S.B. (2021). BIM-based research framework for sustainable building projects: a strategy for mitigating BIM implementation barriers. Applied Sciences, 11:1-18. https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5397

Moreira, L. C. D. S., Ruschel, R. C. (2015). Impacto da adoção de BIM em Facility Management: uma classificação. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, 6(4):277–290. https://doi.org/10.20396/parc.v6i4.8634982

Olanrewaju, O. I., Chileshe, N., Babarinde, S. A., Sandanayake, M. (2020). Investigating the barriers to building information modeling (BIM) implementation within the Nigerian construction industry. Engineering, Construction and Architectural Management, 27(10):2931-2958. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-01-2020-0042/full/pdf

Penn State. (2024). BIM Uses. College of Engineering. https://bim.psu.edu/uses/

Pérez-García, A., Martín-Dorta, N., Aranda, J. A. (2024). Enhancing BIM implementation in Spanish public procurement: a framework approach. Heliyon, 10(9):1-10. https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)06681-7

Pishdad-Bozorgi, P. (2017). Future Smart Facilities: State-of-the-Art BIM-Enabled Facility Management. Journal of Construction Engineering and Management, 143(9). https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001376

Royal Institution of Chartered Surveyors. (2015). International BIM implementation guide: RICS guidance note, global. (1a ed.) Royal Institution of Chartered Surveyors. https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/standards/international_bim_implementation_guide_1st_edition_rics.pdf

Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., Hunt, W. D. (2010). Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. United States Department of Energy. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19634.pdf

Velmurugan, R. S., Dhingra, T. (2015). Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: a conceptual framework. International Journal of Operations and Production Management, 35(12):1622–1661. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJOPM-01-2014-0028/full/html

Welsh, D., Batalla-Martínez, S. (2023). Framework for usage potential for Digital Procurement in the Construction Industry: Digital Procurement in Construction Projects Potential for more transparent and effective procurement of maintenance and installation services in the construction industry. ICCTA 2023, May 10-12:128-136. https://doi.org/10.1145/3605423.3605438

Zhou, Y., Yang, Y., Yang, J.-B. (2019). Barriers to BIM implementation strategies in China. Engineering, Construction and Architectural Management, 26(3):554-574. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-04-2018-0158/full/pdf

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO COMPARATIVO DO PREÇO ENTRE LAJES MACIÇAS E LAJES ALIGEIRADAS, DE VIGOTAS PRÉ-ESFORÇADAS, NA CIDADE DE TETE, MOÇAMBIQUE

Bruno Miguel Lea Bene[ab]; José Francisco Rufino Diogo[bc]

[a]ISPT-Instituto Superior Politécnico de Tete, Cidadela Académica, Estrada Nacional N.º7, km 1, Bairro Matundo, Moçambique), website: www.ispt.ac.mz, e-mail: lea79bene@gmail.com

[b]ISAEN-Instituto Superior de Altos Estudos e Negócios, Universidade Politécnica – A Politécnica, Moçambique, Avenida Paulo Samuel Kankhomba, nº 879, Maputo, Mocambique, website: www.apolitecnica.ac.mz

[b]Aeroportos de Moçambique, e-mail: Jose.diogo@aeroportos.co.mz

RESUMO

As lajes são elementos laminares, em que a sua espessura é muito pequena em relação as outras dimensões, as quais têm um consumo correspondente a 50 % do total de betão consumido na edificação. A pesquisa surge pelo facto de na cidade de Tete registrar se nos anos 2019 e 2020 uma tendência de construção de edifícios com lajes aligeiradas e inserção de fornecedores de abobadilhas e vigotas pré-esforçadas. Visto que a economia é um fator importante na escolha do tipo de material viu se necessário avaliar a solução economicamente viável entre a Construção de Lajes Maciças e Lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas, no ano 2021. Para tal o projeto de 3 pisos e terraço acessível serviu para estudo das duas situações de laje, donde conclui se que a laje aligeirada representa 68,53 % do preço de venda laje maciça, isto é 5.598,11 Mt (cinco Mil, quinhentos noventa e oito Meticais e onze centavos) equivalente a 77,41 Euros, o que a torna economicamente viável quando comparada ao preço de 8.169,12 Mt (oito mil cento sessenta e nove Meticais e doze centavos) equivalente a 112,96 Euros de construção de metro quadrado de laje maciça.

Palavras-chave: Preço, laje maciça, laje aligeirada, economicamente viável

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, verifica se uma tendência de crescimento de construção com recurso a lajes aligeiradas na cidade de Tete, visto que a fase de projeção é essencial para a especificação do tipo de cobertura, modo de execução partindo da necessidade do dono em ter um projeto que garanta boa qualidade e custos acessíveis. Urge a necessidade de saber até que ponto as lajes em estudo são economicamente viáveis, uma em relação a outra.

O conhecimento dos custos diretos assim como dos indiretos na região influenciará positivamente, na escolha do tipo de laje a adotar para cobertura dos edifícios, em fim ter se a ferramenta chave de decisão económica quiçá contribuindo no aumento imobiliário da Cidade de Tete.

É sabido que a tendência dos utentes da industria da construção civil é optar em soluções construtivas adotadas por outrem sem sequer maior parte das vezes preocupar se em saber se existem outras opções mais vantajosas. Os profissionais de construção civil representam um papel importante neste processo visto dotar se de ferramentas que auxiliam na tomada de decisão tendo em conta o equilíbrio entre a técnica e a economia, sendo que em termos económicos levam-nos a seguinte questão por exemplo: ***Será que o preço de construção de lajes maciças é inferior ao preço de construção de lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas?***

Dai a pertinência do tema escolhido ***"Estudo Comparativo Do Preço Entre Lajes Maciças E Lajes Aligeiradas, De Vigotas Pré-Esforçadas, Na Cidade De Tete, Moçambique".*** A escolha tema referido acima, deveu–se ao fato de nos 2019 e 2020 ter observado uma tendência de construções com recurso ao uso de lajes aligeiradas, assim como o fabrico e fornecimento de abobadilhas e vigotas no mercado interno.

O tema escolhido contribuirá na identificação da solução económica mais viável entre optar no uso de lajes maciças ou lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas, contribuindo deste modo numa informação fundamental quer para os projetistas quer para os donos de obra para a tomada de decisão do tipo de cobertura ou piso a adotar tendo em conta o principio de equilíbrio entre a técnica e a economia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 LAJES

Brandalise e Wessling (2015:96) constataram no trabalho de fim de curso que ao levar em conta apenas o fator do custo, ao se realizar uma obra de pequeno a médio vulto, como edifícios de até quatro andares no município de Pato Branco, no estado do Paraná, apenas na parcela da obra que se refere a lajes, a laje maciça simples é 25,29% mais onerosa do que laje de vigotas pré-fabricadas treliçadas.

Nappi (1993:76) concluiu em sua dissertação que as Lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas, além de mais econômica é a mais prática para as construções unifamiliares. O pouco tempo necessário para a sua execução, aliado ao baixo consumo de cofragens e escoramento, torna a obra mais limpa, facilitando os deslocamentos por seu interior. O baixo consumo de aço e betão também são aspetos positivos.

Araújo & Caldeira constataram em seu artigo (Estudo Comparativo Da Viabilidade Econômica Entre Laje Maciça E Laje Treliçada) que ao levar apenas os fatos dos custos, ao se realizar obras com as dimensões padrões do estudo, no município de Palmeirópolis, no estado de Tocantins, apenas na

parcela da obra que se refere a lajes, os vãos de lajes treliçadas baseadas na planilha SINAPI apresentaram em média ser 35,36% mais rentáveis que as lajes maciças.

Caio (2014:72) através dos vãos adotados para lajes quadradas, analisou que até 4,50 m de vão entre pilares a laje nervurada treliçada apresentou maior custo total e a partir dos 4,50 m a laje maciça apresentou o maior custo global.

2.2 ESTRUTURA DOS CUSTOS

FARIA (2014:5) define estrutura de custos como a forma de organizar os custos das empresas de construção de forma a que os orçamentos possam refletir esses custos com maior rigor. A estrutura habitual é a seguinte:

i. Custos diretos – Tudo o que é diretamente imputável às obras e em particular às respetivas tarefas (tijolos, pedreiro, carpinteiro, equipamentos ...).
ii. Custos indiretos – Custos associados à vida da empresa e que não são diretamente imputáveis às obras (salários de pessoal do escritório, administração, custos com a sede, ...).
iii. Custos de estaleiro – Custos imputáveis a uma dada obra particular mas que não podem ser imputadas às tarefas do orçamento (eletricidade, água, aluguer de barracos, salários de pessoal de chefia, vedações, vias de comunicação provisórias, equipamentos não imputados aos custos diretos, ...)

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 DADOS

3.1.1 Plantas de Arquitetura

O projeto usado para o estudo é referente a Construção dum edifício misto de 2 andares, destinada a escritório e habitação (construção é de três pisos e um terraço acessível), cujas plantas de piso têm a seguinte descrição:

i. Rés do Chão - Estacionamento e área de serviços com 158,59 m² de área.
ii. 1º Andar – Escritórios com 143,59 m² de área.
iii. 2º Andar – Flat tipo 3 com 141,61 m² de área.

3.1.2 Preço dos Materiais

Para a construção duma laje em betão armado deve se antes preparar a cofragem e para o efeito usam se os materiais apresentados tabela 1.

Tabela 1 – Preço de Materiais para Cofragem

Item	Designação	Unidade	Preço (Mt)
1.0	Barrotes de 5x15cm	un	1.560,00
2.0	Pregos de 4"	kg	120,00
3.0	Pregos de aço 4"	kg	350,00
4.0	Placas de madeira prensada de 25 mm de espessura	un	3.250,00
5.0	Estacas	un	350,00

Fonte: Construa, (2021)

Tabela 2 – Preço de Materiais para armação

Item	Designação	Un.	Preço (Mt)	Un.	Preço (Mt)	Un.	Preço (Mt)/kg
1.0	Malhasol	m²	230,00	m²	23,00	kg	103,59
2.0	Arrame queimado	kg	120,00	kg	120,00	kg	120,00
3.0	Varão de 6 mm de diâmetro	un	135,00	ml	23,28	kg	104,85
4.0	Varão de 8 mm de diâmetro	un	215,00	ml	37,07	kg	93,85
5.0	Varão de 10 mm de diâmetro	un	315,00	ml	54,31	kg	88,02
6.0	Varão de 12 mm de diâmetro	un	425,00	ml	73,28	kg	82,52
7.0	Varão de 16 mm de diâmetro	un	700,00	ml	120,69	kg	76,48

Fonte: Lucky, (2021)

Para o fabrico do betão foi definido o Cimento Portland Normal de 32,5N, cujo o preço médio no mercado interno é de 510,00 Mt (quinhentos e dez Meticais). Quanto aos inertes considerou se:

i. A Sintrapel que fornece areia do rio ao preço de 536,25 Mt (quinhentos trinta e cinco Meticais, vinte e cinco Centavos), e

ii. A pedreira RIBEMOZ (2021) que fornece a brita ¾" ao preço de 2.205,00 Mt (dois mil, duzentos e e cinco Meticais).

3.1.3 Mão-de-obra

Os salários que se tomou como base são os apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Salário Médio Mensal

Item	Designação	Unidade	Salário Médio (Mt)	Vencimento Horario (Mt)
1.0	Pedreiro	Mensal	20.990,00	100,91
2.0	Carpinteiro	Mensal	27.533,00	132,37
3.0	Ferreiro	Mensal	16.356,00	78,63
4.0	Ajudante	Mensal	14.653,00	70,45

Fonte: WageIndicator, (2021)

As tabelas seguintes apresentam o rendimento de mão-de-obra de acordo com BRANCO (1993)

Tabela 4 – Rendimento de mão-de-obra para cofragem de lajes

COFRAGEM TRADICIONAL CORRENTE - até 5ª utilização	**unidade**	**quantidade/m²**	
		laje maciça	**aligeirada**
Carpinteiro (70%)	Hxh	1,75	0,385
Ajudadente (30%)	Hxh	0,75	0,165
Total	**Hxh**	**2,50**	**0,55**

Tabela 5 – Rendimento de mão-de-obra para armadura de lajes

ARMADURA (Corte e Dobragem)	**unidade**	**quantidade/10kg (+30%)**		**quantidade/kg**	
		laje maciça	**laje aligeirada**	**laje maciça**	**laje aligeirada**
Ø 6 mm	Hxh	0,5382		0,05382	
Ø 8 mm	Hxh	0,4615	0,4095	0,04615	0,04095
Ø 10 mm	Hxh	0,4095	0,4030	0,04095	0,0403
Ø 12 mm	Hxh	0,3679	0,3705	0,03679	0,03705
Ø 16 mm	Hxh		0,3445		0,03445
Sub soma 01	***Hxh***	***1,78***	***1,53***	***0,18***	***0,15***
ARMADURA (armação e aplicação)	**unidade**	**quantidade/10kg**		**quantidade/kg**	
		laje maciça	**laje aligeirada**	**laje maciça**	**laje aligeirada**
Malhasol	Hxh		0,355		0,0355
Ø 6 mm	Hxh	0,416		0,0416	
Ø 8 mm	Hxh	0,400	0,400	0,0400	0,0400
Ø 10 mm	Hxh	0,395	0,395	0,0395	0,0395
Ø 12 mm	Hxh	0,369	0,369	0,0369	0,0369
Ø 16 mm	Hxh		0,354		0,0354
Sub soma 02	***Hxh***	***1,58***	***1,52***	***0,16***	***0,15***
Soma		**3,36**	**3,05**	**0,34**	**0,30**

Tabela 6 – Rendimento de mão-de-obra para betonagem de laje maciça

Betão	**unidade**	**quantidade/m³**
Produção	*Hxh*	2,73
Colocação no local de aplicação (a braço) - Horizontal (20 m)	Hxh	3,38
Colocação no local de aplicação (a braço) - Vertical (15 m)	Hxh	0,67
Aplicação em obra - Pedreiro (33%)	Hxh	0,413
Aplicação em obra - Ajudante (67%)	Hxh	0,838
Rega - Ajudante	Hxh	1,000
Soma	**Hxh**	**9,03**

Para a recolha de dados referente a mão-de-obra para produção de betão considera se uma obra em que a execução e transporte de betão é por meios próprios, o sistema de amassadura por betoneira com tremonha, sendo que o betão é composto por 1 (um) aglomerante e mais 2 (dois) inertes.

A aplicação do betão em obra compreende as operações de: regar e limpar as cofragens, calçar as armaduras, espalhar e compactar o betão.

Tabela 7 – Rendimento de mão-de-obra para betonagem de laje aligeirada

Betão	**unidade**	**quantidade/m³**
Produção	*Hxh*	2,73
Colocação no local de aplicação (a braço) - Horizontal (20 m)	Hxh	3,38
Colocação no local de aplicação (a braço) - Vertical (15 m)	Hxh	0,67
Aplicação em obra - Pedreiro (33%)	Hxh	0,462
Aplicação em obra - Ajudante (67%)	Hxh	0,938
Rega - Ajudante	Hxh	1,000
Soma	**Hxh**	**9,18**

A mão-de-obra para aplicação em obra de vigotas e abobadilhas, para vãos correntes de 4,4 a 6,6 metros, correspondente aos painéis maiores de laje em estudo.

Tabela 8 – Rendimento de mão-de-obra para pré-fabricados de laje aligeirada

Pré-Fabricado	**unidade**	**quantidade/m²**
1 - Vigotas		
Pedreiro (20%)	Hxh	0,12
Ajudante (80%)	Hxh	0,46
2- Abobadilhas		
Pedreiro (20%)	Hxh	0,05
Ajudante (80%)	Hxh	0,18
Soma	**Hxh**	**0,81**

3.1.4 Equipamentos

A presente pesquisa tomou como base os equipamentos apresentados na tabela 9:

Tabela 9 – Equipamentos para fabrico e vibração do betão

Equipamento	**Betoneira**	**Vibrador de betão**
Fonte de energia	diesel	diesel
Motor (cv)	3,0	5,0
Valor de Aquisição (Mt)	225.000,00	78.600,00
Valor residual (Mt)	22.500,00	7.860,00
Vida útil (horas por ano)	2.000	1.250
Coeficiente de custo de manutenção (K)	0,50	1,00
Produção (m³/h)	3,4	

3.2 MÉTODOS

A pesquisa adotada foi correlacionar, pois pretendia se através dela determinar a relação entre os preços de construção de lajes maciças e lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas, para além da

descritiva transversal pelo facto de ter se estudado o custo dos dois tipos de laje em estudo em função dos custos dos materiais vigentes, com enfoque no conhecimento empírico e uma abordagem sintético – dedutivo.

O Paradigma definido para esta pesquisa foi positivista ou quantitativo, optando se para além das variáveis quantitativas discreta, por exemplo ao exprimir o número de pedreiros, entre outros trabalhadores disponíveis e/ou propostos, o uso das variáveis quantitativas contínuas consistiu no uso das tabelas de rendimento de mão-de-obra para determinar a produção homem x hora/ unidade de trabalho.

3.2.1 Procedimentos

Para determinar a mão-de-obra por atividade em função do rendimento de mão-de-obra, tomou se como base as plantas de pormenor das lajes donde depois de obtidas as quantidades de serviços por lista do artigo, foram quantificados os materiais, produzindo se os respetivos mapas.

Quanto ao Rendimento de mão-de-obra assim como de materiais, os mesmos foram obtidos por consulta às Tabelas de Rendimentos de Mão-de-obra, Materiais e Equipamento em Edificação e Obras Públicas de BRANCO (1993).

Na composição de custos diretos, referentes a mão de obra, foi necessário primeiro pesquisar o salário médio praticado na industria de construção civil, na região de estudo, para além dos encargos correspondentes a cada carreira profissional, o que possibilitou no cálculo do custo da mão de obra de cada operário multiplicando o seu rendimento pelo salário do operário incluindo os encargos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUANTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Lajes maciças

Os materiais quantificados de lajes maciças estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 10 – Quantidade para lajes maciças

Item	Designação	Unidade	Quantidade	Quantidade (kg)
1.0	Betão simples	m³	68,84	-
2.0	Cofragem	m²	498,64	-
3.0	Armadura:			
3.1	Ø 6 mm	ml	4.037,50	896,33
3.2	Ø 8 mm	ml	9.058,10	3.577,95
3.3	Ø 10 mm	ml	1.157,20	713,99
3.4	Ø 12 mm	ml	272.60	242,07
3.5	Arrame queimado	Kg	140,42	-

Para as quantidades acima foi considerado como altura média da laje 13 cm e área de construção da laje correspondente a 436,51 m², medida esta obtida das plantas de piso e cobertura das lajes dimensionadas.

4.1.2 Lajes aligeiradas, de vigotas pré-esforçadas

Para as quantidades abaixo foi considerado como altura média da laje 16,5 cm, 5 cm da camada de compressão e, área de construção da laje correspondente a 436,51 m², medida esta obtida das plantas de piso e cobertura das lajes dimensionadas.

Tabela 11 – Quantidade para lajes aligeiradas

Item	Designação	Unidade	Quantidade
1.0	Vigotas	ml	1.396,85
2.0	Abobadilhas 33x12x20 (cm)	un	5.752,00
3.0	Betão simples	m³	47,13
4.0	Cofragem	m²	123,22
5.0	Armdura:		
5.1	Ø 8 mm	ml	547,80
5.2	Ø 10 mm	ml	382,32
5.3	Ø 12 mm	ml	273,73
5.4	Ø 16 mm	ml	24,53
5.5	Malhasol	m²	123,22
6.0	Arrame queimado	Kg	27,02

4.2 CONSUMO DE MATERIAIS

Da figura 1 verifica se que a laje maciça consome 498,64 m² de cofragem enquanto a laje aligeirada tem um consumo de 123,22 m² de cofragem, correspondente a 24,71% do consumo da laje maciça e 39,63 % do consumo médio.

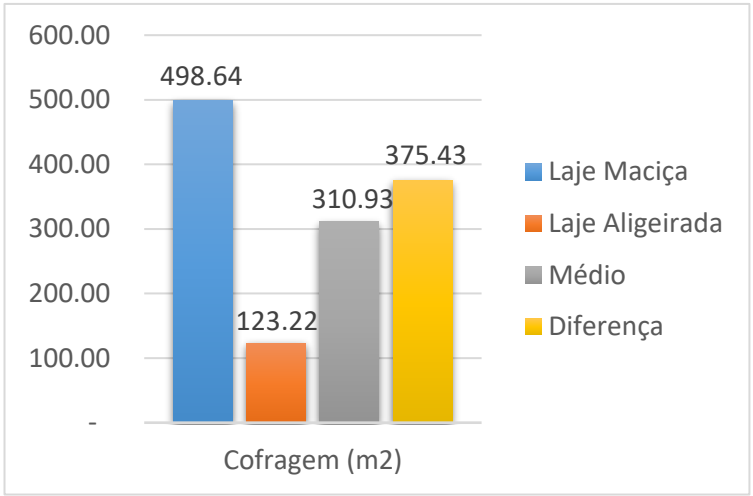


Figura 1 – Consumo de Cofragem

A figura 2 apresenta o consumo de armadura por metro quadrado de laje construída, donde verifica se que a laje aligeirada, de vigotas pré-esforçada tem um consumo de 2,09 kg/m² de amadura, considerado baixo, pois, correspondente a 16,38% do consumo por área de laje maciça que consome 12,76 kg de armadura por metro quadrado.

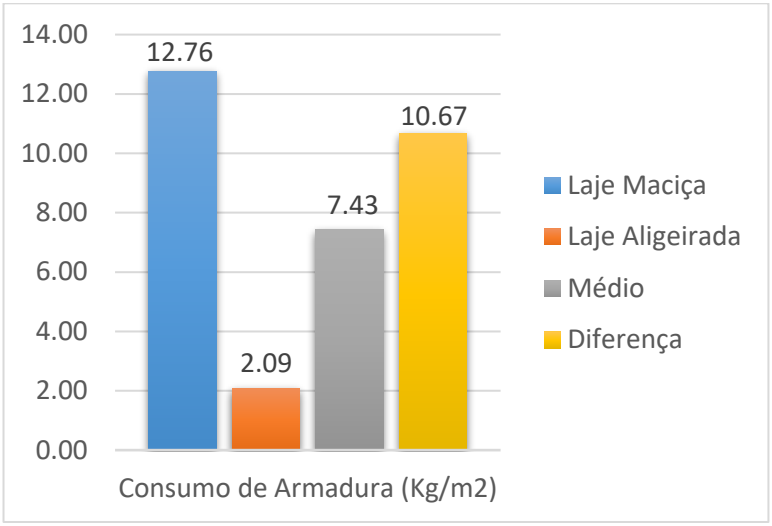


Figura 2 – Consumo de Armadura por m² de laje

No que concerne ao consumo de betão simples por m² de laje, considerou se para o efeito alturas médias de lajes iguais a 13 cm e 16,5 cm para as lajes maciças e aligeiradas, com vigotas pré-esforçadas, respetivamente. Para laje aligeirada a altura média da zona de compressão é de 4,5 cm.

Foi possível observar da figura 3 que o consumo de betão em lajes maciças por metro quadrado de construção (0,16 m³/m²) é maior que o consumo do mesmo material em lajes aligeiradas (0,11 m³/m²), sendo o consumo médio de betão igual a 0,13 m³/m². A laje aligeirada consome 68,75% do que consome a laje maciça. A diferença de consumo entre as lajes em estudo é de 0,05 m³ de betão simples por m² de laje.

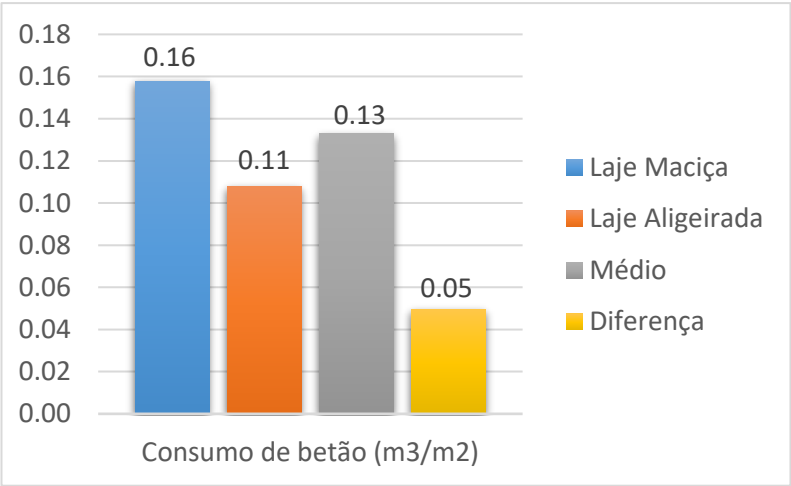


Figura 3 – Consumo de Betão Simples por m² de laje

4.3 CONSUMO DE MÃO-DE-OBRA

A figura 4 apresenta o consumo de mão-de-obra por metro quadrado de laje construído, donde verifica se que a laje aligeirada, de vigotas pré-esforçada tem um consumo de mão-de-obra de 2,45 Hxh/m², correspondente a correspondente a 30,10% do consumo por área de laje maciça que consome 8,14 Hxh/m² de mão-de-obra por metro quadrado.

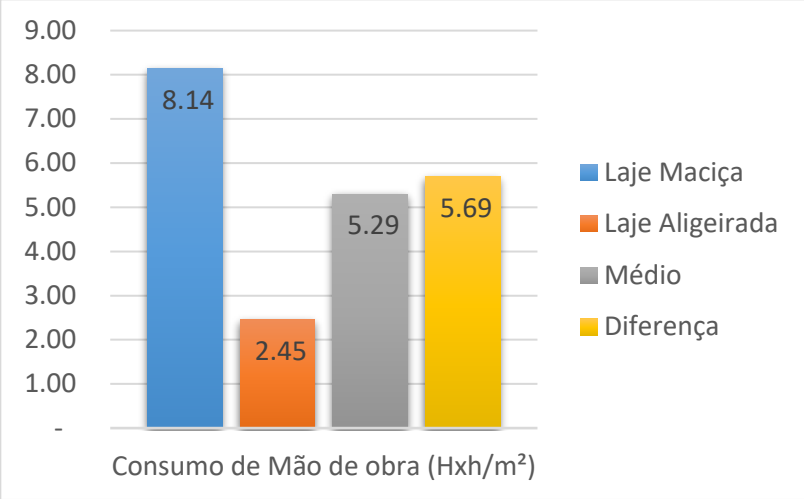


Figura 4 – Consumo de mão-de-obra por m² de construção

4.4 PREÇO DE VENDA

A determinação do preço de venda ou de construção de m² das lajes em estudo, passa necessariamente por determinar os custos diretos e o Beneficio e Despesas Indiretas (BDI). Da tabela 12 verifica se que tendo em conta a localização da área de estudo, levou a considerar os impostos municipais para além dos impostos Nacionais e verificou se que o BDI para área de estudo é de 68,13%.

Tabela 12 – Cálculo do Beneficio e Despesas Indiretas (BDI)

Item	Descriminação	Taxa (%)
1.0	Administração Central (i)	10,00
2.0	Taxa de Risco (r)	1,00
3.0	Despesa Financeira (f)	2,00
4.0	Taxa de Comercialização	2,00
5.0	Impostos do Estado	
5.1	IVA (t)	17,00
5.3	IRPC [1]	32,00
6.0	Impostos do Municipio	
6.1	IPRA (s)	0,40
7.0	Lucro (l)	10,00
Cálculo do BDI		**68,13**

Nas tabelas 13 e 14, verifica se que em termos de preço de venda a construção de metro quadrado de laje aligeirada é economicamente viável quando comparada a laje maciça, isto é, a laje aligeirada é 68,53 % do preço de venda laje maciça pois, ela tem o preço de 5.598,11 Mt (cinco Mil, quinhentos noventa e oito Meticais e onze centavos) contra 8.169,12 Mt (oito mil cento sessenta e nove Meticais e doze centavos) de laje maciça.

[1] O Imposto sobre Rendimento de Pessoas Colectivas incide sobre os lucros

Tabela 13 – Preço de Venda em laje maciça

RECURSO	QUANTIDADE	CUSTO TOTAL (Mt)	%
Materiais		4.127,85	50,53
Mão de obra		723,68	8,86
Equipamentos		7,17	0,09
Total Custo Direto		**4.858,71**	**59,48**
BDI - Beneficio e Despesas Indiretas	*68,13%*	*3.310,41*	*40,52*
PREÇO DE VENDA		**8.169,12**	**100,00**

Tabela 14 – Preço de Venda em laje aligeirada

RECURSO	QUANTIDADE	CUSTO TOTAL (Mt)	%
Materiais		3.064,69	54,75
Mão de obra		251,47	4,49
Equipamentos		13,41	0,24
Total Custo Direto		**3.329,56**	59,48
BDI - Beneficio e Despesas Indiretas	*68,13%*	*2.268,55*	*40,52*
PREÇO DE VENDA		**5.598,11**	**100,00**

5 CONCLUSÕES

No final da análise e discussão de dados chegou se as seguintes conclusões:

- A laje aligeirada, de vigotas pré-esforçadas consome 24,71% da cofragem que a laje maciça consome.

- A laje aligeirada, de vigotas pré-esforçada tem um consumo baixo de amadura, cerca de 2,09 kg/m², correspondente a 16,38% do consumo de armadura por área de laje maciça que consome 12,76 kg de armadura por metro quadrado.

- O consumo de betão em lajes maciças (com espessura média de 13cm) é de 0,16 m³/m² de laje, sendo maior que o consumo do mesmo material em lajes aligeiradas (com espessura média da laje e de compressão iguais a 16,5 cm e 4,5 cm respetivamente) é de 0,11 m³/m² de laje, correspondente a 68,75% do que consome a laje maciça.

- Considerando o projeto de estudo, para a construção de metro quadrado de laje são necessários 2,45 Hxh/m² para a laje aligeirada, o qual considera se um consumo baixo, cerca de 30,10% do consumo por área de laje maciça que consome 8,14 Hxh/m² de mão-de-obra por metro quadrado.

- a laje aligeirada é 68,53 % do preço de venda laje maciça, pois tem o preço de venda igual a 5.598,11 Mt (cinco Mil, quinhentos noventa e oito Meticais e onze centavos) equivalente a 77,41 Euros, o que a torna economicamente viável quando comparada ao preço de construção de metro quadrado de laje maciça com o preço de 8.169,12 Mt (oito mil cento sessenta e nove Meticais e doze centavos) equivalente a 112,96 Euros.

Ciente que a escolha de do tipo de laje é matéria de elevada importância na indústria de construção recomenda se que:

- Sejam realizados estudos similares em outras cidades e/ou conselhos autárquicos por forma a que se tenha uma informação a nível provincial e nacional.

- Os profissionais da indústria de construção civil apresentem de forma regular soluções construtivas que garantam além da segurança estrutural e estética, a economia de construção pois deste modo contribuir se a positivamente na divulgação e clareza na solução adotada.

- Os profissionais de construção civil sujeitos a pagamentos de impostos e em atividades localizadas na área de estudo que tomem como base de Benefícios e Despesas Indiretas o equivalente à 68,13 % por forma a garantir a sustentabilidade económica garantindo deste modo a conclusão de atividades em que esteja envolvido e cumprindo com todos os deveres tributários.

REFERÊNCIAS

Araújo, V. G., Caldeira, M. V. M. Estudo Comparativo Da Viabilidade Econômica Entre Laje Maciça E Laje Treliçada. Consultado em https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_vitor_goncalves_araujo_atual.pdf.

BRANCO, J. P. Rendimentos de Mão-de-obra, Materiais e Equipamento em Edificação e Obras Públicas (tabelas): 1ª Edição. Queluz: COOPTÉCNICA/EPGE, 1993.

Brandalise, G. M., Wessling, L. I. (2015). Estudo Comparativo De Custo Entre Laje Maciça Simples E Laje De Vigotas Pré-Fabricadas Treliçadas Em Edifícios De Até Quatro Pavimentos No Município De Pato Branco, Paraná, Brasil (Trabalho De Conclusão De Curso). Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco.

Caio, P. (2014). Análise Comparativa Entre Sistemas Estruturais De Lajes Maciças E Nervuradas Treliçadas (Trabalho de Conclusão de Curso). Centro Universitário Univates, Lajeado.

CAIO, P. (2014). Análise Comparativa Entre Sistemas Estruturais De Lajes Maciças E Nervuradas Treliçadas (Trabalho de Conclusão de Curso). Centro Universitário Univates, Lajeado.

Decreto-Lei n.º 235/83 (1983). Regulamento de Segurança e Ações para estruturas de Edifícios e Pontes: 4ª Edição. Porto Editora.

Decreto-Lei n.º 349-C/83 (1983). Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado. Porto Editora.

FARIA, J. A. (2014). Noções Elementares Sobre Orçamentos De Obras De Construção Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Gomes, A. & Vinagre, J. (1997). Estruturas De Betão I (Tabelas de Cálculo). Instituto Superior Técnico.

NAPPI, S. C. B. (1993). Análise Comparativa Entre Lajes Maciças, Com Vigotes Pré-Moldados e Nervuradas (Dissertação). Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.

WageIndicator, (2021). Compare seu Salário. Consultado em https://meusalario.org/mocambique/salario/salarycheck.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTOS DO "EFEITO PÊNDULO" NAS LICITAÇÕES DE OBRAS PÚBLICAS: CASOS DO BRASIL, ESPANHA E PORTUGAL

Caroline Bettini Frison[1]; Denis Bertazzo Watashi[2]; Fernanda Fernandes Marchiori[3]; Antonio Lara Galera[4]; Hipólito Sousa[5]; Diego Calvetti[6]; Jorge Teixeira[7]

[1] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, caroline.frison@posgrad.ufsc.br

[2] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, denis.watashi@ufsc.br

[3] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, fernanda.marchiori@ufsc.br

[4] Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Calle del Profesor Aranguren, 3, Torre 3ª Planta, 28040, Madrid, Espanha, antoniolorenzo.lara@upm.es

[5]CONSTRUCT/Gequaltec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal, hipolito@fe.up.pt

[6]CONSTRUCT/Gequaltec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal, diegocalvetti@fe.up.pt

[7]ICS/CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, jalt@fe.up.pt

RESUMO

O presente estudo tem como foco a gestão orçamentária de obras públicas em três países: Brasil, Espanha e Portugal. Mais especificamente serão abordados como os desvios de custo que refletem as questões orçamentárias distintas nas obras desses três países. O fenômeno do “efeito pêndulo” é conhecido por manifestar a discrepância entre o preço inicial da contratação e o valor final após a conclusão do objeto do contrato, influenciado por sucessivos aditivos contratuais que tendem a anular descontos concedidos pelo contratante, tornando-o assim um beneficiário da máquina pública. Portanto, o objetivo desta pesquisa é analisar e comparar os desvios de custo, com foco na identificação dos impactos do efeito pêndulo. Para isso, através do estudo documental de licitações de obras já concluídas, foram analisados dados de 49 obras de escolas de educação infantil no Brasil, 1.282 contratos de obras públicas em Portugal e dados de 30.131 obras civis novas, e 23.211 obras de construção novas da administração espanhola. Destacou-se os benefícios e desafios inerentes a cada abordagem na gestão eficiente de recursos em projetos públicos. Estudos deste tipo são necessários para que se possa levantar boas práticas das licitações de cada país, servindo como recomendação para o aprimoramento dos processos licitatórios dos mesmos.

Palavras-chave: Licitações; Obras públicas; Gestão orçamentária; Efeito pêndulo; Sabedoria das multidões.

1 INTRODUÇÃO

O setor público é responsável por uma parcela significativa dos projetos de infraestrutura (Sarmento; Renneboog, 2017), os quais possuem relevância social e econômica, principalmente em países emergentes (Afonso; Rodrigues, 2023). Para a execução de obras no setor público os governos utilizam o processo de licitação para contratação de empresas responsáveis pela execução. A regulamentação desse processo no Brasil ocorre por meio da Lei nº 14.133, de 01 de abril de 2021, na Espanha temos a *Ley 9/2017, de 08 de noviembre* e em Portugal o Decreto-Lei nº 18/2008, de 29 de janeiro.

As várias entidades da administração pública vêm buscando aprimorar o processo de contratação, a exemplo, Portugal foi pioneiro na adoção de processos de contratação pública digitais (Mêda; Sousa; Moreira, 2015) com a adoção em 2008 do então novo Código dos Contratos Públicos (CCP). No Brasil a nova legislação para contratações públicas, a Lei nº 14.133/2021, entrou em vigor em 2024 e tem como objetivo tornar as licitações menos burocráticas, melhor planejadas e mais eficazes (Goldberg, 2022; Oliveira *et al.*, 2022; Rodrigues, 2022). A atual *Ley 9/2017* justifica-se pela necessidade de incorporar no ordenamento jurídico espanhol as diretivas do Parlamento Europeu e do Conselho relativas aos procedimentos de adjudicação de contratos públicos de obras, fornecimentos e serviços (especialmente a Diretiva 2014/23/UE sobre contratos públicos). Os objetivos que inspiram este regulamento são uma maior transparência na contratação pública e uma melhor relação qualidade-preço, além de uma simplificação dos processos de contratação (Uría, 2017).

Apesar de tais perspectivas inovadoras, continua sendo comumente utilizado o método de seleção de proposta de menor valor (Awwad; Ammoury, 2019; Dias, 2021; El-Sayegh *et al.*, 2021). Esse critério de seleção das propostas pode resultar na chamada “maldição do vencedor”, na qual a empresa vence a licitação com propostas com preços excepcionalmente baixos enfrentando desafios durante a execução do contrato (Signor *et al.*, 2020; Thaler, 1988), principalmente relacionados à gestão orçamentária.

Devido ao considerável volume de recursos públicos investidos nessas construções, e as especificidades das licitações, há uma grande preocupação com o desempenho desses projetos (Love *et al.*, 2022), incluindo possíveis desvios de custo (Giat; Mitelman, 2023; Catalão; Cruz; Sarmento, 2019; Sarmento; Renneboog, 2017).

Os desvios de custos estão relacionados com a estimativa preliminar da construção e o custo final do projeto, podem ser menores que o planejado, mas em sua maioria estão relacionados à superação dos custos iniciais (Adafin; Rotimi; Wilkinson, 2015; Cavalieri; Cristaudo; Guccio, 2019). Sarmento e Renneboog (2017) demonstraram que os desvios de custos, em projetos de infraestrutura em Portugal, chegam a uma média de 24%, já Adafin, Rotimi e Wilkinson (2015) demonstraram que pode haver uma variabilidade de cerca de -14% a +16% em projetos de construção na Nova Zelândia.

O estudo da “maldição do vencedor” e da superação dos custos em obras públicas tem sido realizado separadamente, no entanto, a relação entre os dois fenômenos pode resultar no que é conhecido como “efeito pêndulo”, conforme Figura 1. Nesse sentido, as empresas tendem a transformar a maldição em uma vantagem por meio de sucessivos aditivos que aumentam o custo final do projeto (Giat; Mitelman, 2023; Love *et al.*, 2019).

Figura 1 - Relação entre a maldição do vencedor e a superação de custos

No presente artigo, para analisar os desvios de custo e questões orçamentárias em três países diferentes, avaliou-se a existência, ou não, de fenômenos como o efeito pêndulo e as relações entre descontos nas licitações e o cenário econômico do país. Para atingir tal objetivo foram estudadas 49 obras de escolas de educação infantil no Brasil, 1.282 contratos de obras públicas em Portugal e dados de 30.131 obras civis novas, e 23.211 obras de construção novas da administração espanhola, conforme método explicitado no tópico 2 a seguir.

2 DADOS E MÉTODOS

Cada um dos países-alvo do estudo possuem o seu próprio enquadramento, quer do processo de licitação quer da disponibilização de bancos de dados de obras. Na Figura 2 são apresentadas as etapas do método utilizado no estudo.

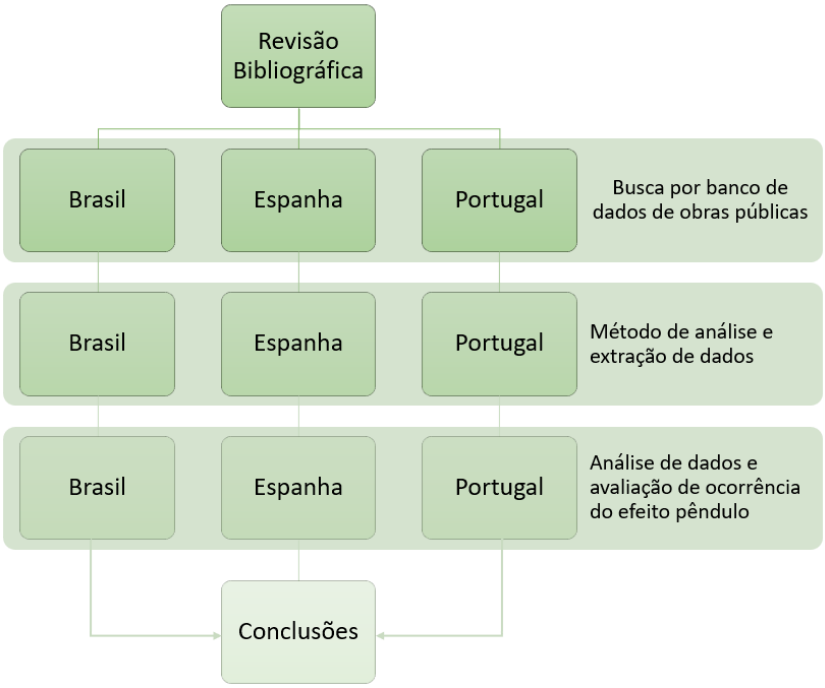


Figura 2 - Metodologia do estudo

Para a análise da hipótese deste artigo, foram coletados dados de obras públicas em três países: Brasil, Espanha e Portugal, os quais estão detalhados e classificados por tipologia conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das obras que compõem a amostra

País	Quantidade	Tipologia das obras	Ano base
Brasil	49	Construção de Escolas de Educação Infantil	Início da execução entre 2007 e 2012
Espanha	53.342	Obras civis novas e de construção da administração espanhola	2007 a 2023
Portugal	1.282	Empreitadas de obras sujeitas a concurso público	Conclusão da execução em 2023

Assim, as obras selecionadas serão examinadas com relação aos desvios de custos e particularidades que retratam as questões orçamentárias próprias desses países, além de identificar fenômenos que possivelmente podem ter ocorrido. A seguir será detalhada a busca por banco de dados de obras públicas, bem como a metodologia de análise e extração de dados.

2.1 OBRAS DO BRASIL

Os dados das obras do Brasil foram obtidos através do Sistema Integrado de Monitoramento Execução e Controle (SIMEC) que é um painel de gestão das obras do Ministério da Educação (MEC). Esse sistema apresenta dados desde obras de Escolas de Educação Infantil (EEI) até as obras das Universidades Federais (UFs), e funciona como parte das ações de transparência na aplicação dos recursos públicos.

Para compor a amostra, foram selecionados os dados de obras de EEI que possuíam um projeto padrão e fazem parte do programa governamental intitulado "Proinfância". Todas as escolas foram construídas no estado de Santa Catarina, Brasil, e foram utilizadas para a geração do artigo de Signor *et al.* (2020). Os dados orçamentários das obras foram coletados seguindo os seguintes passos:

1. Acesso ao painel de obras do SIMEC[1]:
    a. Ícone de acesso à informação;
    b. Ícone do painel de obras públicas;
    c. Ícone do Estado em que a obra foi executada, neste caso, Estado de Santa Catarina;
    d. Selecionou-se as obras pelo número de identificação fornecido em Signor *et al*. (2020).

Para cada obra foram coletadas as seguintes variáveis:

- custo estimado do projeto (CE) que é fornecido pela administração pública no edital de licitação;
- custo da proposta vencedora (PV) que é o valor pelo qual a empresa vencedora do certame propõem-se a executar a obra;
- custo real do projeto (CR) que corresponde ao valor final da construção[2].

Levantaram-se as seguintes hipóteses no presente estudo:

[1] O painel é acessado pelo endereço eletrônico: https://simec.mec.gov.br/login.php. Acesso em: 29/04/2024.
[2] O custo real do projeto foi coletado no painel de obras públicas do SIMEC dentro das informações de execução financeira, ou seja, correspondem aos valores divulgados pela equipe administrativa do orgão que fiscalizou a obra.

- H_1: Há superação dos custos em obras públicas.
- H_2: Os custos estimados pela administração (CE) costumam ser superados.
- E H_3: A contratação de obras pelo critério de menor preço implica no "efeito pêndulo".

Assim, as hipóteses serão verificadas:

- H_1: CR > PV.
- H_2: CR > CE.
- E H_3: (CR/PV) > 1.

2.2 OBRAS DA ESPANHA

Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos da Plataforma Espanhola de Contratação do Setor Público entre os anos de 2007 e 2023. No total, foram consideradas 30.131 obras civis novas e 23.211 obras de construção novas. Estas obras têm sido promovidas pela administração central do estado, regional ou municipal.

A dimensão média das obras civis consideradas é igual a 2,78 M€ e o desconto médio na adjudicação é de 20,37%, atingindo um máximo de 31,61% em 2014. No que diz respeito às obras de construção, a dimensão média é igual a 1,75 M€ e o desconto médio na adjudicação é igual a 15,77%, atingindo um máximo de 24,08% em 2015. Na administração central do estado, os descontos em obras civis atingiram 35,33% em média em 2014 e em geral são obras de tamanho consideravelmente maior.

Sabe-se que o investimento na construção deverá ter um carácter anticíclico na economia, mas é, no entanto, marcadamente pró-cíclico. Este efeito é claramente percebido no mercado, pois em tempos de recessão há menor investimento público e maior concorrência, pelo que os descontos nos concursos aumentam consideravelmente, conduzindo ao efeito pêndulo.

Embora não exista muita evidência empírica do preço de liquidação final destes contratos, até à *Ley 9/2017*, que tornou mais rigorosas as condições para a sua modificação, na Espanha houve um efeito pêndulo acentuado, porque os descontos iniciais significativos foram recuperados ao longo do projeto baseado em sucessivas renegociações (aditivos) do contrato. Alonso *et. al.* (2023) estudaram 793 projetos de engenharia civil em Espanha entre 2016 e 2021, incluindo 440 casos com alterações nos custos e prazos planeados. Uma das conclusões obtidas é que existe uma correlação importante entre o preço do concurso e o custo final do projecto, verificando se que o desconto oferecido na licitação foi recuperado nas modificações do contrato.

2.3 OBRAS DE PORTUGAL

O Portal BASE "tem por função essencial centralizar a informação sobre os contratos públicos celebrados em Portugal, (…) permitindo assim o seu acompanhamento e monitorização" (Portal Base, 2024). No entanto, a própria entidade responsável pelo Portal BASE (Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I.P.) reconhece no último relatório da contratação pública em Portugal (IMPIC, 2023) que os dados estão afetados de várias vicissitudes, por exemplo, referindo que menos de 23% dos contratos de empreitadas tinham indicação do preço total efetivo – o real preço final da obra – e mesmo esses não apresentavam informação que permitisse claramente identificar a natureza desses sobrecustos, quando detetados. O Tribunal de Contas, entidade auditora, também teceu críticas e apresentou recomendações para maior transparência nos contratos públicos de empreitadas no seu último relatório (Tribunal de Contas, 2023), indicando "falta de controlo da fiabilidade da informação pública registada no Portal BASE".

Não obstante essas dificuldades, foi desenvolvida uma metodologia preliminar de recolha de dados a partir do Portal BASE:

1) Utilizar a Pesquisa Avançada com os critérios:
   a) Tipo de procedimento: Concurso público;
   b) Tipo de contrato: Empreitadas de obras públicas;
   c) Data do fecho: 2023-10-01 a 2023-12-31.
2) Exportar Resultados (para planilha CSV (Comma Separated Values)).
3) Repetir os passos 1 a 2, ajustando o passo 1.c. para os três trimestres anteriores de 2023.
4) Concatenar as quatro planilhas resultantes (removendo os cabeçalhos dos três ficheiros subsequentes), obtendo um só ficheiro para o ano de 2023.

A limitação a Concursos públicos e a partição por trimestres permite manter cada conjunto parcial de resultados abaixo de 500 registos, que é o limite de exportação do Portal BASE, totalizando um volume agregado de 1290 contratos públicos de empreitadas cujo fecho ocorreu em 2023 – um número suficientemente elevado para efetuar uma análise estatística preliminar e suficientemente baixo para permitir identificar manualmente e até corrigir alguns casos patológicos de informação inserida erradamente, que de outra forma iriam contaminar os resultados.

A metodologia de análise preliminar desenvolvida decorre da planilha CSV agregado anteriormente:

1) Remover os registros cuja Causa de Extinção do Contrato é diferente de Cumprimento integral do Contrato (6 registos excluídos, 1284 permanecem).
2) Identificar (preliminarmente) os registos cujo Preço Total Efetivo (preço final) diste mais de 50% do Preço Contratual (32 registos identificados), e:
   a) Inspecionar manualmente todos os dados públicos (incluindo documentação acessória) para identificar e se possível corrigir eventuais erros de introdução de preços, tipicamente com ordens de magnitude diferentes (17 registos corrigidos, 2 registos excluídos, 13 registos inalterados).
3) Criar histograma da diferença entre Preço Total Efetivo e Preço Contratual, em percentagem do Preço Contratual, considerando os intervalos da Figura 7 (1282 registos válidos).

Com esta análise pretende-se caracterizar a superação dos custos em concursos de empreitadas de obras públicas em Portugal, com base na informação oficialmente reportada no Portal BASE.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 OBRAS DO BRASIL

Foram obtidos os resultados para a análise das três hipóteses levantadas no item 2.1. Os resultados estão apresentados nas Figura 3 e Figura 4.

Para verificação das hipóteses foram aplicadas, aos dados coletados, as fórmulas que seguem:

$$CR > PV \quad (1)$$
$$CR > CE \quad (2)$$
$$(CR/PV) > 1 \quad (3)$$

Sendo:

- CE: Custo estimado do projeto;
- PV: Custo da proposta vencedora;

- CR: Custo real do projeto.

Dessa forma, através do cálculo da Fórmula 3 podemos chegar à discussão dos resultados:

I. Se (CR/PV) < 1, então o custo final da obra **foi menor** que o custo contratado.
II. Se (CR/PV) = 1, então o custo final da obra **foi igual** o custo contratado.
III. Se (CR/PV) > 1, então o custo final da obra **foi maior** que o custo contratado.

As Figuras 3 e 4 apresentam a análise dada acima por meio da escala da cor verde, da esquerda para a direita representando: (< 1), (= 1) e (> 1).

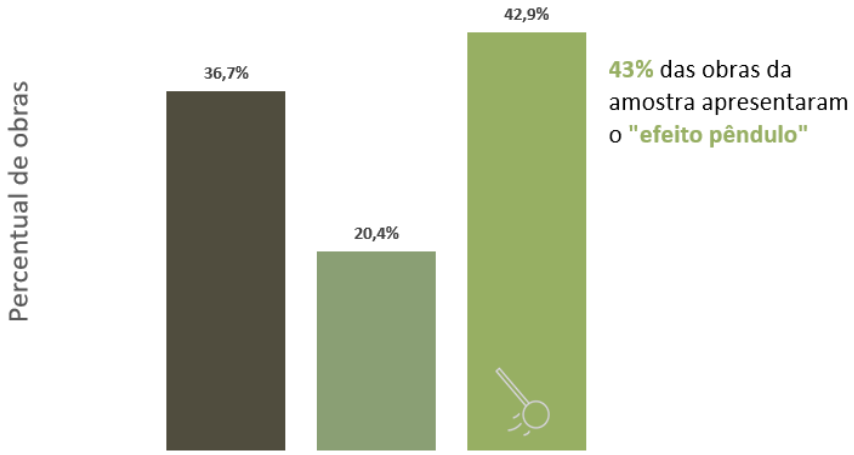


Figura 3 - Percentual relativo à relação entre custo contratado e custo final da obra

Os dados provenientes de obras brasileiras, embora constituam uma amostra relativamente reduzida, são integralmente compostos por um único conjunto de características permitindo uma análise estatística limitada. Contudo, constatou-se que 42,9% das obras examinadas manifestaram o fenômeno do efeito pêndulo, caracterizado por um aumento no custo inicialmente estimado. Apenas 20,4% das obras foram concluídas dentro dos limites orçamentários estabelecidos, enquanto 36,7% registraram um custo final inferior ao previsto no orçamento da proposta vencedora.

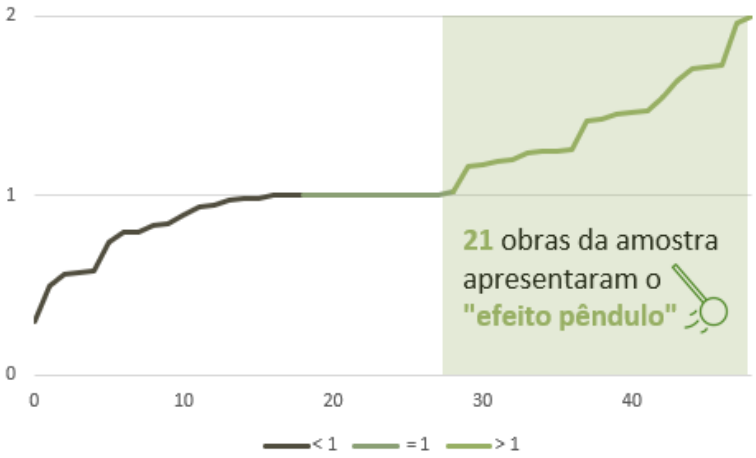


Figura 4 - Enquadramento segundo as hipóteses 1, 2 e 3 da amostra estudada

3.2 OBRAS DA ESPANHA

Na Espanha o efeito pêndulo é produzido pelos descontos significativos oferecidos no preço de execução das obras na fase de licitação. Os gráficos seguintes (Figura 5 e Figura 6) mostram, respectivamente a título de exemplo, o volume de obras licitadas em engenharia civil e de construção entre os anos de 2007 e 2023 e os correspondentes descontos para todas as administrações.

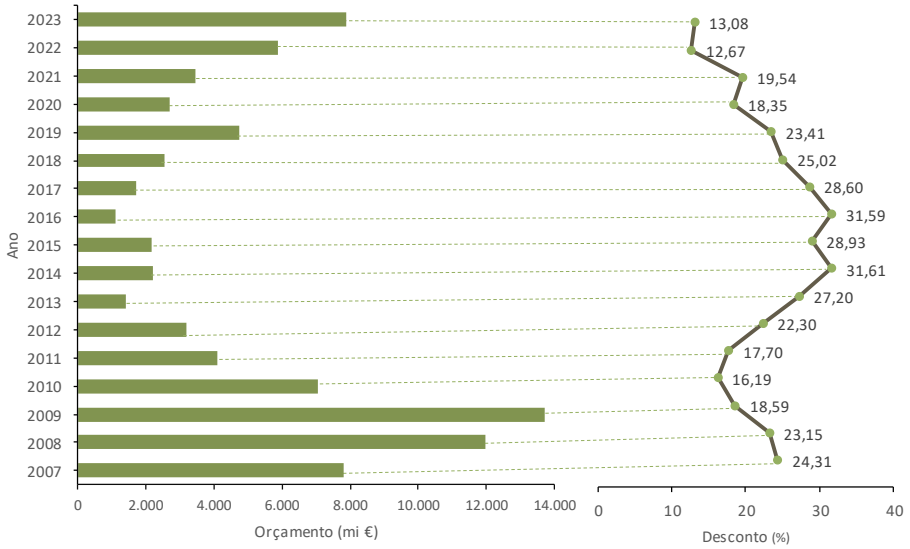


Figura 5 - Volume de obras licitadas em engenharia civil (relação entre o orçamento e desconto)

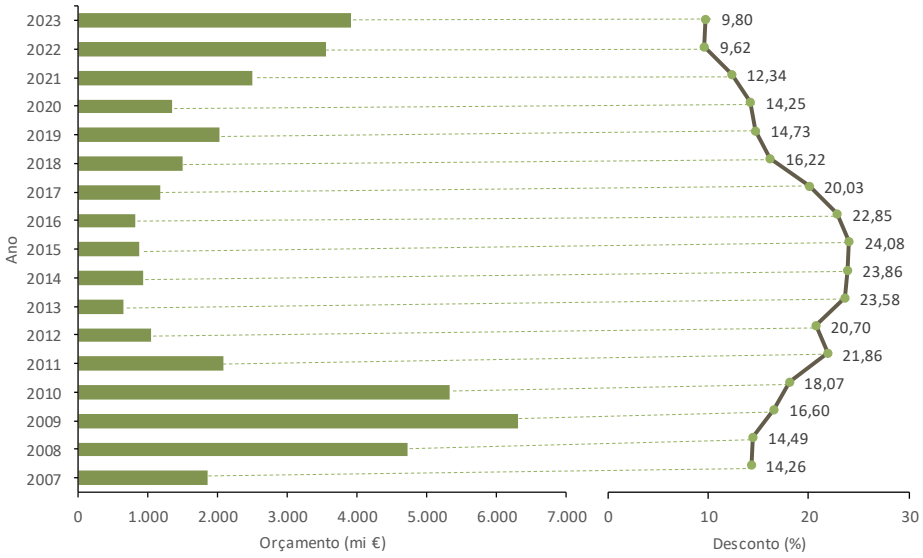


Figura 6 - Volume de obras licitadas em construção (relação entre o orçamento e desconto)

Vê-se claramente que nos anos em que houve baixo volume de licitações, os descontos oferecidos cresceram significativamente. Este é um efeito conhecido em mercados maduros nos quais o volume de atividade diminui e há elevada concorrência entre os membros do mercado. Isto também favoreceu o efeito pêndulo, embora como mencionado em Espanha não exista informação organizada e fiável, provavelmente devido à falta de transparência da Administração, que fornece dados sobre o custo final de liquidação dos contratos.

A lei espanhola contempla a possibilidade de introduzir modificações nos contratos, principalmente de obras. Até 2017, essas modificações poderiam atingir no máximo 20% do preço inicial do contrato. Normalmente, a entidade licitante só pode introduzir alterações por razões de interesse público, pelo surgimento de novas necessidades ou por causas imprevistas. Em todos os casos, é necessária uma justificativa exaustiva. Existe ainda a possibilidade de obter um adicional de 10% no final da construção, para regularizar possíveis diferenças de medições que existam entre a obra efetivamente executada e o projeto (denominado "liquidação").

A *Ley 9/2017* introduz alterações importantes relativamente à modificação de contratos, principalmente nos artigos 203 a 207. As principais alterações são a limitação dos modificados apenas a motivos de interesse público, os requisitos para formalização de contratos e a exigência de publicidade para estes projetos modificados. Em suma, a legislação atual visa um maior controle sobre as modificações contratuais, que antes eram utilizadas incorretamente para fundamentar o referido efeito pêndulo. Em geral, as modificações também devem ser inferiores a 20% do preço original.

Embora a plataforma de contratação pública não permita identificar a relação entre os projetos modificados e os originais, foi possível estabelecer uma relação entre o número total de obras licitadas e modificadas. Se levarmos em consideração o total de obras civis e projetos de construção contratados entre 2014 e 2023, 191.507, o percentual de projetos modificados foi de 0,76%, ou seja, 1.449. No entanto, muitos destes projetos correspondem a contratos menores, que não necessitam de modificação. Se considerarmos os importantes novos projetos de construção civil e construção neste mesmo período, 18.593, então podemos deduzir que 7,79% dos projetos (1.449) foram modificados.

Conforme mencionado, modificações isoladas ou cumulativas ao contrato original raramente excederão 30% do orçamento da adjudicação.

3.3 OBRAS DE PORTUGAL

Os resultados obtidos da aplicação da metodologia preliminar descrita apresentam-se em seguida na Figura 7.

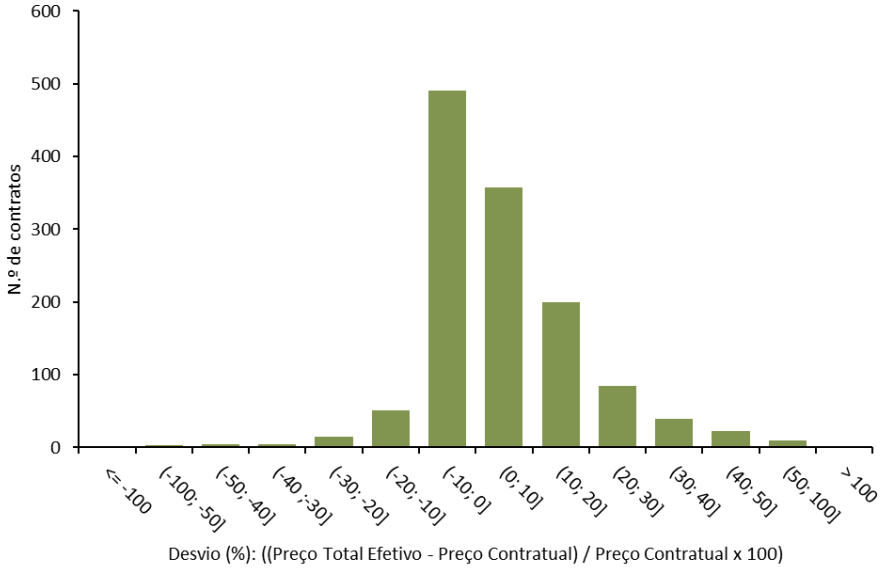


Figura 7 - Histograma de desvio (%) de preços em concursos públicos de empreitadas reportados no Portal BASE com data de fecho em 2023 (1282 contratos)

Cerca de 66% dos contratos foram fechados com um Preço Total Efetivo que não dista mais de 10% do Preço Contratual. Os remanescentes 34% distribuem-se pelos que ficaram abaixo do Preço Contratual (6%), e os que ficaram acima do Preço Contratual (28%).

A metodologia, sendo preliminar, ainda não permite tirar conclusões claras, mas já se vislumbra mais de 1/4 dos contratos que excederam em mais de 10% o Preço Contratual, o que justifica a necessidade de aumentar a monitorização destes dados.

Em desenvolvimentos futuros, seria desejável relacionar os Preços Contratuais com as propostas dos candidatos não-vencedores, expandir a análise para anos anteriores a 2023, classificar as justificações de alterações de preços (revisão de preços, impacto da pandemia de COVID-19 e guerras na Europa, etc.), e caracterizar a representatividade dos contratos indicados como fechados no Portal BASE dentro do universo de contratos efetivamente concluídos.

3.4 ANÁLISE INTER-PAÍSES

A análise de cada um dos países revela desafios que são comuns e tendências compartilhadas em relação aos custos de obras públicas nos três países que compõem o presente artigo. No Brasil, a maioria das obras apresentou a predominância do efeito pêndulo. Na Espanha, apesar da dificuldade em obter dados mais precisos, têm-se fortes indícios que sugerem a ocorrência de um padrão semelhante do efeito pêndulo, especialmente em anos com baixo volume de licitações. Por outro lado, em Portugal, a análise preliminar destacou que mais de 25% dos contratos excederam significativamente o preço contratual.

Ainda, é preciso melhor perceber e fundamentar como cada um dos países em questão estabelece o preço base das licitações de obras públicas. Para assim, melhor interpretar os “movimentos em pêndulo” dos contratos. Contudo, é possível destacar que, os três países enfrentam desafios na gestão contratual, sendo evidenciado nas amostras apresentadas a constante superação dos custos em suas obras públicas.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados da análise de obras públicas de três países, Brasil, Espanha e Portugal, pode-se inferir que os desvios de custos e questões orçamentárias são fenômenos complexos e multifacetados. No contexto brasileiro, observou-se uma prevalência significativa do fenômeno do efeito pêndulo, caracterizado pelo aumento dos custos inicialmente estimados, em uma parcela considerável das obras examinadas. Além disso, uma proporção substancial das obras não foi concluída dentro dos limites orçamentários estabelecidos, indicando uma gestão orçamentária desafiadora e uma tendência de superação de custos.

Por outro lado, na Espanha, a falta de informação organizada e confiável sobre o custo final das obras limitou a análise detalhada dos desvios de custo, destacando a necessidade de maior transparência por parte da administração pública. Em Portugal a maioria dos contratos foi fechada com um preço total efetivo próximo do contratual, porém, uma proporção considerável excedeu em mais de 10% o preço contratual, o que ressalta a importância de monitorar de perto tais desvios. Esses resultados apontam para a complexidade e a heterogeneidade dos desafios enfrentados na gestão de custos de obras públicas, destacando a necessidade de abordagens adaptativas e soluções contextuais para mitigar esses problemas.

As implicações mais amplas desses resultados são diversas e abrangentes. Em primeiro lugar, a ocorrência generalizada de desvios de custo e a prevalência do efeito pêndulo sugerem a necessidade urgente de aprimorar os processos de planejamento, licitação e execução de obras públicas, a fim de garantir uma gestão orçamentária eficaz e transparente. Isso inclui a implementação de práticas de monitoramento mais rigorosas e a promoção de maior transparência e responsabilidade por parte das autoridades públicas. Além disso, os resultados destacam a importância de uma abordagem integrada e colaborativa entre os diversos atores envolvidos no ciclo de vida das obras públicas, incluindo os governos, empresas privadas e a sociedade civil, para assim enfrentar os desafios complexos desse tipo de obra.

No entanto, é importante reconhecer as limitações da pesquisa. A dependência de dados fornecidos por fontes governamentais pode levar a inconsistências e falta de transparência nos dados, limitando a precisão e a confiabilidade das conclusões. A análise quantitativa dos desvios de custo pode não capturar totalmente as nuances e as razões subjacentes para esses desvios, destacando a necessidade de uma abordagem mais qualitativa e contextualizada para entender esses fenômenos.

Futuras pesquisas podem se beneficiar da consideração dessas limitações e explorar abordagens metodológicas mais abrangentes e holísticas para analisar os desafios de gestão de custos em obras públicas.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6 REFERÊNCIAS

ADAFIN, Johnson; ROTIMI, James O.B.; WILKINSON, Suzanne. Why do the design stage elemental cost plan and final tender sum differ in New Zealand?. **J. of Financial Management of Property and Construction**, [*s. l.*], v. 20, n. 2, p. 116–131, 2015.

AFONSO, António; RODRIGUES, Eduardo. Is public investment in construction and in R&D, growth enhancing? A PVAR approach. **Applied Economics**, [*s. l.*], v. 0, n. 0, p. 1–25, 2023.

ALONSO, Guillermo; ORTEGA, Francisco; RODRÍGUEZ, Vicente; SKITMORE, Martín; EMMANUEL, Olabode. The Relationship between Cost Overruns and Modifications for Construction Projects: Spanish Public Works and Their Legal Framework. **Buildings**, 2023, 13, 2626.

AWWAD, Rita; AMMOURY, Michael. Owner's Perspective on Evolution of Bid Prices under Various Price-Driven Bid Selection Methods. **J. of Comput. in Civil Eng.**, [*s. l.*], v. 33, n. 2, p. 04018061, 2019.

CATALÃO, Francisco Pinheiro; CRUZ, Carlos Oliveira; SARMENTO, Joaquim Miranda. Exogenous determinants of cost deviations and overruns in local infrastructure projects. **Constr. Management and Economics**, [*s. l.*], v. 37, n. 12, p. 697–711, 2019.

CAVALIERI, Marina; CRISTAUDO, Rossana; GUCCIO, Calogero. Tales on the dark side of the transport infrastructure provision: a systematic literature review of the determinants of cost overruns. **Transport Reviews**, [*s. l.*], v. 39, n. 6, p. 774–794, 2019.

DIAS, Shahla Felisbino. **Critérios para Seleção de Licitantes de Obras Públicas evitando Contratações a Preços Inexequíveis**. 2021. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/220554/PECV1238-D.pdf.

EL-SAYEGH, Sameh M. *et al.* Key contractor selection criteria for green construction projects in the UAE. **International Journal of Constr. Management**, [*s. l.*], v. 21, n. 12, p. 1240–1250, 2021.

GIAT, Y.; MITELMAN, A. Cost Overruns, Winner's Curse, Wisdom of the Crowd, and a Pendulum Effect in Public Construction Tenders. **IEEE Eng. Management Review**, [*s. l.*], v. 51, n. 2, p. 141–151, 2023.

GOLDBERG, Ilan. Reflexões a respeito do seguro garantia e da nova Lei de Licitações. **Revista IBERC**, [*s. l.*], v. 5, n. 2, p. 61–88, 2022.

IMPIC - Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I.P., 2023. Contratação Pública em Portugal 2022. https://www.impic.pt/impic/assets/misc/pdf/RelContratacaoPublica_2022.pdf.

LOVE, Peter E. D. *et al.* Curbing Poor-Quality in Large-Scale Transport Infrastructure Projects. **IEEE Transactions on Eng. Management**, [*s. l.*], v. 69, n. 6, p. 3171–3183, 2022.

LOVE, Peter E. D. *et al.* The cost performance of transportation projects: The fallacy of the Planning Fallacy account. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [*s. l.*], v. 122, p. 1–20, 2019.

OLIVEIRA, Victor R. de *et al.* Nova lei de licitações e contratos administrativos: principais mudanças. *In*: III Jornada Científica do Grupo Educacional FAVENI, 2022. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 2022. p. 98–103. https://revista.grupofaveni.com.br/index.php/revistainterdisciplinardafarese/article/view/934.

Portal BASE (2024). O que é o Portal BASE? https://www.base.gov.pt/Base4/pt/o-portal/base/.

MÊDA, Pedro; SOUSA, Hipólito; MOREIRA, Joaquim. Technical standardisation and indicators, essential elements to support e-procurement on public works, 2015. *In*: ECPP - 3rd European Conference on e-Public Procurement. https://hdl.handle.net/10216/115969.

RODRIGUES, Henrique Napoleão. **Uma análise da Nova Lei de Licitações e Contratos (14.133/2021) e sua aplicação em obras públicas**. 2022. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SARMENTO, Joaquim Miranda; RENNEBOOG, Luc. Cost Overruns in Public Sector Investment Projects. **Public Works Management & Policy**, [*s. l.*], v. 22, n. 2, p. 140–164, 2017.

SIGNOR, Regis *et al.* Underpricing in Social Infrastructure Projects: Combating the Institutionalization of the *Winner's Curse*. **J. of Constr. Eng. and Management**, [*s. l.*], v. 146, n. 12, p. 05020018, 2020.

THALER, Richard H. Anomalies: The Winner's Curse. **J. of Economic Perspectives**, [*s. l.*], v. 2, n. 1, p. 191–202, 1988.

Tribunal de Contas, 2.ª Secção (2023). Empreendimento de Obras Públicas. Relatório de Auditoria 6/2023. https://www.tcontas.pt/pt-pt/ProdutosTC/Relatorios/RelatoriosAuditoria/Documents/2023/rel006-2023-2s.pdf.

MENÉNDEZ, Uría. Principales novedades de la Ley 9/207, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, 2017.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPARAÇÃO DOS ENFOQUES DE GERENCIAMENTO DE RISCOS EM LICITAÇÕES: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE BRASIL E PORTUGAL

Suélen Cardoso da Rosa1; Denis Bertazzo Watashi2; Fernanda Fernandes Marchiori3; Hipólito Sousa4; Pedro Nuno Meda Magalhães5

[1] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, suelen.cardoso.rosa@ufsc.br

[2] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, denis.watashi@ufsc.br

[3] Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte e Silva, 205, 88037-000, Florianópolis, Brasil, fernanda.marchiori@ufsc.br

[4]CONSTRUCT/Gequaltec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal, hipolito@fe.up.pt

[6]CONSTRUCT/Gequaltec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal, pmeda@fe.up.pt

RESUMO

Os gastos públicos com obras e serviços de engenharia movimentam vultosas somas de recursos em todos os países e não são raros os casos de obras paralisadas, inacabadas, de má qualidade ou que, em alguns casos, não atendem à finalidade pública. Neste contexto, o gerenciamento de riscos é um processo fundamental para o planejamento e controle dos recursos relacionados aos riscos que possam comprometer o sucesso das contratações públicas. Diante dessa problemática, neste artigo são mostradas duas formas de abordagem de risco ligadas à licitações públicas, tanto no Brasil quanto em Portugal. Para tanto, foi usado o método de pesquisa documental em leis vigentes em ambos os países. Como resultado, espera-se proporcionar uma compreensão de aspectos gerais sobre as práticas de gerenciamento de riscos em licitações, como um primeiro passo para ampliar a pesquisa no tema e promover a melhoria da eficácia nos processos licitatórios. Busca-se, ainda, consolidar uma parceria de pesquisa entre os dois países no tema licitações públicas, ressaltando as boas práticas, contribuindo para a eficiência, transparência e integridade desses procedimentos, cruciais em diferentes partes do mundo.

Palavras-chave: Gerenciamento de riscos; Tratamento de riscos; Licitações; Políticas públicas; Comparativo Internacional.

1 INTRODUÇÃO

A contratação de obras públicas representa uma responsabilidade significativa, dada a magnitude dos recursos públicos envolvidos e a importância dessas obras para as comunidades e a sociedade (Menezes, 2013). No Brasil, por exemplo, observa-se uma evolução no comportamento da sociedade, na qual a utilização dos recursos públicos e a demanda por transparência são temas de interesse para uma parcela significativa da população que busca melhores condições de vida. Essa constatação é respaldada por pesquisas recentes, as quais têm investigado as razões subjacentes à ocorrência de aditivos de custos e prazos em obras públicas (Santos, Starling e Andery, 2015).

Assim, os contratos emergem como ferramentas para estabelecer uma gestão orientada à metas e a uma busca por resultados no âmbito público, visando aprimorar a qualidade dos serviços e a eficiência das organizações. Esses acordos representam compromissos gerenciais entre o governo e a direção de uma empresa ou setor estatal, definindo objetivos e metas periódicas. A supervisão desses contratos é conduzida pelo Estado, que deve prestar contas pelos serviços oferecidos (André, 1995). É relevante destacar que os projetos de construção apresentam uma variedade de dimensões e naturezas, cada um com seus próprios conjuntos de riscos, envolvendo diversos intervenientes e exigindo estratégias colaborativas de gestão de riscos para atingir os objetivos no tempo e custo definidos; no setor público, esse aspecto não é diferente (Mahamid, 2013).

Sob a perspectiva da gestão de riscos, a diferença entre os resultados esperados e os resultados reais de um projeto está relacionada aos eventos de risco, cuja gestão busca controlar incertezas expressas em termos de fontes de risco, eventos, consequências e probabilidades (ABNT, 2015; ABNT, 2018). O gerenciamento de riscos tem por objetivo antecipar e controlar os riscos em um projeto, indo desde a identificação, classificação e análise dos riscos, contribuindo para decisões fundamentadas sobre abordagens para aumentar a probabilidade de sucesso do projeto (Zayed, Amer e Pan, 2008).

Vale ressaltar, que de acordo com o Enap (2018), a ausência ou má condução da gestão de riscos resulta em impactos substanciais no setor público, manifestando-se principalmente por meio de retrabalhos recorrentes. Esses retrabalhos, em grande parte, são desencadeados por um planejamento insuficiente ou inexistente, o que culmina em custos adicionais consideráveis para os recursos públicos. A desvinculação entre prazos e custos compromete o sucesso do projeto, afetando as metas inicialmente estabelecidas. Essa situação acarreta implicações financeiras relevantes, sobrecarregando os cofres públicos e prejudicando a eficiência na alocação de recursos para áreas prioritárias. Além disso, os atrasos resultantes dessas falhas minam a confiança da população nas entidades públicas responsáveis pelos projetos. Diante desse cenário, a adoção de práticas eficazes de gestão de projetos no setor público torna-se imperativa para minimizar tais impactos negativos e garantir o sucesso e a eficácia das empreitadas governamentais.

No Brasil, em 2023, o Tribunal de Contas da União (TCU) identificou uma grave situação de paralisação em 41% das obras públicas federais brasileiras, de acordo com a Figura 1 e Figura 2, representando investimentos significativos (vide figura 3). As principais razões para essa paralisação incluem deficiências nos projetos, falta de recursos financeiros e capacidade institucional limitada dos entes subnacionais. Essa situação apresenta um desafio considerável para a administração pública,

resultando em impactos negativos sobre políticas fundamentais, como educação, saúde e segurança pública, além de prejudicar a economia e a qualidade de vida da população em todo o país. Para enfrentar esses problemas, são necessárias soluções eficazes que envolvam uma gestão de riscos estratégica, visando superar as falhas sistêmicas e assegurar o retorno das obras a sociedade, cumprindo assim sua finalidade inicial (TCU, 2023; TCU, 2020).

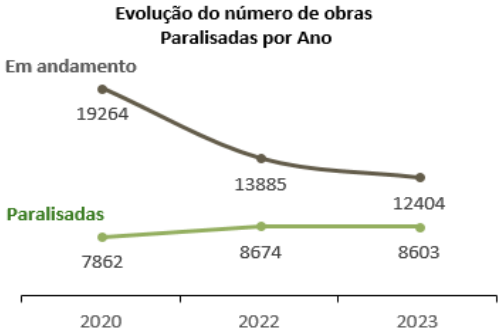


Figura 1 – Adaptação do percentual de obras, executadas com recursos federais, conforme o Relatório de Fiscalização, divulgado pela FISCOBRAS em 2023

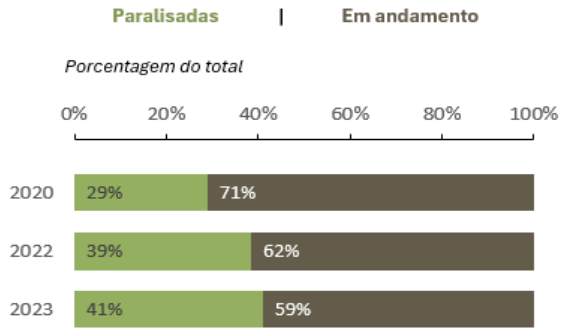


Figura 2 – Adaptação da quantidade de obras, executadas com recursos federais, conforme o Relatório de Fiscalização, divulgado pela FISCOBRAS em 2023

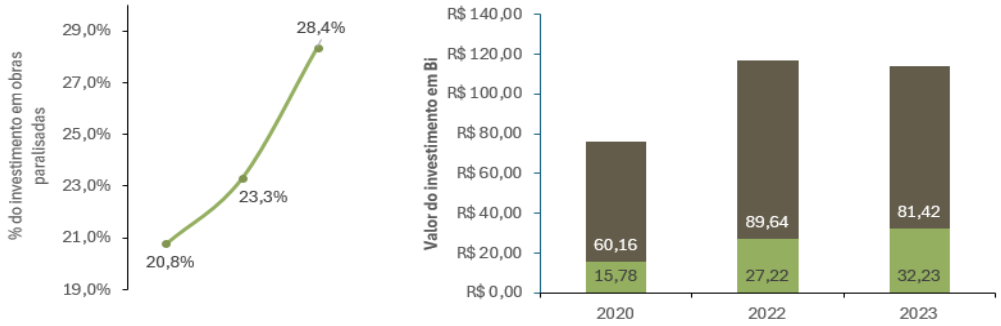


Figura 3 – Adaptação do valor investido em obras com destaque do percentual aplicado em obras paralisadas, conforme o Relatório de Fiscalização, divulgado pela FISCOBRAS em 2023

Desta forma, este artigo tem como objetivo levantar como o gerenciamento de riscos tem sido tratado em termos de legislação tanto no Brasil quanto em Portugal. Por fim, destaca-se que a fase crucial na gestão de riscos é a identificação, permitindo antecipar riscos antes que impactem negativamente o projeto, sendo impossível eliminar todos os riscos potenciais, mas a sua identificação é essencial para aplicar medidas de controle, transferência ou gerenciamento (Tawalere, 2019), etapas representadas na Figura 4.

Figura 4 - Fases para identificação dos riscos

Além disso, a gestão de risco, pode ser caracterizada como o conjunto de elementos que fornecem os fundamentos e disposições organizacionais para conceber, implementar, monitorar, rever e melhorar

continuamente a gestão do risco em toda a organização, impactando tanto positivamente como negativamente os resultados de um determinado, esses elementos são apresentados na Figura 5 (CGDF, 2023a).

Figura 5 - Caracterização da gestão de riscos de forma cíclica

1.1 RISCOS NO BRASIL E EM PORTUGAL: ASPECTOS LEGAIS

Atualmente no Brasil, a Lei nº 14.133, sancionada em 1º de abril de 2021, aborda os parâmetros legais sobre as licitações e contratos administrativos no Brasil, estabelecendo diretrizes abrangentes para as Administrações Públicas. Introduz inovações relevantes, especialmente no que tange aos mecanismos de controle e à gestão de riscos, visando promover maior transparência, eficiência e integridade nas relações contratuais entre o poder público e os agentes privados (Brasil, 2021). Nesta lei, a gestão de riscos é abordada como elemento crucial para atingir metas e estabelecer controles internos eficazes, promovendo uma execução mais transparente e eficiente dos contratos públicos. A alta administração do órgão ou entidade contratante tem a responsabilidade de gerir as contratações, implementando processos e estruturas que englobam a gestão de riscos e os controles internos. Na fase preparatória das contratações, é orientado realizar uma análise detalhada dos riscos que possam impactar o sucesso da licitação e a adequada execução contratual, com a inclusão de uma matriz de alocação de riscos no edital, definindo responsabilidades entre contratante e contratado relacionadas a eventos que influenciam o equilíbrio econômico-financeiro do contrato (CGDF, 2023b).

Em Portugal, o enfoque da gestão de riscos está ligado ao combate à corrupção e às infrações conexas. O Conselho de Prevenção da Corrupção (CPC), instituído pela Lei n.º 54/2008, atua como uma entidade administrativa independente junto ao Tribunal de Contas da União (TCU), promovendo atividades de prevenção da corrupção em âmbito nacional. Sob a perspectiva de garantir a observância de princípios como interesse público, igualdade e transparência na gestão de recursos públicos, o CPC emitiu uma Recomendação, em 2009, orientando a elaboração de planos de gestão de riscos de corrupção e infrações conexas para os órgãos públicos. Estes planos incluem a identificação de riscos específicos em cada área ou departamento, a implementação de medidas preventivas adequadas e a designação de responsáveis pela execução do plano. Adicionalmente, o Decreto-Lei n.º 109-E/2021, de 2021, criou o Mecanismo Nacional Anticorrupção, estabelecendo um regime geral de prevenção da corrupção e introduziu alterações significativas nos planos de prevenção de riscos de corrupção, infrações conexas e fraudes (Infraestruturas de Portugal, 2023).

2 DADOS E MÉTODOS

Para investigar a abordagem do gerenciamento de risco em cada um dos países-alvo, foi adotada uma metodologia que se fundamenta na análise das leis vigentes sobre o tema no Brasil e em Portugal. A Figura 6 apresenta as etapas do método utilizado no estudo.

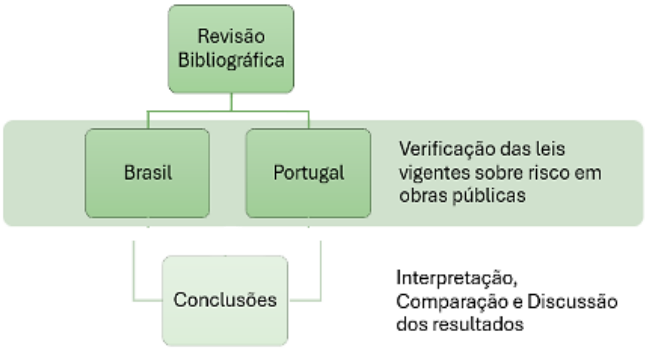


Figura 6 – Metodologia de Estudo

Para identificação das leis vigentes, foram realizadas buscas no banco de dados e sites governamentais de cada país, além de pesquisas específicas de artigos, revistas e trabalhos realizados sobre o tema. O Quadro 1 apresenta um resumo dos documentos estudados e identificados e suas especificações.

Quadro 1 - Legislação sobre gerenciamento de risco no Brasil e em Portugal

	Área da Pesquisa	Abordagem
BR	SITES DO GOVERNO: LEI Nº 14.133/2021	Etapas e diretrizes sobre a elaboração do gerenciamento de risco; (www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2021/Lei/L14133.htm)
PORTUGAL	1. HABITAÇÃO: PORTARIA N.° 255/2023, DE 07/08/2023	1 - Normas para a elaboração de projetos de obras públicas, e categorização do risco; (https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/255-2023216770690)
	2. CÓDIGO DOS CONTRATOS PÚBLICOS, DECRETO-LEI N.O 18/2008, DE 29 DE JANEIRO	2 - Código dos Contratos Públicos: Disciplina aplicável a contratos administrativos; Definição das responsabilidades entre as partes no gerenciamento de risco. (https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/18-2008-248178)
	3. PLANO DE GESTÃO DE RISCOS NA ESTRADAS DE PORTUGAL, S.A. - (INCLUINDO OS DE CORRUPÇÃO E DE INFRAÇÕES CONEXAS), 2014.	3 - Conselho de Prevenção da Corrupção (CPC); Planos de Gestão de Riscos de Corrupção e Infrações Conexas (PGRCIC); Implementação de mecanismos de acompanhamento e gestão de conflitos de interesse; Mecanismo Nacional Anticorrupção e Regime geral de prevenção da corrupção. (https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/pdfs/infraestruturas/ Plano_ Gestao_Riscos.pdf);
	4. PLANO DE PREVENÇÃO DE RISCO, INFRAESTRUTURA DE PORTUGAL, 2022 - 2023;	4 - Relatório de Execução do Plano de Prevenção de Riscos de Gestão, incluindo os Riscos de Corrupção e Infrações Conexas 2022 – 2023. (https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/2022-2023_RelatorioExecucao.pdf);
	5. PLANO DE PREVENÇÃO DE RISCOS DE CORRUPÇÃO E INFRAÇÕES CONEXAS (PPR/23)	5- Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana, I. P. (https://www.ihru.pt/documents/20126/35668/PPRCIC_2023__IHRU.pdf/130b8c09-573f-f4f1-a71c-0a5c1c3b0c07?t=1708430267106)

A partir da análise dos documentos elencados, foram realizados um levantamento e uma análise dos enfoques adotados por cada país para o gerenciamento de riscos em licitações. Os critérios de análise

incluirão a identificação dos principais elementos das políticas e regulamentos relacionados ao gerenciamento de riscos em licitações, tais como: definição de responsabilidades, procedimentos para identificação e avaliação de riscos, mecanismos de mitigação e controle, e disposições para monitoramento e revisão contínua do processo de gerenciamento de riscos.

Em seguida, será analisada a abordagem adotada por cada país com base nos critérios estabelecidos, possibilitando uma comparação e discussão dos resultados obtidos.

Esta metodologia visa oferecer uma compreensão geral das práticas de gerenciamento de riscos em licitações nos contextos brasileiro e português, proporcionando contribuições significativas para aprimorar as políticas existentes e promover a eficácia dos processos licitatórios em cada país.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise comparativa entre Brasil e Portugal revelam abordagens distintas no gerenciamento de riscos em licitações, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Comparativo entre aspectos legais sobre risco nas legislações do Brasil e de Portugal

ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO	BRASIL	PORTUGAL
Definição de responsabilidades	Estruturada em "Linhas de responsabilidade"; são divididas em linhas de defesa: **1ª Linha** (Servidores públicos, agentes de licitação e autoridades): identificação, avaliação, controle e tratamento dos riscos; implementação de medidas preventivas e aperfeiçoamento dos sistemas de controle interno. **2ª Linha** (Órgão central de controle interno e assessoramento jurídico da Administração): monitoramento das atividades da primeira linha; proposição de melhorias nos processos de gestão de riscos; assessoramento jurídico; avaliação da conformidade das condutas e procedimentos adotados pela primeira linha.	Envolve diversos intervenientes e suas funções específicas: **Comissão de Auditoria e Ética (CAE)**: aprova a documentação relacionada à gestão de riscos, incluindo o plano de prevenção de riscos de gestão. **Direção de Auditoria Jurídica (DAJ)** coordena a gestão de riscos, define metodologias, identificação e monitorização dos riscos, elabora relatórios anuais sobre o plano de prevenção de riscos. O "Dono do Risco" é responsável por identificar, analisar e propor controles para os riscos, implementando-os e reportando os resultados à DAJ. **Direção de Auditoria Interna (DAI):** auditoria dos processos de gestão de riscos, controle e governança.
Procedimentos para identificação e avaliação de riscos	Consiste em identificar eventos que possam impactar positiva ou negativamente os objetivos, analisando suas causas e consequências. Conforme definido pela ISO 31000, que estabelece as diretrizes para a elaboração do gerenciamento de risco.	Os procedimentos para identificação e avaliação de riscos são rigorosos e envolvem o uso de diversas ferramentas e metodologias. Isso inclui análises de cenário, revisões de documentos e consultas a especialistas para identificar potenciais ameaças e avaliar sua probabilidade e impacto. Conforme definido pela ISO 31000, que estabelece as diretrizes para a elaboração do gerenciamento de risco.

ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO	BRASIL	PORTUGAL
Mecanismos de mitigação	Envolve a implementação de medidas para reduzir a probabilidade de ocorrência ou o impacto dos eventos de risco.	Os riscos identificados são agrupados em 6 categorias: Financeiro, Negócio, Operacional, Regulação e Compliance, Reputacional e Tecnológico. A mitigação envolve: a elaboração de planos de contingência, a alocação de recursos adicionais e a definição de responsabilidades claras para lidar com situações de risco.
Mecanismos para monitoramento	Compreende o acompanhamento contínuo dos riscos identificados na matriz de risco e das medidas de controle implementadas para garantir sua eficácia ao longo do tempo.	São implementados mecanismos robustos de monitoramento para garantir a eficácia das medidas de mitigação adotadas, isto inclui: indicadores-chave de desempenho, relatórios regulares de status e revisões periódicas do progresso em relação aos objetivos estabelecidos.
Revisão contínua do processo de gerenciamento de risco.	Implica em avaliar periodicamente a eficácia do processo de gestão de riscos, identificando áreas de melhoria e ajustando as estratégias conforme necessário.	É enfatizada a importância da revisão contínua do processo de gerenciamento de riscos. Isso envolve a análise regular do desempenho das estratégias de mitigação, a identificação de novas ameaças emergentes e a adaptação das abordagens conforme necessário para garantir a eficácia contínua do gerenciamento de riscos.

No Brasil, destaca-se uma ênfase na minimização de danos e na definição clara de responsabilidades, refletida na legislação recente como a Lei nº 14.133, que introduz inovações relevantes visando promover maior transparência, eficiência e integridade nas contratações públicas. A nova lei busca envolver todos os agentes do processo, identificar, analisar e tratar os riscos envolvidos, além de monitorar e fazer as melhorias necessárias a cada novo ciclo, conforme mostrado no Fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Adaptação do Fluxograma de Gerenciamento de risco no Brasil, conforme o TCU e a ISO 31000

Além disso, observa-se uma análise detalhada dos riscos na fase preparatória das licitações, com a inclusão de uma matriz de alocação de riscos nos editais, delineando responsabilidades entre contratante e contratado, na parceria público-privada.

Por outro lado, em Portugal, o enfoque está mais voltado para o combate à corrupção e infrações conexas, como evidenciado pela atuação do Conselho de Prevenção da Corrupção e pela implementação de planos de gestão de riscos específicos, como o Plano de Prevenção de Riscos de Corrupção e Infrações Conexas, conforme a Figura 8. Esse foco na integridade e transparência na gestão de recursos públicos é uma estratégia central para mitigar riscos associados à má conduta e garantir a eficácia das contratações públicas.

Figura 8 - Fluxograma do gerenciamento de risco, conforme a Infraestruturas de Portugal (2023)

A análise dessas abordagens revela implicações importantes para a prática de gerenciamento de riscos em cada país. Enquanto no Brasil o foco está na eficiência operacional e na redução de falhas contratuais, em Portugal, a prioridade reside na garantia da integridade e na prevenção de irregularidades. Essas diferenças refletem contextos socioeconômicos e institucionais distintos, influenciando as estratégias adotadas pelos governos para lidar com os desafios associados à contratação pública.

Ao analisar o Quadro 2, que destaca os aspectos relacionados aos procedimentos de gerenciamento de riscos tanto no Brasil quanto em Portugal, percebe-se a importância atribuída a esses processos em ambas as jurisdições. No Brasil, os procedimentos são integrados à governança organizacional, contando com o apoio da alta direção e envolvendo todas as partes interessadas. A aplicação de boas práticas técnicas e gerenciais é vista como essencial para aumentar a eficiência da administração e reduzir o impacto dos riscos. Por outro lado, em Portugal, observa-se uma abordagem caracterizada por procedimentos robustos para identificação, avaliação e mitigação de riscos, além de um sistema de monitoramento rigoroso e uma ênfase na revisão contínua do processo. Essa abordagem reflete um compromisso com a gestão proativa e eficiente dos riscos em todos os níveis da organização, visando garantir a integridade, transparência e eficácia dos processos licitatórios. Ambos os países apresentam estruturas claras de responsabilidades e mecanismos definidos para identificação, avaliação, mitigação e monitoramento de riscos, evidenciando uma preocupação com a gestão eficaz dos processos de contratação pública.

Vale ressaltar a importância das diretrizes internacionais, como a ISO 31000 - Gestão de risco - diretrizes, na formulação de estratégias de gerenciamento de risco. A ISO 31000 oferece um quadro abrangente para a identificação, análise e tratamento de riscos, além de fornecer classificações e

parâmetros que podem ser utilizados na elaboração de políticas e práticas de gerenciamento de risco em ambos os países. Ao incorporar os princípios e recomendações da ISO 31000, Brasil e Portugal mostram o fortalecimento de suas abordagens de gestão de riscos, garantindo uma base sólida para lidar com os desafios complexos envolvidos na contratação pública (ABNT, 2015).

4 CONCLUSÃO

As diferenças nos enfoques de gerenciamento de riscos entre Brasil e Portugal destacam a complexidade e a diversidade de abordagens adotadas por diferentes países para lidar com desafios semelhantes. Enquanto o Brasil concentra seus esforços na melhoria da eficiência operacional e na redução de falhas contratuais, Portugal prioriza a integridade, a prevenção de irregularidades e o combate à corrupção e fraudes. Essas atribuições claras e distribuídas entre os intervenientes garantem uma abordagem abrangente e eficaz na gestão de riscos em Portugal, enquanto no Brasil, essa estrutura de responsabilidades visa garantir uma abordagem abrangente e eficaz na gestão de riscos e no controle interno no contexto das contratações públicas.

Essas discrepâncias não apenas refletem as particularidades socioeconômicas e institucionais de cada nação, mas também suas experiências históricas e culturais. No Brasil, escândalos de corrupção podem ter impulsionado a busca por medidas mais robustas de controle e transparência, enquanto que em Portugal, uma tradição de integridade e responsabilidade pode ter moldado sua abordagem preventiva. No entanto, é crucial reconhecer que ambas as abordagens visam promover uma contratação pública mais eficaz, transparente e íntegra, cada uma adaptada às necessidades e contextos específicos de cada país.

Para futuras pesquisas e práticas de gerenciamento de riscos, sugere-se a exploração de medidas adicionais que possam ser implementadas para aprimorar esse processo, bem como a realização de análises comparativas com outras jurisdições para ampliar a compreensão das diferentes práticas de gerenciamento de riscos. Essas investigações também podem examinar como os contextos específicos de cada país influenciam as políticas e práticas de gerenciamento de riscos, fornecendo insights para o aprimoramento contínuo desses processos. A colaboração e o diálogo contínuos são essenciais para fortalecer as políticas existentes e promover a eficácia dos processos licitatórios, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável e a boa governança em escala global.

REFERÊNCIAS

Enap, Escola Nacional de Administração Pública. 2018. Implementando a Gestão de riscos no setor público. Fundação Escola Nacional de Administração Pública. Brasília. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4090/1/Modulo%203-Ciclo%20de%20Gerenciamento%20de%20Riscos.pdf. Acesso em: 26 jun. 2024.

André, M. A. (1995). Contrato de gestão: contradições e caminhos da administração pública. Revista de Administração Pública, 35:6-13. https://doi.org/10.1590/S0034-75901995000300002

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR ISO 31000:2018 - Gestão de Risco: Princípios e Diretrizes. ABNT. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR ISO/TR 31004:2015 - Gestão de Risco: Guia para Implementação da ABNT NBR ISO 31000. ABNT. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). NBR ISO/IEC 31010:2012 - Gestão de Risco: Técnicas para o processo de avaliação de riscos. ABNT. Rio de Janeiro.

Brasil. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. (2021). Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14133.htm. Acesso em: 25 abr. 2024.

CGDF, Controladoria Geral do Distrito Federal. (2023a). Conceitos: Gestão de Risco. Disponível em: www.gestaoderiscos.cg.df.gov.br. Acesso em: 25 abr. 2024.

CGDF, Controladoria Geral do Distrito Federal. (2023b). Guia Gestão de Riscos nas Contratações. Disponível em: https://www.cg.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2018/02/Guia-Gestao_de_Riscos_nas_Contratacoes.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

Infraestruturas de Portugal. (2023). Plano de prevenção de risco: incluindo os riscos de corrupção e infrações conexas. Relatório de execução: 2022-2023. Disponível em: https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/2022-2023_Relatorio Execucao.pdf. Acesso em: 28 abr. 2024.

Mahamid, Ibrahim. (2013). Contractors perspective toward factors affecting labor productivity in building construction. Engineering, Construction and Architectural Management, v. 20, n. 5, p. 446-460.

Menezes, P. S. N. (2013). Entre a engenharia e a administração: fatores determinantes na contratação de serviços adicionais em obras públicas. Belo Horizonte. 73 f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Estudos Administrativos de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Santos, H. de P.; Starling, C. M. D.; Andery, P. R. P. (2015). Um estudo sobre as causas de aumentos de custos e de prazos em obras de edificações públicas municipais. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 225-242.

Tawalare, Abhay. (2019). Identification of risks for Indian highway construction. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. p. 102003. DOI:10.1088/1757-899X/471/10/102003

TCU, Tribunal de Contas da União, 27.ª Edição. (2023). Fiscalização de Obras Públicas (FISCOBRAS), no exercício de 2023. Disponível em:

https://portal.tcu.gov.br/data/files/31/63/7A/28/64C8B810F80985A8E18818A8/Fiscobras%202023.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

TCU, Tribunal de Contas da União. (2020). Lista de alto risco: gestão das obras paralisadas. Acórdãos 1.079/2019, 1.328/2020, e 1.228/2021, todos do Plenário do TCU. Disponível em: https://sites.tcu.gov.br/listadealtorisco/gestao_das_obras_paralisadas.html. Acesso em: 25 abr. 2024.

Zayed, Tarek; Amer, Mohamed; Pan, Jiayin. (2008). Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. International journal of project management, v. 26, n. 4, p. 408-419.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A IMPORTANTE E CORRETA ABORDAGEM DA QUALIDADE NA GESTÃO DA CONSTRUÇÃO

PAULO CASTANHEIRA

DCCT, FEN, UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-013, paulo.castanheira@eng.uerj.br

RESUMO

Ao longo do tempo, a avaliação da qualidade do produto foi inserida no processo produtivo industrial a fim de reduzir erros e custos de produção. Essa análise qualitativa iniciada na Revolução Industrial atingiu um aprimoramento obrigatório nas grandes guerras mundiais, com foco não somente em custos, como em eficiência. Em outras palavras, a evolução do conceito de Qualidade ao longo da evolução das cadeias produtivas tornou-se sinônimo de padronização e melhoria contínua de processos. Na indústria da construção civil, entretanto e muitas vezes, observa-se a gestão da qualidade através de procedimentos e verificações que apenas reportam erros e acertos, perdendo a sua função principal na gestão de empreendimentos de construção, a melhoria contínua. Tornou-se mera inspeção e preenchimento de formulários que validam ou não o produto e, nesta última hipótese, mantendo a reprovável – e custosa – mentalidade de corrigir através de retrabalho, acarretando em aumento de custos de correção. Na forma como ocorre em construtoras menos maduras, o setor de qualidade afasta-se do setor de produção, pois se transforma meramente em uma busca por autores dos erros – pessoas – e não pela causa raiz dos problemas e erros encontrados – fatos e dados. Torna-se uma disputa interpessoal e interdepartamental que nenhuma evolução traz ao processo construtivo. Interpretar de forma adequada e profunda os desvios produzidos indicará as ações corretivas eficazes para a solução do problema, seja em termos dos materiais envolvidos, metodologia executiva ou nivel de excelência da equipe de produção. O presente artigo busca, de forma sintética, apresentar o verdadeiro papel da Qualidade na gestão de empreendimentos na indústria da construção. A utilização da Qualidade em seu conceito pleno e moderno garante ações de gestão em termos de treinamento, padronização da execução, redução e posterior eliminação de custos advindos do retrabalho corretivo, através da análise estatística das ações corretivas indicadas nos relatórios de inspeção e de qualidade. É, através da gestão da Qualidade a tradução do “Lean Thinking” no processo construtivo, também chamado “Lean Construction”. Obviamente, os custos para a gestão assertiva da qualidade aumentam, porém não se comparam com os repetitivos e infindáveis custos de correção de processos produtivos em todas as fases do processo construtivo de um empreendimento que não administra os erros nem busca a correção das causas raiz dos mesmos.

PALAVRAS-CHAVE

Gestão, Construção, Qualidade, Redução de Custos

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo debaterá a gestão da qualidade, no âmbito de Construtoras brasileiras, em especial aquelas voltadas para construção residencial, notadamente as prediais, em qualquer nivel de padrão construtivo, dos mais simples aos mais elevados.

O texto trará uma revisão bibliográfica sobre a evolução de conceitos básicos de qualidade, adotados nas indústrias, de forma geral e servirá de base para a análise do paradigma atual do nicho de mercado de construção brasileiro supra citado.

Na sequência apresentará ferramentas estatísticas importantes para a gestão da qualidade como processo concebido ao longo de uma história de erros e acertos a fim de obter a metodologia adequada que é utilizada na indústria em geral.

Por fim mostrará a real condição da gestão da qualidade na maior parte das construtoras brasileiras e concluirá sobre os prós e contras do modelo adotado.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE NO PROCESSO INDUSTRIAL

O conceito de Qualidade se desenvolveu ao longo dos anos, influenciado pela importância de se atender as necessidades e expectativas do usuário em tudo o que se produzia, inicialmente a nivel de sobrevivência, passando pela fase de busca de produtividade e em nivel mais avançado, melhoria de conforto e usabilidade.

O entendimento de que um produto precisava atender a um nivel de conformidade adequado a um padrão necessário, desde muito cedo foi percebido. Era necessário atender níveis de especificações, caso contrário não supriria as necessidades do usuário final. Um produto sem funcionalidade, ou com funcionalidade comprometida, não justificava sua fabricação e todo esforço empreendido na mesma.

Por mais que o conceito de Qualidade seja subjetivo, dependente de impressões individuais, cultura, necessidades específicas, pode-se afirmar que um ponto é indubitável, o produto ou serviço entregues precisam cumprir com o combinado, atingir um escopo com especificações bem definidas.

Segundo Marshall Jr et al. (2006), ao longo do tempo, esta percepção evoluiu, fazendo com que a Qualidade passasse por diferentes fases, desde a mera inspeção, passando em seguida pelas fases de controle estatístico da qualidade, garantia da qualidade e chegando no modelo de gestão estratégica da qualidade.

A fase da inspeção iniciou-se no início da era industrial e durou até meados do século XIX, impulsionada pelo surgimento da produção em massa. A grande quantidade de produtos exigiu um avanço na análise de inspeção, que vinha sendo realizada pelos próprios produtores.

Frederik W. Taylor, no início do século XX, trouxe maior legitimidade ao processo de inspeção, separando-o do processo de fabricação e direcionando-o para profissionais especializados, tornando-o, então, um processo independente.

A obra *The control of quality in manufacturing* (Radford, 1922) apresentou a Qualidade, pela primeira vez, como processo de responsabilidade gerencial e função independentes da produção.

Porém, nesta fase ainda, o controle de qualidade se limitava à inspeção e classificação dos desvios, sem responsabilidade pela solução dos problemas.

A evolução a este entrave foi o início do controle estatístico de processo pela melhoria da qualidade, do qual grandes nomes foram atuantes, segundo Garvin (2002): Walter Shewhart, Harold Dodge, W. Edwards Deming e Joseh M. Juran.

A obra *Economic control of quality of manufactured product* (Shewhart, 1931) conferiu o caráter científico à prática da busca da qualidade, através de procedimentos estatísticos no processo produtivo.

O primeiro passo foi controlar o processo, o que obrigou a estruturação organizada das etapas que compõem a realização do trabalho ou tarefa e a inclusão do fluxo produtivo, com insumos, atividades realizadas e produtos gerados.

Essa metodologia permitiu obter informações sistematizadas, esclarecendo os pontos críticos, as oportunidades de melhoria e as variações devidas às causas inerentes à natureza do processo, além daquelas devidas a causas anormais ou específicas.

A ferramenta Carta de Controle surgiu nesta fase, se tornando o instrumento mais simples para documentar e analisar as ocorrências dos desvios e, a partir delas, implementar ações para assegurar os padrões de qualidade desejados

A evolução das técnicas produtivas, assim como do volume produzido, inviabilizava a inspeção de todos os produtos fabricados, então a técnica de amostragem estatística passou a ser utilizada, a fim de reduzir custos e prazos. Naturalmente, em paralelo, o processo produtivo e processos associados precisaram evoluir para um nível que tornasse o processo por amostragem confiável.

Ao fim a da Segunda Guerra Mundial, a Qualidade estava estabelecida e aceita no ambiente das indústrias, com técnicas específicas, resultados efetivos e profissionais especializados e dedicados a esta causa.

Na década de 1950, primeiramente Deming e depois Juran, em visitas ao Japão durante a reconstrução do país após a guerra, influenciaram expressivamente o processo de qualidade Japonês e uma nova era da qualidade se estabeleceu.

As atividades relativas à qualidade passaram da atuação focada apenas em aspectos tecnológicos das fábricas para a preocupação global, holística, abrangendo todos os aspectos do gerenciamento e da organização, dando início ao *Total Quality Control*, ou TQC, uma forma de buscar a garantia da qualidade final do produto.

A Qualidade do produto passou a ser analisada desde o processo de desenvolvimento, incluindo aspectos funcionais e de desempenho e envolvendo todos os funcionários, de todos os níveis hierárquicos, assim como os fornecedores e clientes no processo de melhoria da qualidade. O objetivo era criar comprometimento e confiança recíproca, elevando as possibilidades de se manter e elevar as técnicas de qualidade existentes, num ciclo de melhoria contínua.

A partir de 1970, a qualidade dos produtos japoneses, principalmente automóveis e televisores, passou a superar a dos produtos norte americanos, numa época em que os clientes estavam cada vez mais exigentes com quesitos preço e qualidade durante a compra dos produtos.

Nesta época, as atribuições do profissional de qualidade envolviam a quantificação dos custos da qualidade, o controle total da qualidade, engenharia da confiabilidade e zero defeito, conforme descreve Garvin (2002).

Essa primeira atribuição, quantificar os custos da qualidade em todo o processo produtivo, naturalmente evoluiu para gerir e administrá-los e rapidamente suscitou a medição dos custos inerentes da não qualidade, perdas com refugo, retrabalho, devoluções, manutenção e, também muito importante, a imagem do produto e da organização perante o público consumidor.

O controle total da qualidade, como já mencionado, buscava o envolvimento de todos os participantes da cadeia produtiva, desde a fase de concepção, até a entrega ao cliente. Assim, todos os departamentos passaram a ser responsáveis pelo sucesso do empreendimento e a alta administração era enxergada por todos como a liderança e responsável final, integrando todas as áreas e gerando sinergia em prol da qualidade.

A partir desta visão, a alta gestão passou a se posicionar estrategicamente com vistas a obtenção da qualidade em uma abrangência holística, integrando a produção seja de bens ou serviços, marketing, recursos humanos, meio ambiente, qualidade de vida, assim como ética e responsabilidade social.

A engenharia da confiabilidade levou a Qualidade para fora dos muros da indústria. Como era o desempenho pós fabricação e durante o uso, pelo cliente final?

Através de análises estatísticas, buscou-se entender o tempo de operação do produto, inclusive em níveis de componentes e equipamentos, busca por mais segurança operacional, inclusive com alocação de recursos para este fim. A garantia e confiabilidade do produto se estendendo para o pós venda.

O conceito “zero defeito” surgiu também com foco na expansão da gestão da garantia da qualidade ao nível do cliente. Assim, projeto, engenharia, planejamento e serviços ganharam a importância que o controle de qualidade e da produção tinham atingido.

A coordenação e integração entre diferentes setores e suas funções se tornou preocupação fundamental e a gestão da qualidade abraçou os outros departamentos. A garantia da qualidade em todas as etapas do processo reduziria a chance de problemas no produto final.

A Gestão estratégica da qualidade surgiu como sequência normal da evolução da qualidade e da necessidade de melhoria contínua ao longo da cadeia do produto. A qualidade era agora entendida como uma disciplina de valor estratégico, além do natural viés técnico do processo executivo. O mercado passou a valorizar quem entendia a gestão da qualidade como um valor e começou a punir as organizações que ainda não se estruturaram neste sentido.

Nas últimas décadas do século XX, a evolução das legislações de defesa do consumidor e das normas internacionais amplas e aplicáveis na cadeia de interação entre cliente e fornecedor, como a família ISO 9000, consolidaram a qualidade em todos os pontos do negócio.

Era o cliente final quem determinava suas necessidades e o atendimento das mesmas - não mais o fabricante.

A satisfação do cliente durante a vida útil do produto, a partir de então estava atrelada à comparação com a concorrência – um produto “pior” perdia lugar no mercado. Era preciso agregar valor ao produto através de atributos desejados pelo usuário.

A qualidade é agora um valor inerente a toda empresa ou fábrica de produtos ou mercadorias, pois o consumidor cada vez mais entende suas necessidades e preferências e, caso algum fornecedor falhe no atendimento destas demandas, buscará outras opções no mercado.

O avanço da Indústria 5.0, interconectando cada vez mais etapas, processos e players da cadeia produtiva tende a tornar cada vez mais a efetivar e facilitar a gestão da qualidade do produto.

Diversos conceitos coexistem sobre qualidade, que vem sendo estudada nas áreas de Economia, Marketing, Engenharia de Produto e Administração. Cada uma dessas áreas se volta para um aspecto específico da qualidade, o que pode trazer visões diferentes sobre o tema. Garvin (1992) sistematizou os enfoques recorrentes para a qualidade em: transcendental; baseado no produto; baseado no usuário; baseado nafabricação; baseado no valor.

Dentre estes enfoques da qualidade, aqueles que mais se aplicam na atividade produtiva são os do usuário, do produto, da fabricação e do valor, com a mesma importância, complementares e, além disso, associados a pontos de vistas específicos de cada uma das áreas da empresa e do ciclo de produção.

O produto devia satisfazer o cliente, ter qualidade intrínseca, qualidade de conformação e preço compatível com o poder de compra do mercado.

2.2 FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA INDÚSTRIA

Algumas ferramentas de estatística que auxiliam a gestão da qualidade nos processos produtivos da industria, de forma geral, serão apresentados a seguir. Podem ser usadas em conjunto ou separadas.

Inicialmente, o assunto será abordado de forma genérica e ao final indicará exemplos de uso para a construção civil.

2.2.1 DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO (DIAGRAMA DE ISHIKAWA)

O Diagrama de Causa e Efeito, também conhecido como Diagrama de Ishikawa ou diagrama espinha de peixe, foi desenvolvido em 1943 por Kaoru Ishikawa, japonês que atuou como gestor de qualidade da Nissan Liquid Fuel Company e integrou a União Japonesa de Cientistas e Engenheiro (JUSE), se tornando um expoente da qualidade naquele país.

Essa ferramenta é comumente utilizada para identificar possíveis causas para um determinado problema, buscando as causas raiz dos problemas analisados, através dos 6 M´s: método, máquina, medida, meio ambiente, material, mão de obra.

• Método: discutem-se todas as metodologias de trabalho (técnicas, normas, regramentos, procedimentos e processos adotados);

• Medida: analisam-se as ferramentas que a equipe utiliza para mensuração de dimensões e características físicas;

• Máquina: avaliam-se a funcionabilidade e a eficiência dos equipamentos utilizados no processo;

• Meio ambiente: analisa-se o entorno da produção, seja o ambiente, a organização ou a relação das pessoas entre si e com o meio;

• Material: analisam-se os insumos utilizados, qualidade do material; adequação, requisitos e quantidade;

• Mão de obra: avaliam-se a equipe, habilidade, eventual sobrecarga de trabalho, adequação do posto de trabalho; existência de treinamentos operacionais.

A Figura 1 retrata o Diagrama de Ishikawa, antes do preenchimento das causas de probelmas em cada fonte de análise.

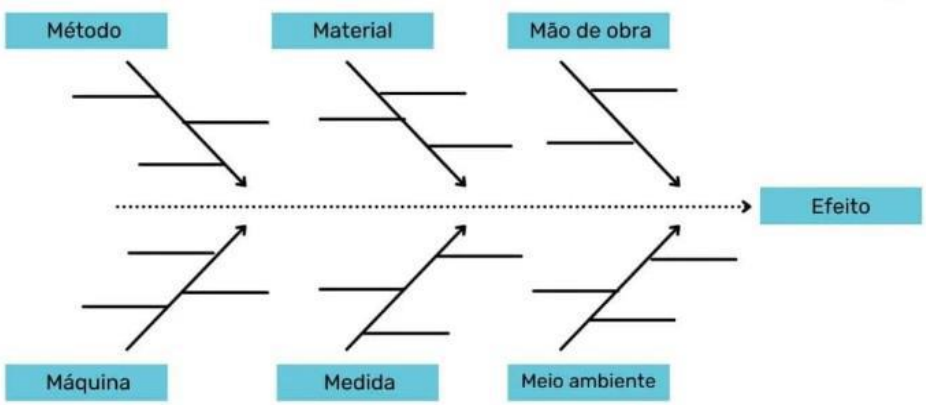


Figura 1 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa

O preenchimento do diagrama permite avaliar o nível de compreensão do processo e entendimento do problema em análise. Quanto mais ramificações presentes no diagrama, mais profundo o entendimento do problema e possibilidade de uma boa interpretação para sua resolução.

Em posse do diagrama preenchido, é possível avaliar o nível de compreensão do problema, sendo que, quanto maior o número de ramificações no diagrama, mais profundo é o entendimento e detalhamento da ocorrência do problema.

A partir do Diagrama, pode-se analisar dados e evidências do problema e o motivo de ocorrência, para que se chegue às “causas-raiz” e se possa criar os “planos de ação” para solução.

2.2.2 FLUXOGRAMA

O fluxograma ou “mapa de processo” é uma representação gráfica e visual que facilita o entendimento de todo o processo de produção e tarefas a serem realizadas, buscando minimizar erros e retrabalhos. Além de ser utilizado como forma de documentação, também serve para padronizar as etapas.

A melhor visualização do processo executivo possibilita, em especial, identificar onde estão as “causas raízes” encontradas no Diagrama de Ishikawa, facilitando a verificação dos pontos que precisam de atuação e a correção desses problemas, como pode ser visto na Figura 2, a seguir.

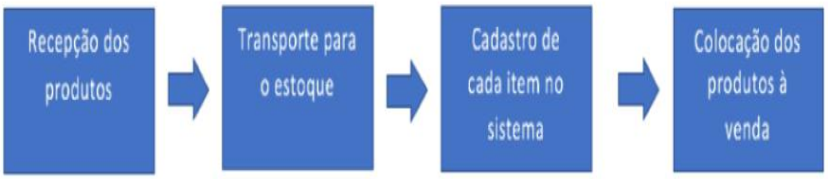


Figura 2 – Exemplo de Fluxograma

2.2.3 HISTOGRAMA

Histogramas são ferramentas visuais em gráfico de barras, utilizadas para comparar resultados, comunicar, informar e distribuir frequências e ilustrar como uma determinada amostra de dados está distribuída.

Essa ferramenta, apresentada na Figura 3, é comumente utilizada para o controle de recursos, como materiais, mão de obra, equipamentos empregados para a execução de determinado projeto e pode ser estratificada para os erros que mais se repetem no processo, indicando sua frequência, os turnos em que mais ocorrem, quais equipes mais cometem o erro etc.

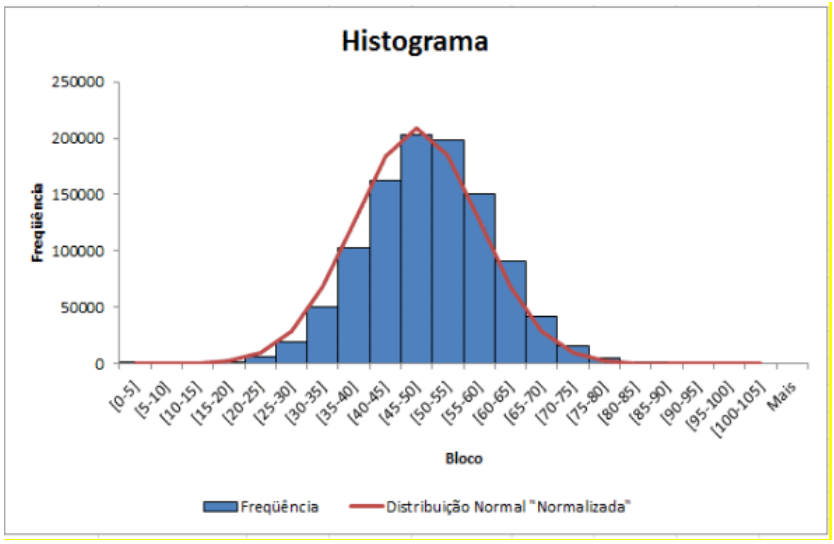


Figura 3 – Exemplo de Histograma

2.2.4 DIAGRAMA DE PARETO

O Diagrama de Pareto é uma ferramenta gráfica comumente usada para identificar a frequência de determinados erros nas execuções dos projetos e serviços, conforme se vê na Figura 5.

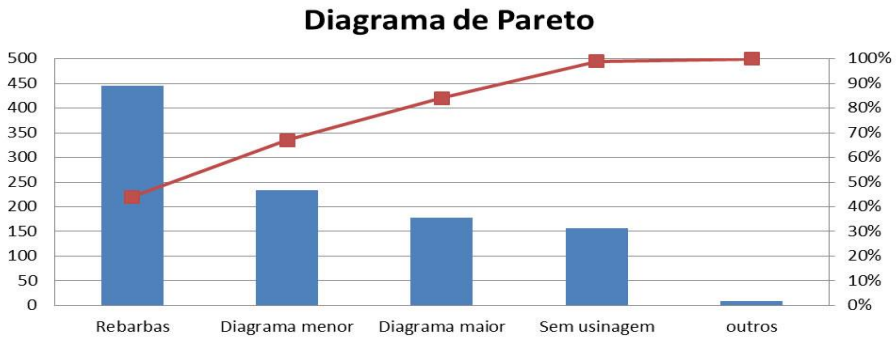


Figura 5 – Exemplo de Diagrama de Pareto

A Lei de Pareto, também conhecida como regra do 80/20, diz que "*80% das ocorrências decorrem de 20% das causas*", isto é, são poucos os problemas que resultam em grandes perdas.

Os objetos de análise serão categorizados posteriormente e calculados percentualmente, criando-se três eixos: no eixo horizontal constarão, de forma decrescente, os motivos do problema; no eixo

vertical da direita, uma escala de 0 a 100%, informando o valor percentual acumulado de cada desvio e no eixo vertical da esquerda, uma escala de 0 até o valor total da amostra analisada. A linha vermelha indica o somatório, ou acumulado, das ocorrências.

A partir disso, é possível vislumbrar os problemas mais representativos, enumerá-los e verificar aqueles que geram o efeito em 80% do resultado pretendido.

A referida ferramenta permite, portanto, a identificação e o direcionamento dos esforços nas "causas-raíz" desses problemas, aplicando-se a proporção 80/20, ou seja, imprimir esforços para resolver 20% dos problemas mais importantes/representativos, atingindo-se 80% do resultado.

O Diagrama de Pareto pode ser usado em diversas etapas de execução da obra e durante um lapso temporal que permite o mapeamento e estabelecimento de métodos de atuação para melhoria contínua, priorizando ações como treinamento de equipe e profissionais, para mitigação de futuros erros verificados, reduzindo-se o retrabalho e os custos finais.

2.2.5 GRÁFICO DE CONTROLE

Os gráficos de controle são ferramentas utilizadas na determinação da estabilidade de um processo, apresentando uma linha central para a média e as linhas que representam os Limites de Controle Superior e Inferior e está apresentado na Figura 6.

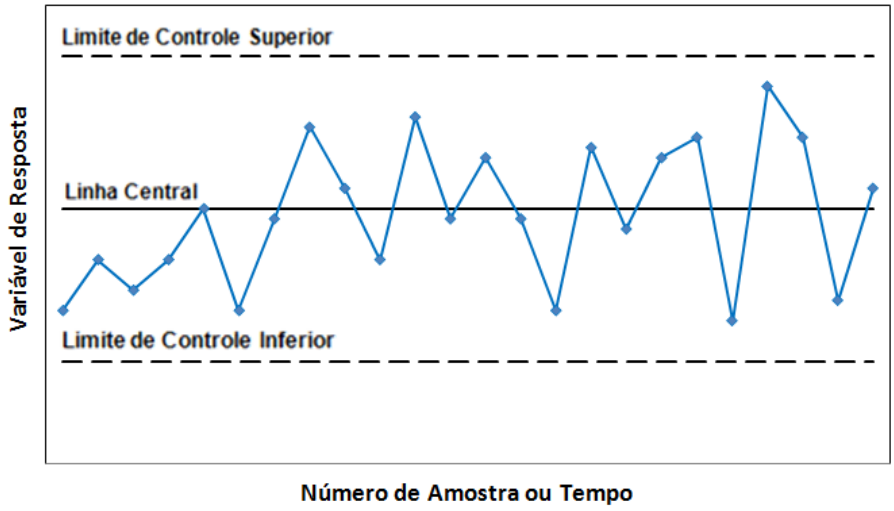


Figura 6 – Exemplo de gráfico de controle

O processo será considerado ideal, quando se apresenta 100% conforme, dentro dos Limites de Controle. Será considerado limítrofe, quando uma determinada quantidade de pontos estabelecida para o processo estiver fora dos Limites de Controle, porém dentro de certa variabilidade esperada.

Nos casos extremos, em que os limites de controle são superados acima de uma estatística definida, a correção, tão imediata quanto a freqência em que o desvio ocorre, será demandada.

Os gráficos utilizados podem acompanhar diferentes variáveis, conforme entendimento do gestor, variações de prazos de cada etapa, de valores provisionados de gastos, de frequência de mudanças no objetivo do projeto a ser executado (caso seja da vontade do cliente) ou, ainda, vistoriar e avaliar outros resultados de gerenciamento que porventura sejam importantes em cada fase da execução do produto, espessura, diâmetro, comprimento, peso, resistência, dentre outros.

2.2.6 DIAGRAMAS DE DISPERSÃO

Também chamado de “Gráfico de Dispersão”, é uma da ferramenta compreendida por um gráfico de eixos verticais e horizontais que correlacionam a causa e o efeito entre variáveis dentro de um processo a ser gerenciado. Essa correlação pode ser proporcional (correlação positiva), inversa (correlação negativa), ou de padrão inexistente (correlação zero).

Havendo a possibilidade de se estabelecer a correlação de alguma(s) varialvél(eis), que podem ser as causas para ocorrência de desvios no processo, uma linha pode ser obtida e utilizada para criar uma estimativa de como uma mudança na “Variável Independente” interferirá no valor da Variável Dependente”; sendo certo, ainda, que dentro de uma mesma análise, são passíveis de testes tantas correlações quantas forem possíveis. O Diagrama de Dispersão está apresentado na Figura 7, a seguir.

Figura 7 – Exemplo de Diagrama de dispersão

3 A QUALIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL PREDIAL NO BRASIL

De maneira geral, a qualidade nas empresas de construção civil prediais no Brasil trabalham com dois relatórios que serão identificados a seguir.

3.1.1 FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇO (FVS)

Também conhecida como “Checklist” ou ”Lista de Verificação”, é um formulário utilizado para coletas de dados dos mais diversos tipos relacionados à execução de uma obra / serviço. Esta ferramenta auxilia na rápida verificação de processos / etapas de execução, localização de causas e defeitos e quantitativos, ajudando na padronização de informações e na identificação de possíveis erros.

Apesar de não existir um modelo único de ficha de verificação, é importante que seja montada uma listagem com campos para registros e com preenchimento autoexplicativo.

Essa ferramenta é, talvez, a ferramenta de controle de qualidade mais utilizada e gera subsídios para criar, alimentar e possibilitar a aplicação das demais ferramentas de controle de qualidade, apresentadas anteriormente. Na Figuras 8 verifica-se exemplo de Ficha de Verificação de Serviço para concretagem .

No programa de qualidade das obras nas construtoras brasileiras, verifica-se a utilização da FVS para todos os serviços durante a fase executiva, desde a concretagem até a etapa de revestimentos externos, como pode ser verificado na Figura 9, a seguir.

	FVS - Ficha de Verificação de Serviço		Serviço: Forma, Armadura e Concretagem							Folha 1/2
Empresa responsável pela execução do serviço: (Caso haja mais de uma empresa responsável pela execução do serviço, identificar até que pavimento cada empresa executou).			Bloco:							
		Local ->								
Serviço	**Etapa**	**Método de verificação**								
Montagem de fôrma	**Alinhamento**	Alinhamento dos painéis externos, com linha de nylon.								
	Travamento	Travamento e encaixe dos painéis visualmente								
	Nivelamento	Nível do fundo das fôrmas com nível de mangueira ou laser (desvio máx. 5mm)								
	Prumo	Prumo com prumo de face (desvio máx. 3mm)								
	Escoramento	Escoramento, posição e quantidade visualmente, de acordo com o projeto								
Montagem de armadura	**Amarração e posicionamento**	Amarração firme, armadura sem contato com as fôrmas visualmente Conferência da armadura de acordo com projeto								
	Armadura negativa	Posicionamento e fixação da armadura negativa com o metro								
Instalações	**Furos de passagem e caixas**	Posicionamento, vedação e reforço de armação de acordo com o projeto								
	Tubulações	Posicionamento, tipo e vedação								
Concretagem de peça estrutural	**Nivelamento de mestras**	Colocação de mestras com altura de acordo com o projeto								
	Falhas de concretagem	Falhas de concretagem após a desforma visualmente								
Desforma	**Reescoramento**	Posicionamento do reescoramento, visualmente, de acordo com o projeto								
Legenda		Em branco **(local não inspecionado)**	Aprovado O		Reprovado X		Aprovado após reinspeção ⊙			

Figura 8 – Exemplo de Ficha de Verificação para concretagem

FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇO – REVESTIMENTO DE FACHADA EM PASTILHA CERAMICA					
Obra:	**Profissional (s) executor(s):**				
Local do Serviço:	**Local de Aplicação:**				
REQUISITOS PARA VERIFICAÇÃO	**LAUDO DA INSPEÇÃO**				
V: APROVADO **X**: REPARADO/RETRABALHADO/NEGAÇÃO	Área comum do pavimento	Nº do apartamento	Nº do apartamento	Nº do apartamento	Nº do apartamento
	Data de início	Data de início	Data de início	Data de início	Data de início
	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /
01- Assegurado à ausência do som "oco" (após 24h)	V X	V X	V X	V X	V X
02- As pastilhas estão niveladas, planas e com requadros nas janelas?	V X	V X	V X	V X	V X
03- Foi verificada a ausência de dentes e saliências entre as peças? (régua de alumínio)	V X	V X	V X	V X	V X
04- Foi feito a limpeza da base para aplicação do mastique elástico nas juntas de controle?	V X	V X	V X	V X	V X
05- Está assegurado que não há falta nem excesso de rejunte?	V X	V X	V X	V X	V X
06- Está assegurado que não houve deslocamento das pastilhas e nem remoção do rejunte na remoção completa do papel?	V X	V X	V X	V X	V X
07- As pastilhas foram limpas? (sem restos de papel, cola e manchas de rejunte ou massa)	V X	V X	V X	V X	V X
Data de término	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /
OBSERVAÇÕES E AÇÕES:					
VERIFICADOR	ASSINATURA ENGENHEIRO DA OBRA				

Figura 9: FVS para Revestimento Cerâmico em Fachada

3.1.2 RELATÓRIO DE NÃO CONFORMIDADE (RNC)

Conhecido pela sigla RNC, o relatório de não conformidade é uma ferramenta de controle de gestão da qualidade e que opera como um registro de eventuais desvios encontrados na inspeção de um serviço e apontados na FVS. São erros que geram retrabalho e correção posterior.

O RCN possibilita a realização de um histórico daquele serviço executado, bem como de todas as suas etapas, identificando o erro e as ações de correção necessárias.

Essa ferramenta é comumente aplicada após as análises dos dados produzidos pelas Fichas de Verificação, já que permitem a junção de todas as não conformidades em um relatório, com novas estatísticas para novas análises e buscas de soluções.

RS-001 VER:.0		RELATÓRIO DE NÃO CONFORMIDADE	Nº	
			DATA:	
		AÇÃO CORRETIVA/AÇÃO PREVENTIVA/MELHORIA	FOLHA	

REGISTRO				
TIPO DE NÃO CONFORMIDADE	○PROCESSOS/PRODUTO NÃO CONFORME		○RECLAMAÇÃO DO CLIENTE	
CLIENTE/FORNECEDOR			OF:	
EMISSÃO	SETOR:	CADASTRO	SETOR:	
	RESPONSÁVEL:		RESPONSÁVEL:	

DESCRIÇÃO

Figura 10: FVS para Revestimento Cerâmico em Fachada

4 CONCLUSÕES

A maior parte das construtoras brasileiras de edificações prediais, do padrão mais simples ao mais rebuscado, trabalha sob o sistema de empreitada de serviços, em que terceiros executam o serviço.

Trata-se de uma forma de se terceirizar não somente os custos de encargos trabalhistas, mas, também, o risco da execução, geralmente com cronogramas apertados, imputando os eventuais custos do retrabalho à própria empresa contratada.

Uma equipe do setor de qualidade da obra, da construtora, executa a inspeção dos serviços, preenche as FVS, emite as RNC´s e o empreiteiro terceirizado arca com os custos desta correção. O processo finaliza com a baixa das RNC´s, quando resolvidas em campo pelo empreiteiro terceirizado.

A consequência é uma economia de custos com a gestão da qualidade, haja vista que a análise dos desvios não ocorre, impedindo um ciclo virtuoso de melhoria contínua. As causas raiz de problemas relacionadas aos 6M´s, obtidas pelo Diagrama de Ishikawa, não acontece. Nem a empresa evolui, seja em critérios de compra de materiais e aluguel/compra de equipamentos, seja na melhoria dos procedimentos executivos e busca pela excelência, nem a empresa terceirizada, na metodologia executiva. Trata-se, portanto, de uma economia fictícia e pouco efetiva.

Uma gestão plena de qualidade envolveria o treinamento adequado - e efetivo - dos profissionais ao serem admitidos no canteiro, inclusive os terceirizados, apresentando os procedimentos de cada serviço e identificando os treinamentos necessários para cada funcionário dentro das atribuições de cada função. Tudo através da análise estatística de dados obtidos pela retroanálise de FVS´s e RNC´s.

Em um pais com as dimensões e dificuldades sociais e educacionais do Brasil, ser um profissional da construção civil não implica em ser qualificado para qualquer serviço e muitas vezes o procedimento operacional de uma construtora ou de um específico empreendimento pode exigir etapas executivas que outra construtora ou empreendimento não exijam em outro estado mais afastado.

A vasta extensão territorial, com variações de clima e materiais, gera dinâmicas executivas diferentes, para profissionais que, migram entre estados em busca de trabalho, carregando todos os vícios e dificuldades de aprendizado ao longo de sua experiência laboral.

Uma gestão para melhoria continua, que deveria incluir o terceirizado, implicaria em ir além das FVS e RNC´s – a fiscalização propriamente dita. Assim como aprendido nos processos fabris industriais ao longo do tempo, a gestão da qualidade implica em análise estatística, identificar recorrências de desvios, identificar as causas raiz das mesmas, implantar o procedimento executivo para os reparos necessários e implementar treinamentos que corrijam as ações e mitiguem os problemas na sequência da obra adiante. É a melhoria contínua.

Controlar e mitigar a repetição de erros, reduzir a variabilidade, é o conceito base do Lean Thinking que, para a Construção Civil, se traduz por Lean Construction. Se o contratante ainda não percebe a necessidade de adotar a pratica, o contratado deve entender que seu sucesso econômico financeiro, sua sobrevivência, dependerá de reduzir os erros operacionais e eliminar a repetição da ocorrência de desvios.

Se o controle estatístico conseguir ser relacionado com o peso econômico financeiro, em termos dos custos efetivos dos reparos e retrabalhos, então efetivamente a melhor decisão gerencial sobre priorização das correções será tomada. O erro “mais caro” é corrigido primeiro e na sequência o “menos caro”, que não poderá ser desprezado, pois o retrabalho sempre gera custos. A correção se dará por padronização e treinamento.

Quanto mais controlado o processo executivo através da capacitação dos profissionais, menor frequência de erros, menos chances de erros residuais não identificados ao longo do processo e que serão descobertos apenas na vistoria de recebimento do imóvel por um cliente mais atento. O custo da correção fica ainda mais dispendioso nesses casos, pois, em geral, já houve desmobilização da maior parte da equipe. Além, claro, do desgaste com os clientes poder trazer graves prejuizos para a imagem da empresa.

A correta abordagem da qualidade melhora o processo, melhora os profissionais, reduz o cronograma e as despesas e, por fim, melhora a imagem da empresa perante os clientes, pois reduz a incidência de erros de maneira global e, principalmente nas fases de entrega e pós entrega.

REFERÊNCIAS

MARSHALL Jr., Isnard. Gestão da Qualidade. Editora FGV. Edição 10ª. Rio de Janeiro, 2006.

RADFORD, G. S. The control of quality in manufacturing. Kessinger Publishing, 1922

GARVIN, D. A. Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva. Rio de Janeiro: Qmark, 2002.

SHEWART, W. A. Economic control of quality of manufactured product. New York, D. V.N.C, 1931

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

BIM PARA A GESTÃO DE ATIVOS: INTEGRAÇÃO DO BIM NA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M) DE UM ATIVO

João André Ferreira Aleixo[a]; João Pedro Pereira Maia Couto[a];

[a] CTAC-Universidade do Minho, Alameda da Universidade,4800 - 058 Guimarães Portugal

RESUMO

O setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) tem testemunhado um rápido aumento na adoção do Building Information Modeling (BIM), que está a revolucionar a forma como os ativos da construção são concebidos, construídos e geridos. Esta metodologia permite criar uma representação digital e paramétrica das características físicas e funcionais de um ativo, providenciando uma visão integral ao longo de seu ciclo de vida. A integração do BIM na gestão e manutenção de edifícios apresenta-se como uma tendência para o futuro da indústria da Operação e Manutenção (O&M) de ativos, especialmente face à crescente complexidade das construções. O BIM, como um processo integrado baseado em informação, potencializa a precisão e capacidade preventiva. Maximizar o seu potencial requer uma abordagem holística e padronizada para a gestão da informação, que possibilite a colaboração entre intervenientes e fomente a adoção de padrões de dados e requisitos de informação estruturados. A implementação de BIM Execution Plan (BEP) e o desenvolvimento de Asset Information Models (AIM), entre outros, contribuem para o aumento da eficiência dos processos de Gestão de Ativos. Este artigo procura apresentar métodos para gerir eficazmente a informação de um ativo ao longo de seu ciclo de vida, adequando os processos BIM para dar resposta às necessidades dos intervenientes da Gestão de Ativos para tornar essas atividades mais eficientes.

A integração dos intervenientes nos processos de trabalho com procedimentos estruturados para o desenvolvimento e passagem da informação de projeto constitui um passo importante para a definição de informação de valor acrescentado para as fases de Operação e Manutenção.

Palavras-chave: Gestão de Ativos, Operação e Manutenção, Building Information Modelling, Informação na Construção

1 INTRODUÇÃO

O Building Information Modeling (BIM) constitui uma metodologia de trabalho cada vez mais preponderante no âmbito das atividades da construção civil. Concebida no final da década de setenta, foi apenas no início dos anos 2000 que este conceito atingiu o consenso perante a comunidade científica(Monteiro & Martins, 2011). É definido como sendo um processo digital onde são integrados dados partilháveis, confiáveis e coordenados de acordo com a fase do projeto.

Esta metodologia de trabalho digital permite às entidades responsáveis pelo desenvolvimento dos projetos da construção civil, gerar e gerir informação relativamente a um ou vários ativos (Florez & Afsari, 2018). Deste modo toda a informação necessária para o correto entendimento dos projetos e execução dos trabalhos estará disponível para consulta, por parte de qualquer interveniente, nas fases de conceção, construção e gestão de ativos.

O BIM introduz o conceito da interoperabilidade ao longo de todo o ciclo de vida de um ativo construído. Este conceito representa a capacidade que os diferentes intervenientes têm em comunicar, de forma direta e centralizada, toda a informação relativa ao projeto em causa, ao longo de todas a fases do seu ciclo de vida (Grilo & Jardim-Goncalves, 2010).

A adoção da metodologia BIM está a crescer a um ritmo exponencial, no mercado da construção civil, uma vez que torna mais eficientes os trabalhos associados às várias fases do empreendimento, tanto ao nível de execução como também financeiro(Eadie et al., 2013). O elevado grau de qualidade e confiabilidade na troca de informação e na deteção de incompatibilidades em fases precoces dos trabalhos faz com que exista uma grande redução nos custos associados a trabalhos secundários, como reparações, correções ou ajustes(Monteiro & Martins, 2011).

A aplicação do BIM ao Facility Management (FM) permite agregar numa só base de trabalho três aspetos fundamentais para a gestão de ativos construídos. Em primeiro lugar, as pessoas, que constituem um pilar fundamental de qualquer setor profissional. Em segundo, os processos, que constituem o conjunto das atividades, e os seus consequentes resultados, que permitem o setor evoluir ativamente. Por último, e cada vez mais importante, a tecnologia, que constitui o conjunto de ferramentas que tem o objetivo de tornar mais eficientes os trabalhos realizados por diversos profissionais com intervenção nas fases de operação e manutenção de ativos. A Figura 1 ilustra a relação do BIM-FM com os domínios operacionais da gestão de ativos apresentados anteriormente.

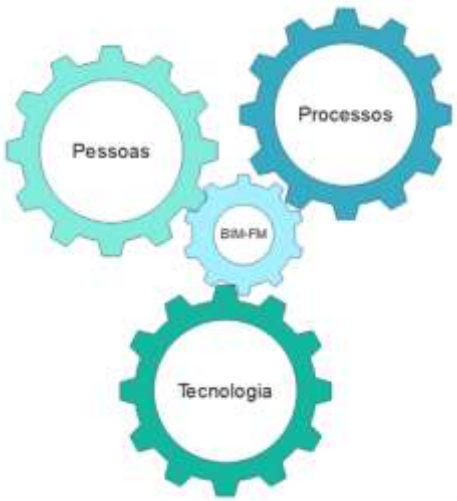


Figura 1 - Relação BIM-FM e domínios do FM

A conjugação destes pilares, fundamentais em qualquer atividade profissional, proporciona o BIM-FM um caracter integrador ao longo do ciclo de vida de um ativo construído, uma vez que possibilita a agregação de vários domínios sob a alçada de uma metodologia de trabalho centralizada, onde a consistência da informação e a eficácia da sua transmissão são mais facilmente asseguradas.

O FM constitui a fase mais extensa do ciclo de vida de um ativo, na qual é contemplada a gestão total da propriedade, plantas e recursos humanos de forma a melhorar a qualidade dos serviços prestados assim como reduzir os custos operacionais e aumentar o valor de negócio de forma a proporcionar uma vantagem competitiva do ativo em questão (Azman et al., 2014).

Tendo isto em conta, é possível compreender que a aplicação do BIM ao *Facility Management* (FM) tem o potencial de aumentar a eficiência dos trabalhos associados a esta fase dos empreendimentos. Estudos apontam para que o FM seja um setor com grande potencial de benefício na implementação do BIM, no entanto é também um dos que verifica menor investimento, tanto no setor público como no privado (Pinti et al., 2022).

Apesar das vantagens associadas à implementação do BIM no âmbito das atividades de gestão de ativos, existem ainda alguns obstáculos que atrasam a implementação total desta metodologia. A escassez de guias práticos ou referências normativas assim como de formação profissional específica, a visão pouco abrangente sobre o FM, ao longo das fases de conceção e construção, assim como a falta de definição da informação necessária para esta fase constituem os principais entraves para uma integração plena do BIM-FM (Naghshbandi, 2016).

Este artigo tem como principal objetivo o estudo e apresentação de metodologias que visem assegurar a integridade, e consequente transmissão da informação, para tornar mais eficientes as atividades inerentes à gestão de ativos construídos. Através da análise de estudos existentes, assim como de tecnologias e procedimentos validados no setor, é possível fazer a ligação, através da metodologia BIM, entre as ferramentas disponíveis para o mercado e os principais requisitos de informação experienciados nas fases de Operação e Manutenção (O&M).

2 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, a literatura científica tem verificado um crescimento da investigação relativamente à integração do BIM para o Facility Management. O número de publicações referentes a este tópico tem aumentado, o que valida a pertinência deste tema face ao panorama atual do setor AECO.

As publicações existentes têm defendido a capacidade do BIM melhorar o desempenho da gestão de ativos(Gao & Pishdad-Bozorgi, 2019), auxiliar nas tomadas de decisão e racionalizar o fluxo de informações entre operações de O&M(Pinti et al., 2022). A implementação do BIM introduz ganhos consideráveis ao nível dos custos operacionais, tempos de resposta e recursos para tomadas de decisão assim como ao nível da colaboração e atualização da informação, entre outros aspetos.(Aziz et al., 2016).

Apesar disto, ainda existem espaços de pesquisa que necessitam de ser abordados, nomeadamente ao nível da implementação de formatos de dados padronizados (Florez & Afsari, 2018), para fomentar a interoperabilidade da informação (Li et al., 2022) e também o desenvolvimento de estratégias para integrar a metodologia BIM no âmbito dos fluxos de trabalho associados ao Facility Management (Oliveira et al., 2024).

Este artigo visa contribuir para a difusão de metodologias que permitam orientar a informação gerada para as fases de Facility Management. A análise do estado da arte, em relação a diferentes procedimentos de contratualização BIM, permite compreender de que forma os intervenientes neste processo podem contribuir para a criação e transmissão de informação relevante para as atividades de operação e manutenção. Este estudo aborda a aplicação prática destes procedimentos como ferramenta de reunião entre os intervenientes do ciclo de vida do ativo, os processos necessários para gerar e gerir informação e também as tecnologias atuais para a operacionalização dos dados.

3 ORIENTAÇÃO DA INFORMAÇÃO BIM PARA FM

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar métodos e procedimentos para a integração do BIM desde as fases de conceção de um ativo até as fases de operação e manutenção. Para isto, serão introduzidos diferentes conceitos, relacionados com atividades e usos específicos da metodologia BIM, e extrapolados os benefícios da sua implementação para os trabalhos inerentes à gestão de ativos ao nível da transmissão de informação.

Os conceitos apresentados ao longo deste capítulo estabelecem a ligação entre os três pilares apresentados anteriormente. É graças a estes que a especificação dos requisitos de informação, e o seu consequente cumprimento, podem ser difundidos pelos vários intervenientes de um projeto da construção civil.

O recurso a estes métodos permite orientar a informação produzida ao longo do ciclo de vida de um ativo, com especial enfâse na fase de projeto, para as necessidades experienciadas pelos intervenientes nas fases de Operação e Manutenção. O aumento da qualidade e pertinência da informação transmitida permite que as ações de O&M sejam focadas na prevenção, ou manutenção preventiva, ao invés da reação a situações adversas.

Os procedimentos que se apresentam de seguida constituem mecanismos que permitem a integração da informação produzida com recurso à metodologia BIM na totalidade do ciclo de vida do ativo. Desde as fases de conceção e construção, onde grande parte da informação sobre o ativo é gerada, até as fases de O&M, onde esta informação adquire especial valor prático.

3.1 BIM EXECUTION PLAN

O BEP é um documento elaborado pelas diversas *appointed parties* de um projeto, no qual é planeada a forma como os processos BIM serão executados, definidos os usos e objetivos BIM, perfis de responsabilidade, estratégias para a entrega de informação, entre outros aspetos (Abu Bakar et al., 2021). Este documento é essencial para a correta execução e desenvolvimento dos projetos BIM uma vez que concentra em si a resposta às necessidades de informação por parte da *appointing party*.

Face ao exposto, é evidente a importância de contemplar das fases de O&M, aquando da elaboração deste plano de trabalho. Isto constitui fator preponderante para que a informação produzida durante a conceção de um ativo seja útil para as atividades relacionadas com o FM. Para Lin et al. (2016), a definição de um BEP orientado para o Facility Management assenta nos sete aspetos apresentados de seguida:

- Criação de equipas para a implementação do BIM-FM
- Desenvolvimento da estratégia BIM-FM
- Desenvolvimento de documentos BIM-FM
- Desenvolvimento de processos BIM-FM
- Elaboração de compilações de informação BIM-FM
- Implementação de mecanismos de verificação de modelos
- Planificação da utilização de modelos BIM-FM

Estes tópicos possibilitam uma gestão mais controlada da informação necessária para as fases de O&M, assim como a difusão dos métodos e procedimentos necessários para a obtenção da mesma.

Importa introduzir no contexto do BEP a definição de outros documentos de suporte para a produção de informação BIM que seja pertinente para as fases de O&M.

O *Level of Information Need* (LOIN) representa a extensão e granularidade de informação(ISO, 2018), e constitui uma fonte de referência para os dados a contemplar durante as fases de modelação. Aqui é definida qual a informação requisitada, o seu propósito, fase e agentes que a utilizarão entre outros aspetos. Isto adquire especial relevância para o aumento do nível de maturidade dos modelos BIM. Atualmente, no Reino Unido assim como noutros países cuja implementação do BIM para FM é cada vez mais uma realidade, existem níveis de informação definidos para as várias fases de um projeto. No âmbito do FM é especialmente importante realçar o *BIM Level 6: Handover and close out* como também o *BIM Level 7: In Use / Asset Information Model (AIM)* definidos pelo governo britânico (MepBIM, 2017).

Os procedimentos expostos até aqui são essenciais para garantir que os modelos BIM produzidos durante a fase de conceção contemplam os requisitos de informação necessários para o mais eficaz planeamento das atividades de operação e manutenção, contribuindo para a otimização e valorização dos ativos construídos.

3.2 EXCHANGE INFORMATION REQUIREMENTS E ASSET INFORMATION REQUIREMENTS

Os *Exchange Information Requirements* (EIR) constituem os requisitos de informação que devem ser respeitados aquando da fase de entrega de um ativo. É neste tipo de documentos que são definidos os parâmetros de aceitação da informação assim como os procedimentos de criação da mesma (CDBB, 2020). Através da elaboração do EIR, as entidades requerentes de um projeto definem os requisitos de informação a serem respondidos pelas entidades executantes dos trabalhos de projeto.

Os EIR podem especificar os requisitos para diferentes tipos de informação a ser produzida, ou seja, definem aspetos que permitam aos vários intervenientes de um projeto compreender qual o tipo de informação que deve ser gerada, assim como o seu propósito de aplicação. Aspetos como o plano de trabalhos, o nível de informação ou detalhe requeridos, entre outros, são parâmetros a contemplar na elaboração de um EIR.

Este procedimento permite definir orientações para que a informação a ser entregue pelas equipas de projeto, na fase de *handover,* seja útil para aumentar a eficiência das fases de operação e manutenção do ativo. Compreendendo também que a eficiência das atividades do Facility Management está diretamente ligada à qualidade da informação (Jaggs et al., 2002), é possível deduzir o potencial benefício que a elaboração de um EIR robusto pode trazer nas fases de operação e manutenção de um ativo.

Como mencionado anteriormente, a falta da definição de informação para as fases de O&M de um ativo constitui um dos principais entraves ao potencial total de aplicação do BIM-FM. Neste sentido, e tendo em conta o exposto até aqui, o EIR apresenta-se como uma solução que pode permitir superar este desafio.

Neste sentido, o *Asset Information Requirements* (AIR) surge como um complemento essencial a considerar para a orientação da informação para as atividades de operação e manutenção de um ativo construído. Este documento contém o registo dos equipamentos e sistemas instalados e pode detalhar

os dados operacionais, informação sobre tarefas de manutenção e registos de conformidade e segurança.

A combinação do EIR e AIR permite a criação de um fluxo de trabalho integrado que contempla a definição de requisitos de informação e assegura a entrega de dados que suportem, de forma eficaz, os trabalhos associados à operação e manutenção.

A Figura 2 exemplifica uma definição de requisitos de informação a contemplar para o desenvolvimento de modelos BIM orientados para o Facility Management.

The requirement of detail information for BIM-FM model			
Number: Staff fill out the form:		Date: Version:	
Profile	Basic information	System class	☐
		Equipment name	☐
		Developing BIM model of equipment	☐
		Appearance description (word)	☐
		Appearance example (picture)	☐
Model parameters	Geometric information	Size (length · width · height)	☐
		Material	☐
		Elevation	☐
		Special detail of model (word/ picture)	☐
	Equipment detail information	Equipment number	☐
		Omnicalss number	☐
		Brand/Manufacturer	☐
		Location (area/floor)	☐
		Price	☐
		Purchase date	☐
		Responsible unit	☐
		Responsible person	☐
		Equipment specification	☐
		Equipment type	☐
		Equipment functions	☐
		Equipment units	☐
		Equipment professional information	☐
External links information	Supplementary information	Warranty	☐
		Assembly process	☐
		Operation manual	☐
		2D drawing	☐
		Equipment performance table	☐
		Manufacture information	☐
	Maintenance records	Equipment resume	☐
		History maintenance records	☐
		Checklist	☐
		Record book of maintenance staff	☐
		Maintenance schedule	☐

Figura 2 - Estruturação de requisitos de informação para o BIM-FM (Retirado de Lin et al., 2016)

3.3 ASSET INFORMATION MODEL

A convergência do fluxo de trabalho BIM entre as várias equipas de trabalho, durante as fases de conceção e construção dos ativos, resulta na elaboração de *Project Information Models* (PIM). Estes

modelos resultam da federação dos vários modelos de especialidade onde está reunida a informação gráfica, não gráfica e documentação requerida pelos requisitos de informação estabelecidos. Aquando da conclusão dos trabalhos de conceção e construção do projeto, a informação relevante para as fases operacionais do ativo pode ser extraída dos PIM de forma a filtrar os dados mais pertinentes. Este procedimento dá origem ao *Asset Information Model* (AIM), que constitui a base central da informação necessária para as atividades inerentes à gestão de ativos (NBS, 2017).

Este modelo agrega informação mais detalhada sobre o ativo, como a identificação e dados operacionais dos equipamentos, rotinas e tarefas de manutenção, ocupação de espaços, entre outros, que adquire especial importância no âmbito do Facility Management. A Figura 3 resume o desenvolvimento dos AIM orientados para o FM, tendo em conta os requisitos de informação definidos pelo EIR.

Figura 3 - Fluxo de desenvolvimento do AIM para o FM (Retirado de Lin et al., 2016)

Face ao exposto, é possível entender que o AIM constitui um repositório de informação centralizado que reúne os dados provenientes de diferentes entidades com intervenção ao longo de todo o ciclo de vida de um ativo construído. O AIM pode ser visto como um modelo que agrega a informação contemplada em documentos como compilações técnicas ou telas finais, cujas origens são muitas vezes dispersas e de formatos variados.

Esta capacidade agregadora, associada a implementação de formatos abertos para a recolha e armazenamento da informação, garante a interoperabilidade de informação entre as principais ferramentas disponíveis para o mercado. A utilização de padrões de dados como o *Industry Foundations Class* (IFC), para os modelos, e *Construction Operations Building Information Exchange* (COBie), para a partilha de informação não gráfica, permite que a informação seja utilizada em diferentes plataformas de trabalho(NBS, 2017) (Florez & Afsari, 2018).

O desenvolvimento dos AIM apresenta-se como uma metodologia que permite superar as dificuldades ao nível da dispersão, redundância e falta de interoperabilidade da informação para FM como também permite o transporte da informação e dados de um ativo para ferramentas e *softwares* de gestão de ativos(Ismaeil, 2024).

4 METODOLOGIAS E PROCEDIMENTOS

Este capítulo tem como objetivo a sintetização e demonstração da aplicabilidade prática dos conteúdos apresentados anteriormente. Uma vez delineada a estratégia para a integração do BIM no âmbito do FM, torna-se necessário compreender como a informação gerada e gerida com recurso ao BIM pode ser utilizada para aprimorar as práticas do Facility Management.

Em primeiro lugar, a informação BIM permite o desenvolvimento de planos de manutenção preventivos mais detalhados. A identificação dos equipamentos e componentes que necessitam de atividades de manutenção recorrentes permite planear a manutenção de forma mais controlada e precisa. Além disto, graças ao carater agregador do BIM aplicado para o FM, é possível simular procedimentos e rotas de manutenção, que ajudam os intervenientes nesta fase do ativo a tomar decisões mais bem fundamentadas e, por consequência, reduzir os custos operacionais associados a estas atividades (Gao & Pishdad-Bozorgi, 2019).

Além do planeamento e gestão das atividades de manutenção, o BIM-FM potencializa a eficiência da gestão de espaços de um determinado ativo durante as fases de operação. Através do rastreamento da utilização dos espaços é possível planear mudanças de layout e otimizar a alocação de recursos (Wen et al., 2020). Esta capacidade de planeamento virtual permite aos gestores de um ativo a análise de diferentes configurações sem a necessidade de alterar o estado atual do edifício.

Para além destes benefícios, a aplicação do BIM para a gestão integrada do ciclo de vida de um ativo permite rastrear e analisar o desempenho dos equipamentos instalados. Aqui são incluídos aspetos como as datas de instalação, reparações, substituições e outras ações de manutenção que permitem a identificação de padrões de falha(Eastman et al., 2017). É possível entender que esta capacidade se torna pertinente durante a extensão das fases de O&M, uma vez que permite melhorar a capacidade dos gestores de ativos em relação às operações e escolha dos equipamentos para o ativo.

A informação BIM relativa a um determinado ativo pode ser importada e utilizada em diferentes *software*s FM, no entanto, é necessário aderir à utilização de formatos de dados que garantam a interoperabilidade da informação. Por um lado, a interoperabilidade pode ser garantida através da importação de modelos em formatos proprietários. No entanto, os intervenientes estão dependentes da relação entre os *softwares* de modelação e as plataformas FM. A utilização de formatos abertos surge como uma solução eficaz para abrir o leque de alternativas. A utilização de modelos IFC assume um papel preponderante para a interoperabilidade da informação BIM em plataformas FM.

Além da utilização de modelos 3D, o *Construction Operations Building Information Exchange* (COBie), um formato de dados não proprietário para a publicação de informação não geométrica orientada para a fase de O&M, serve de veículo de transporte de dados entre os modelos BIM e várias plataformas FM. A capacidade deste formato em compendiar informação especifica dos modelos permite a importação direta destes dados para vários tipos de plataformas.

As plataformas digitais para o FM estão agrupadas em três principais tipos(Naghshbandi, 2016), os *Computerized Maintenance Management Systems* (CMMS) são os programas ou aplicações que permitem guardar a informação completa sobre um ativo, incluindo aspetos como inventário, ordem dos trabalhos, manutenções preventivas, entre outros. Estes programas trabalham como uma ligação de bases de dados em série que permitem a consulta e gestão da informação. Os *Computer Aided Facilities Management* (CAFM) são utilizados para planear e acompanhar eventos consoante o departamento de aplicação e também como ferramenta de estimativa e estudo de custos. Por fim, os *Integrated Workplace Management System* (IWMS) são todas as plataformas que combinem

funcionalidades integradas para a gestão de ativos, planeamento de espaços, manutenção de ativos, gestão de serviços e sustentabilidade.

Além da ligação com este tipo de plataformas de gestão de ativos, a aplicação do BIM para o FM abre as portas para a difusão do *Digital Twin* no âmbito do setor AECO. Através da integração dos modelos BIM com Sistemas de Gestão de Edifícios (BMS), compostos por sensores e redes comunicantes, é possível criar a representação digital, em tempo real, das condições do edifício. Apesar de ser um campo do conhecimento mais recente, esta tecnologia tem comprovado as previsões relativamente ao aumento da eficiência dos trabalhos e consequente valorização do ativo ao longo do seu ciclo de vida(Hakimi et al., 2024).

5 CONCLUSÕES

O estudo apresentado avalia metodologias que permitam a integração do BIM para o desenvolvimento de informação útil para as fases operacionais de um ativo construído. Através da reunião dos requisitos de informação, definidos pelos donos de obra em conjunto com outros intervenientes do ciclo de vida do ativo, e da sua difusão entre as equipas de trabalho é possível orientar o fluxo de trabalho tendo em conta as necessidades experienciadas pelos responsáveis pela gestão, operação e manutenção de um dado ativo.

A capacidade agregadora e de interoperabilidade proporcionada pela metodologia BIM ajuda a suprimir alguns dos principais entraves para a gestão eficiente de ativos construídos, nomeadamente a dispersão e imprecisão da informação. Além disto, a metodologia BIM aplicada ao FM constitui um veículo de transporte de dados entre as diferentes plataformas tecnologias utilizadas ao longo do ciclo de vida, tanto ao nível da conceção e execução, como também ao nível das plataformas específicas para o Facility Management.

Em suma, mais do que expor os benefícios da aplicação do BIM no âmbito do FM, este artigo procura dar a conhecer métodos que permitam a diferentes intervenientes potencializar a rentabilidade dos trabalhos desta fase, potencializado a valorização dos ativos construídos.

REFERÊNCIAS

Abu Bakar, A. R., Haron, A. T., & Rahman, R. A. (2021). Building Information Modelling Execution Plan (BEP): A Comparison of Global Practice. *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, *7*(2), 63–73. https://doi.org/10.15282/ijets.7.2.2020.1005

Aziz, N. D., Nawawi, A. H., & Ariff, N. R. M. (2016). Building Information Modelling (BIM) in Facilities Management: Opportunities to be Considered by Facility Managers. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *234*, 353–362. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.252

Azman, N., Nor, M., Mohammed, A. H., & Alias, B. (2014). *Facility Management History and Evolution* (Vol. 5, Issue 1).

Centre for Digital Built Britain (CDBB). (2020). *Exchange Information Requirements (EIR) - Guidance*.

Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., & McNiff, S. (2013). BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Automation in Construction*, *36*, 145–151. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2017). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*.

https://books.google.pt/books?id=-GjrBgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Florez, L., & Afsari, K. (2018). Integrating facility management information into building information modelling using COBie: Current status and future directions. *ISARC 2018 - 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things*. https://doi.org/10.22260/isarc2018/0116

Gao, X., & Pishdad-Bozorgi, P. (2019). BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review. In *Advanced Engineering Informatics* (Vol. 39, pp. 227–247). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.01.005

Grilo, A., & Jardim-Goncalves, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*, *19*(5), 522–530. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003

Hakimi, O., Liu, H., & Abudayyeh, O. (2024). Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. In *Frontiers of Engineering Management* (Vol. 11, Issue 1, pp. 32–49). Higher Education Press Limited Company. https://doi.org/10.1007/s42524-023-0254-4

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. www.iso.org/iso/foreword.html.

Ismaeil, E. M. H. (2024). Asset Information Model Management-Based GIS/BIM Integration in Facility Management Contract. *Sustainability (Switzerland)* , *16*(6). https://doi.org/10.3390/su16062495

Jaggs, M., Palmer, J., Graves, H., & Watson, M. (2002). *A Protocol for Handing over Buildings*.

Li, C. Z., Zhen, Y., Wu, H., Chen, Z., Xiao, B., & Tam, V. W. Y. (2022). THE APPLICATION OF BIM IN THE AECO INDUSTRY. *Journal of Civil Engineering and Management*, *29*(3), 202–222. https://doi.org/10.3846/jcem.2023.18076

Lin, Y.-C., Chen, Y.-P., Huang, W.-T., & Hong, C.-C. (2016). *Developing the Framework of BIM Execution Plan for Facility Management*.

MepBIM. (2017). *Level of Detail BIM | Level of Development BIM | LOD Revit*. https://www.mepbim.com/building-information-modeling/bim-level-of-development/

Monteiro, A., & Martins, J. P. (2011). *Building Information Modeling (BIM)-teoria e aplicação*.

Naghshbandi, S. N. (2016). *Civil Engineering Journal BIM for Facility Management: Challenges and Research Gaps* (Vol. 2, Issue 12). www.CivileJournal.org

NBS. (2017). *What is the Asset Information Model (AIM)?* https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-the-asset-information-model-aim

Oliveira, A., Granja, J., Bolpagni, M., Motamedi, A., & Azenha, M. (2024). DEVELOPMENT OF STANDARD-BASED INFORMATION REQUIREMENTS FOR THE FACILITY MANAGEMENT OF A CANTEEN. *Journal of Information Technology in Construction*, *29*, 281–307. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.014

Pinti, L., Codinhoto, R., & Bonelli, S. (2022a). A Review of Building Information Modelling (BIM) for Facility Management (FM): Implementation in Public Organisations. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 3). MDPI. https://doi.org/10.3390/app12031540

Wen, Y., Tang, L. C. M., & Ho, D. C. W. (2020). A BIM-based space-oriented solution for hospital facilities management. *Facilities*, *39*(11–12), 689–702. https://doi.org/10.1108/F-10-2019-0105

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DE PRODUCT DATA TEMPLATES NO SETOR DA CONSTRUÇÃO EM PORTUGAL

João André Ferreira Aleixo[a]; João Pedro Pereira Maia Couto[a];

[a] CTAC-Universidade do Minho, Alameda da Universidade,4800 - 058 Guimarães Portugal

RESUMO

O constante aumento da complexidade dos ativos construídos, associado à digitalização do setor da construção, potencializa a adoção de formatos que consolidem informações específicas dos sistemas e equipamentos instalados num ativo construído. Os *Product Data Templates* (PDT) surgem como ferramentas importantes que permitem padronizar, gerir e tornar interoperável a informação de equipamentos e sistemas técnicos, ao longo do ciclo de vida de um ativo. Estes modelos de dados facilitam a recolha, organização e transmissão de dados desde a produção e fase de projeto até a operação e manutenção. Além disto, permitem uma seleção criteriosa de produtos, padronizando informações e estabelecendo comunicação entre os diversos intervenientes, como fabricantes, distribuidores, projetistas e técnicos. Estes modelos de dados podem contribuir para soluções construtivas mais sustentáveis ao integrar dados sobre origem, transporte, sustentabilidade e desempenho dos equipamentos. No entanto, a adoção dos PDT enfrenta desafios, como a padronização da transmissão de informações e a integração desses padrões nos fluxos de trabalho da indústria da construção. Este artigo visa introduzir os PDT e explorar os seus benefícios na transformação digital do setor em Portugal, discutindo o seu desenvolvimento e implementação em diferentes fases do ciclo de vida dos equipamentos.

Palavras-chave: Product Data Templates, digitalização da construção, Building Information Modeling

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil constitui uma componente vital para a economia portuguesa(IMPIC, 2023), contribuindo significativamente para a criação de postos de trabalho e para o Produto Interno Bruto (PIB). À semelhança de outros países, é possível verificar que existe uma tendência para o aumento da complexidade dos ativos construídos (Luo et al., 2017), o que contribui para a necessidade de padrões de dados que potencializem a de troca de informação entre diferentes plataformas e intervenientes do ciclo de vida de um ativo. A adoção de sistemas e equipamentos cada vez mais evoluídos coloca novas necessidades ao nível da operacionalização da informação relativa a estes (Mayouf et al., 2014).

Os *Product Data Templates* constituem um formato de dados padronizado que permite agregar a informação relevante de um determinado produto ou equipamento. A norma ISO 23387 define estes padrões como estruturas normalizáveis que permitem a interoperabilidade da informação relativa a um equipamento, produto ou objeto da construção(Sibaii et al., 2022). Estes padrões permitem salvaguardar, de forma estruturada, dois dos principais domínios da informação dos sistemas, a Informação do Produto (*Product Data*) e a Informação de Projeto (*Project Data*) (Mayouf et al., 2014). Uma vez preenchidos todos os dados requeridos pelos PDTs, estes formatos dão origem a Product Data Sheets (PDS), onde estão agregadas, em função dos requisitos, todas as informações características de um determinado equipamento. Esta capacidade agregadora robustece o caráter dos PDT enquanto *Single Source of Truth* para um dado equipamento (Define Hub, 2022). A Figura 1 sintetiza a recolha de informação necessária para constituir uma Product Data Sheet.

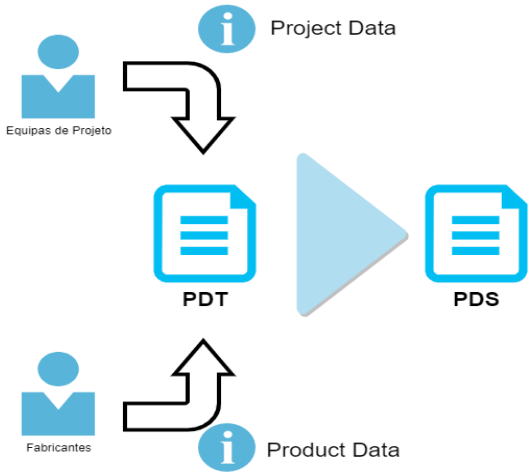


Figura 1 - Síntese de recolha de informação para PDT/PDS

Os benefícios da implementação destes padrões de dados são evidentes ao nível da organização e acessibilidade da informação (Martins & Aguiar Costa, 2018), uma vez que estes formatos permitem reunir toda a informação num documento único, consolidando dados identificativos, operacionais e também informação qualitativa, de aprovisionamento e de instalação (Mêda et al., 2021).

Além disto, os PDT apresentam benefícios ao nível da interoperabilidade da informação recolhida. Uma vez que a estruturação dos dados segue regras bem definidas, assentes numa linguagem comum, este formato de dados possibilitam a interoperabilidade da informação entre plataformas digitais, como softwares BIM, assim como entre diferentes intervenientes no ciclo de vida de um ativo (Mêda et al., 2021).

Além dos benefícios operacionais mencionado anteriormente, os PDT constituem formatos de dados abertos, o que confere aos intervenientes o controlo total da informação ao invés da utilização de formatos proprietários (Abdulkareem & Gherghiceanu, 2022).

Apesar disto, existem desafios que dificultam a implementação deste tipo de padrões de dados no âmbito da gestão da informação na construção. A falta de iniciativas de padronização, aplicáveis a todo o fluxo de trabalho, assim como a baixa difusão e compreensão dos requisitos e procedimentos definidos pela ISO 23387 são alguns dos principais obstáculos à integração destes modelos de dados.

Face ao exposto, é possível compreender que o desenvolvimento deste tipo de iniciativas deve ser de âmbito nacional, de forma a contemplar as especificidades e necessidades do setor da construção. Em Portugal existem iniciativas que visam difundir o conhecimento relativo aos PDT e a sua aplicação prática. A Comissão Técnica 197 (CT197), cujo âmbito incide sobre a normalização de sistemas de classificação, modelação da informação e processos ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos da construção em Portugal, tem contribuído para a normalização BIM do setor da construção, e tem abordado o desenvolvimento padronizado de PDTs e a sua ligação aos dicionários de dados validados pela indústria. Além disto, a plataforma *PDTs.pt*, resultante da colaboração entre projetos de investigação nacionais, constitui um repositório nacional aberto para a difusão de PDT padronizados e colaboração no desenvolvimento de novos padrões.

Este artigo tem como objetivo contribuir para a divulgação do conhecimento relativo aos Product Data Templates, e à forma como estes podem ser introduzidos no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) enquanto modelo de dados otimizado para a recolha e troca de informação em todas as fases do ciclo de vida de um ativo. Além disto, pretende-se avaliar a capacidade agregadora destes padrões de dados no âmbito do setor da construção portuguesa, integrando a comunicação e partilha de informação entre projetistas, equipas de aprovisionamento e construção assim como fabricantes e distribuidores.

2 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

O estudo sobre a implementação de *Data Templates* (DT) no âmbito do setor AECO tem verificado um aumento significativo das contribuições científicas (De Wolf et al., 2024). A publicação de novos estudos e artigos, orientados para a aplicação prática destes formatos de dados evidencia a relevância deste tópico no panorama atual da indústria AECO. Recorrendo a bases de dados de publicações científicas, como por exemplo a *SciVerse Scopus,* é possível analisar a tendência da investigação relativamente a esta temática. Através da pesquisa por publicações que contenham os termos “Data Templates” e “Construction” é possível verificar o crescimento no número de publicações, conforme apresentado na Figura 2.

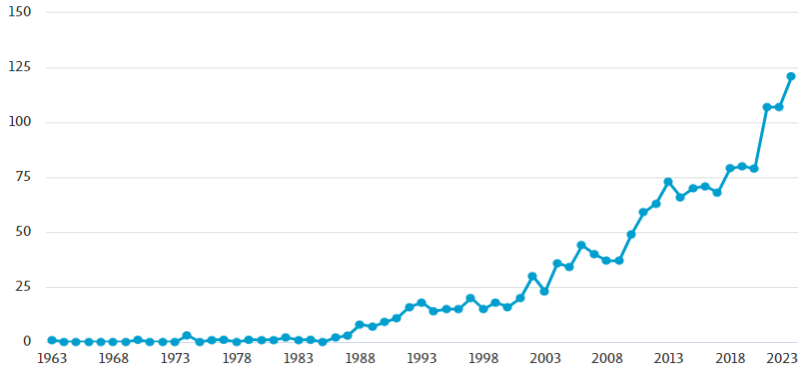


Figura 2 - Publicações por ano sobre "Data Templates" e "Construction" (Fonte: Scopus)

Os contributos científicos salvaguardados nestes repositórios evidenciam a crescente importância destes padrões de dados, nomeadamente os PDTs, no âmbito do setor da construção civil(Mêda et al., 2021). O levantamento das vantagens da estruturação de informação, evidencias sobre a facilidade de trocas de informação e orientação por padrões validados, constituem tópicos de especial destaque no âmbito destas publicações(Abdulkareem & Gherghiceanu, 2022). Além disto, é possível verificar o surgimento de iniciativas colaborativas, proporcionadas pela reunião de organismos públicos e privados. Entidades como a *National Building Specification* (NBS) e a *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE), do Reino Unido, tem representado um papel fundamental para o desenvolvimento e difusão do conhecimento relativo a estas metodologias de salvaguarda de informação.

A analise do estado da arte em relação à implementação de PDT no setor da construção permite compreender a relação simbiótica entre o Building Information Modelling (BIM) e estes formatos de dados(Martins & Aguiar Costa, 2018). A implementação do BIM, em conjunto com PDTs, facilita a padronização e interoperabilidade dos dados em projetos de construção(Kebede et al., 2022), permitindo uma gestão mais eficaz e colaborativa. Esta adoção conjunta fomenta a inovação e digitalização do setor AECO em Portugal, alinhando os desenvolvimentos com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável adotados pelos Estados-Membros das Nações Unidas.

3 ESTRUTURAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo tem como objetivo sintetizar a origem e estruturação da informação num *Product Data Template* e explorar procedimentos de implementação destes formatos de dados no âmbito do setor da construção em Portugal.

3.1 ORIGEM DA INFORMAÇÃO

O preenchimento da informação num PDT constitui um processo continuo no ciclo de vida de um equipamento e agrupa diferentes intervenientes, responsáveis por diferentes categorias de informação. O fluxo de informação inicia-se durante as fases de conceção e projeto, passando pela fase de aprovisionamento e com extensão às fases de comissionamento e execução de obra. Além disto, importa realçar que, durante as fases de operação e manutenção, a informação deve ser atualizada de forma a refletir as condições existentes no ativo (Mêda et al., 2021).

Durante a fase de projeto, considerada a primeira entrega significativa de dados, informações como os limites dimensionais dos produtos, requisitos de desempenho e sustentabilidade podem ser preenchidos. É também durante esta entrada de dados que informações específicas de projeto, como a classificação do produto ou código do ativo, devem ser adicionadas. Durante esta etapa, deverá ser solicitado aos projetistas o preenchimento destes campos de informação.

Uma vez aprovadas as soluções propostas, emitidas durante a etapa de conceção, é alcançada a fase de aprovisionamento. Aqui começa a segunda grande entrega de dados, onde informações relevantes sobre a especificação do produto são inseridas no modelo de dados. Dados sobre o fabricante dos produtos/equipamentos, modelo, características e literatura de equipamento são adicionados ao PDT. A equipa de aprovisionamento é responsável pela inserção precisa de informações sobre os produtos selecionados. Durante esta fase, existe também a possibilidade de serem efetuadas revisões de projeto e analises de valor, que podem introduzir alterações nos dados anteriormente fornecidos.

Finalmente, durante as etapas de comissionamento e construção, informações como a localização em obra, especificações de instalação e suporte, restrições de acesso e relatórios de testes são introduzidas no modelo de dados. Informações sobre garantias, manuais de operação e manutenção e tarefas também devem ser incluídas durante esta etapa. A responsabilidade no fornecimento desta informação recai sobre os subempreiteiros encarregues pela execução dos trabalhos em obra.

Os PDTs são uma fonte dinâmica de informação, o que significa que, ao longo do ciclo de vida do ativo, é possível alterar as informações inseridas nestes modelos de dados (Mêda et al., 2020), para que descrevam de forma precisa o estado real dos produtos/equipamentos dentro do ativo. Além disso, a aprovação e rejeição de diferentes soluções tem impacto direto no fluxo de gestão de dados. Este também é um aspeto valioso no que diz respeito à implementação de PDTs uma vez que estes formatos de dados são capazes de contemplar alterações que possam surgir durante as etapas de projeto e aprovisionamento.

3.2 ESTRUTURAÇÃO DA INFORMAÇÃO

De forma a garantir a interoperabilidade dos Product Data Templates, é necessário que a informação esteja alinhada com os padrões definidos por documentos normativos ou regulamentares. Aqui importa destacar a ISO 23387, que constitui os princípios e estrutura para a definição de *data templates* para objetos do setor da construção, a ISO 23386, que define a metodologia para descrever, criar e manter propriedades em dicionários de dados interligados.
A informação de um PDT é organizada com recurso a grupos de propriedades, que constituem blocos de dados organizados em função da origem dos mesmos. Desta forma é possível responder estruturalmente aos requisitos de informação estabelecidos pela entidade que desenvolve o PDT. A Figura 3 apresenta um excerto que permite visualizar parte da organização da informação num PDT.

Template Category	Luminaire			
Category Description	A lighting unit consisting of one or more electric lamps. This data is relevant to a particular Luminaire/Lamp/Louvre combination			
Information Category	Paramater Name	Value	Units	Notes
Manufacturer Data				
Specifications	Manufacturer		Text	
Specifications	Manufacturer Website		URL	
Specifications	Product Range		Text	
Specifications	Product Model Number		Text	or code
Specifications	CE Approval		Text	number, yes, no
Specifications	Product Literature		URL	
Specifications	Features		Text	Free text
Application Data				
Specifications	Luminaire Type		Text	e.g. Uplight,..
Specifications	Intended Market		Text	e.g. Residential...
Specifications	Application Environment		Text	e.g. Internal ...
Specifications	Maximum Operating Temperature		Deg C	
Specifications	Minimum Operating Temperature		Deg C	
Specifications	Emergency		Y/N	

Figura 3 - Excerto de um PDT (CIBSE)

Em primeiro lugar, no cabeçalho, é identificado o propósito do *data template*, especificando a categoria de equipamentos a que se refere, estado de maturidade, sistema de classificação, entre outros aspetos.
De seguida, são agrupados os dados provenientes do fabricante do equipamento, como identificação, contactos e suporte técnico, marca e modelo do equipamento assim como manuais de instalação e operação e certificados de qualidade.
Após isto devem ser reunidos os dados do produto, como materiais de construção, acessórios e encaixes de montagem ou instruções de configuração, por exemplo.
Além destes, a informação relativa ao desempenho dos equipamentos deve ser recolhida. Aqui podem destacar-se aspetos como tipo de consumos do equipamento, fontes de alimentação ou interdependência com outros sistemas.
Os dados geométricos e dimensões dos equipamentos também constituem um grupo de propriedades a contemplar num PDT. Aqui são também salvaguardados aspetos relativos à instalação dos equipamentos em obra e às acessibilidades necessárias para a sua correta instalação.
Os aspetos relativos à sustentabilidade do equipamento constituem um grupo de propriedades cada vez mais importante face a realidade do setor da construção. Informação acerca do ciclo de vida do equipamento, declarações ambientais e de sustentabilidade entre outros aspetos visados por guias de avaliação da sustentabilidade, como o BREEAM ou LEED por exemplo.

Finalmente, importa destacar o grupo de propriedades de operação e manutenção de ativos. Este bloco de dados constitui uma ferramenta importante para a fase de O&M uma vez que permite compendiar informação como rotinas de manutenção periódicas, garantias, tarefas de operação, entre outros aspetos relevantes para a correta operação dos equipamentos.

3.3 INTEROPERABILIDADE DA INFORMAÇÃO

A garantia da interoperabilidade da informação é um dos principais aspetos a considerar na implementação de Product Data Templates no setor da construção. A capacidade de compendiar informação sobre os equipamentos de forma estruturada e estabelecer protocolos de comunicação entre diferentes plataformas é um fator preponderante para a adoção destas metodologias.

A relação simbiótica entre os Product Data Templates e os modelos BIM constitui um paradigma de trabalho colaborativo que fomenta o enriquecimento dos objetos existentes nos modelos com informação geométrica, material e operacional precisa. Isto permite que os modelos BIM possam, não só representar as características do ativo construído, mas também simular os comportamentos funcionais em diferentes cenários de utilização.

A adesão a padrões validados para a estruturação da informação, como normas ISO e formatos como o Industry Foundation Class (IFC), são essenciais para garantir o aproveitamento da informação entre plataformas e ao longo do ciclo de vida do ativo. Aqui importa destacar, além das normas anteriormente mencionadas, padrões como a ISO 12006, que constitui uma *framework* para a informação orientada para objetos e a ISO 16739, que aborda a utilização dos ficheiros IFC para a partilha de informação na construção e gestão de ativos.

Os PDT aderentes a estes padrões são passiveis de ser utilizados para suportar a importação e exportação da informação dos equipamentos em diversas ferramentas de trabalho com recurso a metodologia BIM. A Figura 4 sintetiza a forma como o procedimento de partilha de dados entre PDTs e plataformas BIM pode ser conseguido

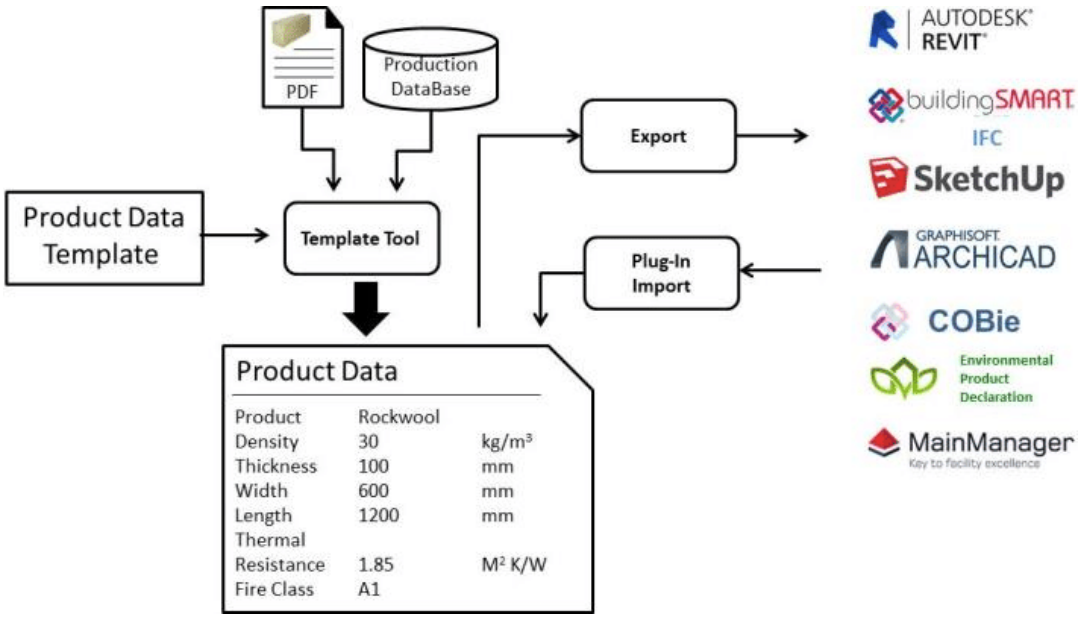


Figura 4 - Relação entre PDTs e plataformas BIM (Retirado de Pauwels & Gudnason)

4 RESULTADOS E APRENDIZAGENS

Este capítulo tem como objetivo sintetizar os principais resultados que advém da implementação dos Product Data Templates no setor AECO, nomeadamente em Portugal. Esta análise foca os potenciais benefícios ao nível da estruturação e interoperabilidade da informação, mas também aborda questões relacionadas com a sustentabilidade e rastreabilidade dos equipamentos, o impacto destes padrões nas ações de manutenção e também os desafios que existem na aplicação prática destes modelos de dados.

Tendo em conta o conteúdo apresentado ao longo deste artigo, é possível compreender que os principais benefícios da implementação dos PDT se prendem com a sua capacidade de estruturação da informação. Este aspeto possibilita que toda a informação presente nestes modelos de dados seja transportada entre diferentes intervenientes e plataformas ao longo de todo o ciclo de vida de um determinado ativo. Esta capacidade, complementada pelo alinhamento com os padrões ISO, é imperativa para garantir a interoperabilidade da informação e assim a sua reutilização em qualquer plataforma, promovendo assim uma via de comunicação padronizada entre projetistas, construtores, fabricantes, operadores e até mesmo utilizadores do ativo. Além disto a capacidade destes modelos em apresentarem fontes únicas de verdade, *Single Source of Truth,* relativas a um determinado equipamento ajuda na mitigação de ambiguidades e erros decorrentes da inconsistência de dados. Face a isto é possível de compreender que os PDT podem ajudar a melhorar a eficiência operacional das atividades da gestão de ativos, permitindo uma gestão mais eficaz e como tomadas de decisão informadas e fundamentadas em relação aos equipamentos e sistemas técnicos de um edifício ou infraestrutura. Aqui importa salientar a capacidade em contribuir para o aumento das taxas de manutenção preventiva. A centralização e parametrização da informação de operação e manutenção

dos equipamentos permite que o planeamento e os exercícios de manutenção sejam feitos com maior disponibilidade de dados, o que contribui para o prolongamento da vida útil de um ativo e para a redução de patologias e anomalias.

Estes aspetos podem convergir, em prol do interesse do setor, para a definição de bases de dados nacionais onde é reunida a informação que pode ou deve constar para a elaboração de um determinado *Product Data Template*. A partilha de conhecimento e democratização do acesso à informação constituem pilares essenciais para a evolução contínua de qualquer setor de atividade. Algumas iniciativas, como a plataforma *PDTs.pt,* apresentam-se como catalisadores para a difusão do conhecimento e da importância dos PDTs no âmbito do setor AECO nacional, através da reunião de todos os interessados em contribuir para a definição deste tipo de padrões de dados e sua consequente utilização.

Além da vertente técnica, os PDT contribuem para o aumento e difusão de práticas de sustentabilidade na construção. Um *data template* pode constituir o primeiro passo rumo a definição de Passaportes Digitais de Produto, que têm adquirido especial importância no quadro político, económico e social europeu. A capacidade de aferir a origem dos materiais ou locais de fabricação dos equipamentos, as necessidades logísticas e de transporte assim como os indicadores de desempenho ambiental confere aos intervenientes do setor AECO uma maior sensibilidade sobre quais as soluções construtivas e equipamentos que ajudam a garantir a sustentabilidade do ambiente construído.

Além dos potencias benefícios, este estudo constatou que ainda existem entraves na aplicação pratica deste tipo de padrões de dados. A padronização constitui um importante desafio para a adoção em larga escala dos PDT. A fragmentação do mercado leva a que cada organização trate a informação que dispõe de acordo como regras ou procedimentos internos, o que muitas vezes acaba por criar entraves para a comunicação entre diferentes intervenientes. Aqui surge a necessidade de tratar a informação de acordo com as práticas estabelecidas em normas ou diretrizes validadas que permitam uniformizar a parametrização dos dados. Por este motivo, a definição de processos normalizados orientados para a aplicação prática dos PDTs apresenta-se como um dos principais desafios para sua implementação em larga escala.

Outro dos desafios para a implementação dos PDTs prende-se com a sua introdução no fluxo de trabalho, uma vez que é necessário fazer adaptações aos métodos tradicionais. Isto constitui um desafio devido a resistência à mudança que se verifica no âmbito do setor AECO e também na falta de mão de obra qualificada para superar estes entraves. No entanto, a continua difusão destes padrões de dados e dos seus potenciais benefícios constitui um mecanismo importante para gerar tração dentro da comunidade técnica e científica do setor AECO.

Perante isto é possível compreender que o desenvolvimento colaborativo deste tipo de padrões de dados também constitui um desafio a superar para a sua plena implantação. A criação de PDTs eficientes requer a colaboração entre diferentes entidades, incluindo fabricantes, projetistas, construtores e operadores. Para superar este desafio torna-se necessário coordenar a participação dos diferentes intervenientes de forma a apontar para a definição de padrões de dados robustos e que possam acrescentar valor em toda a cadeia de produção do setor AECO.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu aprofundar o conhecimento relativo aos Product Data Templates e à sua possível implementação no setor AECO em Portugal. Além disto, constitui um mecanismo de

divulgação destes padrões de dados para a comunidade operacional deste importante setor de atividade.

É possível concluir que os PDTs constituem padrões de informação que podem surgir como resposta a vários desafios atuais do setor, nomeadamente ao nível de estruturação e interoperabilidade da informação relativa a equipamentos ou sistemas construtivos, facilitando a troca de informações entre diferentes intervenientes e plataformas ao longo do ciclo de vida de um ativo.

Além disto, estes padrões contribuem ativamente para a difusão de práticas de construção mais sustentáveis, algo que adquire especial importância perante a crescente preocupação ambiental que se propaga a todos os setores. A capacidade de rastreabilidade aumenta a sensibilidade dos intervenientes quanto às soluções construtivas mais sustentáveis e permite criar tração dentro do setor para o aumento de exigências ao nível da sustentabilidade.

Apesar das vantagens associadas à implementação deste tipo de padrões dos dados, existem ainda desafios latentes para a sua aplicação prática, nomeadamente ao nível da normalização dos processos de recolha e preenchimento de informação. No entanto, são cada vez mais as iniciativas que procuram estabelecer metodologias que permitam superar estes entraves e permitir a difusão dos PDTs ao longo de toda a cadeia de valor do setor AECO.

Os Product Data Templates representam uma ferramenta importante para a transformação digital do setor AECO, oferecendo uma solução robusta para a gestão de informação e promovendo a sustentabilidade e a eficiência operacional. Para garantir a sua plena implementação e maximizar os seus benefícios, é necessário um esforço contínuo de padronização, capacitação e colaboração entre todos os intervenientes do setor, contribuindo para a evolução e inovação no setor da construção em Portugal.

REFERÊNCIAS

Abdulkareem, R., & Gherghiceanu, M. (2022). *Evaluations of Product Data Template initiatives*.

De Wolf, C., Çetin, S., & Bocken, N. (2024). *Circular Economy and Sustainability A Circular Built Environment in the Digital Age*.

Define Hub. (2022). *What is a Data Template*. https://definehub.com/en/data-templates/what-is-a-data-template/

IMPIC - Instituto dos Mercados Públicos do Imobiliário e da Construção. (2023). *Relatório do Setor da Construção em Portugal 2022*.

Kebede, R., Moscati, A., Tan, H., & Johansson, P. (2022). Integration of manufacturers' product data in BIM platforms using semantic web technologies. *Automation in Construction*, *144*. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104630

Luo, L., He, Q., Jaselskis, E. J., & Xie, J. (2017). Construction Project Complexity: Research Trends and Implications. *Journal of Construction Engineering and Management*, *143*(7). https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001306

Martins, P. L., & Aguiar Costa, A. (2018). *BIM PRODUCT DATA TEMPLATES: DESAFIOS E OPORTUNIDADES*.

Mayouf, M., Cox, S., & Boyd, D. (2014). *EXPLORING DIFFERENT INFORMATION NEEDS IN BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) USING SOFT SYSTEMS*. https://www.researchgate.net/publication/283044483

Mêda, P., Hjelseth, E., & Calvetti, D. (2021). *Data Templates and Digital Building Logbooks boosting Digital Twin in Construction*.

Pauwels, P., & Gudnason, G. (2016). *SemCat: Publishing and Accessing Building Product Information as Linked Data*.

Sibaii, M. El, Granja, J., Ribeiro, R. R., Meda, P., Resende, R., Santos, J. dos, Martins, P. L., Costa, A. A., Martins, J. P., & Azenha, M. (2022). Rumo à definição de 'Product Data Templates' nacionais para aplicação generalizada em contexto BIM: Esforços da CT197. In *4º congresso português de 'Building Information Modelling' vol. 2 - ptBIM* (pp. 245–256). UMinho Editora. https://doi.org/10.21814/uminho.ed.77.21

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

VISUALIZAÇÃO DINÂMICA DE DADOS APLICADA À GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Raquel Matos[a] Ana Dinis Alves[a] Hugo Rodrigues[a] Aníbal Costa[a] Fernanda Rodrigues[a]

[a]RISCO - Research Center for Risks and Sustainability in Construction, Department of Civil Engineering (University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal; rvpm@ua.pt, anadralves@ua.pt, hrodrigues@ua.pt, agc@ua.pt, mfrodrigues@ua.pt).

RESUMO

O *Microsoft Power Business Intelligence* (BI) consiste numa plataforma de visualização dinâmica de dados que permite a respetiva gestão e análise gráfica facilitando o suporte à decisão, nomeadamente no que respeita à gestão da manutenção de ativos. Foi desenvolvida uma metodologia para efetuar a integração com os modelos de edifícios desenvolvidos segundo a metodologia BIM (*Building Information Modelling*), através da API (*Application Programming Interface*) 3DBI API. Esta incorporação permite interações dinâmicas entre a informação contida no modelo BIM e a informação do Power BI. Foram desenvolvidos *dashboards* com informação sobre anomalias, a sua extensão, o estado atual dos sistemas e a frequência das atividades de manutenção preventiva de diferentes elementos construtivos de um edifício, e efetuou-se a correlação do tipo e extensão das anomalias com o seu impacto na redução do desempenho do edifício (P_n). Esta abordagem fornece informações essenciais para se compreender quais as anomalias que influenciam mais significativamente na diminuição do desempenho do edifício. Ao revelar correlações com anomalias mais graves, a visualização ajuda a identificar os fatores críticos que contribuem para o impacto global no desempenho do edifício, facilitando a tomada de decisões específicas na gestão da manutenção. Conclui-se que a integração e inter-relação BIM-Power BI fornece uma visão holística do edifício, uma análise de dados em tempo real, uma visualização gráfica rápida, que apoia a tomada de decisões e estabelece prioridades de intervenção, evitando erros na análise de dados numéricos.

Palavras-chave: Power BI, BIM, Manutenção, Edifícios Públicos, Universitários

1 INTRODUÇÃO

A gestão de parques edificados devido ao número e extensão, tais como os associados a Campus Universitários e aos custos operacionais que lhe estão associados têm evidenciado a necessidade de implementar abordagens de gestão estratégica, nomeadamente através da incorporação de tecnologias de informação.

Este trabalho incide sobre a gestão da manutenção do parque edificado público, tendo como protótipo o Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. As metodologias aplicadas a este departamento podem ser potencialmente replicadas para distintos edifícios universitários ou edifícios com diferente uso.

Devido à complexidade do parque edificado, as metodologias apresentadas neste trabalho só são passíveis de replicação, noutros edifícios, se associadas a tecnologias de informação que auxiliem a sua implementação. Tendo isso em conta, o Power BI foi utilizado para organizar a informação derivada das metodologias de avaliação e de gestão da manutenção desenvolvidas num painel de visualização dinâmico para ajudar a gestão da manutenção de edifícios tal como explicado nas secções seguintes. Para tal efetuou-se a inter-relação de dados contidos no modelo paramétrico desenvolvido segundo a metodologia BIM (modelo 3D BIM) e a plataforma de visualização e gestão de dados Power BI. Esta incorporação permite interações dinâmicas entre a informação contida no modelo BIM e a informação do Power BI. A informação passa por um processo de transformação para estabelecer uma ligação entre o modelo BIM e os KPIs (*Key Performance Indicators*) dentro do painel de controlo do Power BI. Esta transformação garante uma visualização dinâmica e precisa, melhorando a apresentação e interpretação dos dados.

A inovação nos software de *Facility Management* (FM) visam o desenvolvimento de novas abordagens de intervenção que melhorem a qualidade de vida e a produtividade dos utilizadores (Aziz et al., 2016). A diversidade de software disponível, atualmente, é o resultado de mais de 50 anos de investigação e evolução no campo do FM. A evolução da gestão de instalações começou nos anos 70 com o Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizado (*Computerised Maintenance Management System* (CMMS)), que foi o primeiro sistema utilizado para a gestão de instalações. Em meados dos anos 80, os gestores de instalações adotaram o software de gestão de instalações assistida por computador (*Computer-Aided Facility Management* (CAFM)). Por volta do ano 2000, surgiu o Sistema Integrado de Gestão do Local de Trabalho (*Integrated Workplace Management System* (IWMS)) (Aziz et al., 2016).

O CMMS é um conjunto de sistemas informáticos que auxiliam as organizações a manter as suas operações de manutenção mais eficazes, com processamento de dados em tempo real. No entanto, limitam-se ao desenvolvimento de um registo de manutenção, ao acompanhamento das ordens de trabalho e à programação da manutenção preventiva (Besiktepe et al., 2020). O "Man Win Win" é um exemplo português de software CMMS (Man Win Win Software, 2024). O software CAFM apoia a digitalização dos processos das instalações ao longo do ciclo de vida do edifício. Permite a gestão do espaço e do local de trabalho, a gestão de ativos, a manutenção preventiva programada, os serviços operacionais, as reservas de salas e o planeamento orçamental. O CAFM integra desenhos CAD, permitindo a visualização em tempo real de uma base de dados de informação (Planon Building Connections, 2024). O IWMS é um software que unifica todas as propriedades dos edifícios numa única plataforma. Inclui a gestão de imóveis e de arrendamentos, a gestão de instalações e espaços, a gestão de ativos e manutenção, a gestão de projetos e a sustentabilidade ambiental (Teicholz, 2012). Os software Archibus e Planon são exemplos de IWMS (Planon Building Connections, 2024). Os sistemas CAFM funcionam em múltiplas plataformas tecnológicas, enquanto o IWMS se baseia numa única plataforma e num repositório de bases de dados. O CMMS, o CAFM e o IWMS são soluções de software

especificamente concebidas para o FM. Os sistemas BIM e FM servem diferentes objetivos no ciclo de vida do edifício e podem ser ligados para proporcionar um fluxo de informação contínuo, tal como se efetua no Archibus. Outro exemplo é a Plataforma de Gestão Inteligente da Manutenção (IMMP), uma plataforma centralizada para a Manutenção 5.0, tal como o software Infraspeak (Infraspeak Software, 2024). De acordo com May & Krämer, (2023) a integração das ferramentas BIM em plataformas de Tecnologias de Informação (TI) usadas em FM raramente é explorada. No entanto, esta relação pode contribuir para agilizar a prática de gestão de ativos.

A escolha de uma destas opções de software depende do âmbito e do objetivo da gestão do ativo, bem como da dimensão da organização. É essencial garantir que o software seja de fácil utilização para os utilizadores e cumpra os regulamentos. Uma caraterística comum entre estas opções de software é o facto de serem softwares pagos pelo que é importante o desenvolvimento de um painel de controlo visualmente dinâmico capaz de se ligar ao ambiente BIM, interagindo diretamente e extraindo automaticamente do modelo BIM os dados necessários para a sua avaliação e posterior gestão. A representação visual gráfica dos dados é uma forma mais simples de compreender o estado atual dos edifícios, do que uma folha de cálculo ou um relatório textual. A visualização de dados proporciona uma forma eficiente de comunicar informações de gestão, uma vez que ajuda a identificar anomalias nos edifícios, sistemas de construção em mau estado que requerem intervenção urgente e a interpretar folhas de cálculo complexas de dados (Machiraju & Gaurav, S., 2018).

A integração e interação do modelo BIM com o Power BI pode beneficiar a prática de FM. De facto, ajuda a apoiar a tomada de decisão de uma forma gráfica, o que permite reduzir o erro de visualização. Adicionalmente, o Power BI possui uma interface amigável, facilitando a sua rápida aprendizagem e implementação por parte dos profissionais de *FM*. De facto, ajuda a apoiar a tomada de decisões de uma forma gráfica, o que permite reduzir o erro de visualização. Além disso, o Power BI tem uma interface intuitiva, o que facilita a sua rápida aprendizagem e implementação por parte dos profissionais de FM. Assim, requer menos formação e recursos quando comparado com um IWMS mais complexo. O Power BI permite ainda uma elevada personalização, uma vez que permite aos utilizadores adaptar os *dashboards* e integrar características e funcionalidades adicionais para satisfazer requisitos específicos e permite uma implementação mais rápida em comparação com um IWMS (Rodrigues, F. et al., 2022). Este último pode envolver um processo de implementação mais longo e mais complexo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA

Para se atingirem os objetivos propostos foi definida a metodologia que se traduz nas cinco fases que se indicam de seguida:

1. Introdução dos dados paramétricos no modelo tridimensional desenvolvido no software Autodesk Revit (modelo Revit 3D BIM).
2. Extração de dados do modelo Revit através da 3DBI API.
3. Carregamento de dados para o *Power BI*.
4. Organização de dados no *Power BI*.
5. Visualização dinâmica no *dashboard* do *Power BI.*

2.2 ESTUDO DE CASO

A representação geométrica de parte do parque edificado do Campus Universitário de Santiago da Universidade de Aveiro, onde se insere o edifício em estudo - o Departamento de Geociências (Figura 1) - foi criada como um modelo de massas no Autodesk Revit, cujo edifício em estudo está assinalado na Figura 2.

Figura 1 – Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Figura 2 – Modelo de parte do Campus Universitário de Santiago

No âmbito do trabalho desenvolvido pelos autores, os dados obtidos para o KPI (mais precisamente o BPI – *Building Performance Indicator*, desenvolvido por Shohet (a) et al. (2003), Shohet (b), (2003), Shohet (c), (2003), e ajustado por Matos et al. (2022) e Matos et al. (2023)), durante as inspeções e o diagnóstico do edifício, foram introduzidos no modelo 3D BIM como parâmetros partilhados:

- C_n - desempenho físico atual o sistema;
- $\%Aext_n$ - Extensão da anomalia no sistema n;
- PM_n - frequência da manutenção preventiva atualmente implementada nos sistemas;
- W_n – importância de cada sistema do edifício estabelecido de acordo com o inquérito efetuado a gestores de manutenção de campi universitários (Matos et al., 2023).
- $W(C)_n$ – importância da condição da componente do sistema n.
- $W(Aext)_n$ – importância do parâmetro da extensão da anomalia no sistema n.
- $W(Pm)_n$ – importância da frequência da manutenção preventiva para o sistema n.

Estes parâmetros permitem o cálculo do desempenho de cada sistema construtivo (P_n) pela Eq. 1, que posteriormente foi integrado no cálculo do BPI:

$$P_n = C_n \times W(C)_n + \%Aext_n \times W(\%\text{Aext})_n + PM_n \times W(\text{PM})_n \qquad (1)$$

A API 3DBI foi utilizada para extrair os metadados num ficheiro .json do modelo Revit. A API 3DBI foi criada pela INFORMAXYZ BV, cuja versão é 3.1.1558.0. O 3DBI é um visualizador de modelos 3D para o Microsoft Power BI, que permite ao utilizador visualizar diretamente os dados sobre os ativos no seu contexto espacial. É possível utilizá-lo como um suplemento para o Trimble SketchUp, Autodesk Revit, ficheiros IFC. O *add-in* do 3DBI para Revit permite visualizar a geometria e os dados do modelo Revit no *Microsoft Power BI*. O Power BI permite a combinação de fontes de dados externas, tais como folhas de Excel, bases de dados com os dados BIM. Neste trabalho, toda a informação relacionada com os KPI foi obtida direta e automaticamente a partir do modelo Revit.

O ficheiro .json permitiu a importação para o Power BI da informação sobre os elementos do modelo tridimensional, bem como o seu id e propriedades, relações, sistema de classificação, parâmetros de projeto e partilhados e outros metadados. Estes dados são essenciais para a transformação dos dados numa representação interativa e também para a obtenção do modelo 3D no *dashboard* do *Power BI* (Figura 3).

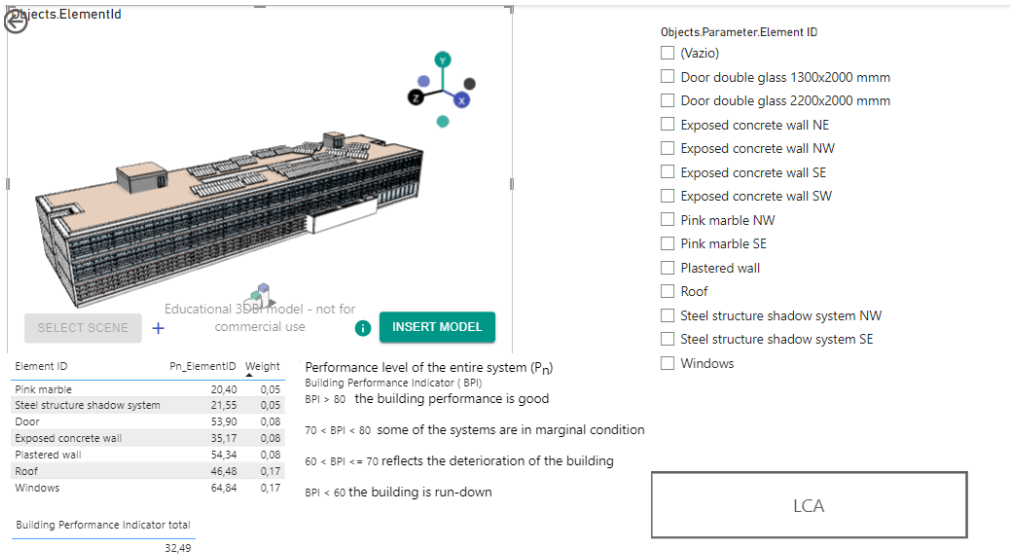


Figura 3 – Vista do Power BI com o modelo 3D BIM do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

O modelo tridimensional é interativo com todos os dados já importados para o Power BI, o que significa que ao clicar em qualquer elemento do modelo, o Power BI relaciona a informação dos restantes parâmetros com esse mesmo elemento.

A visualização dinâmica dá uma visão resumida do número de elementos diferentes que estão a ser estudados, quantas anomalias diferentes se estão a manifestar e o indicador de desempenho global também pode ser visualizado. O Power BI permite ainda a elaboração de gráficos de variáveis onde se podem verificar os principais influenciadores que causam degradação do edifício (Figura 4). Neste caso, foi elaborado um gráfico que mostra como o número e o(s) tipo(s) de anomalias influenciam a diminuição do P_n. Para este caso específico, as anomalias que mais influenciam a diminuição do P_n são a descoloração, fungos e bolores nas fachadas, a descoloração das fachadas e a corrosão na estrutura metálica do sistema de sombreamento. Os elementos que têm pior desempenho correspondem aos que apresentam as anomalias de maior extensão (Figura 5).

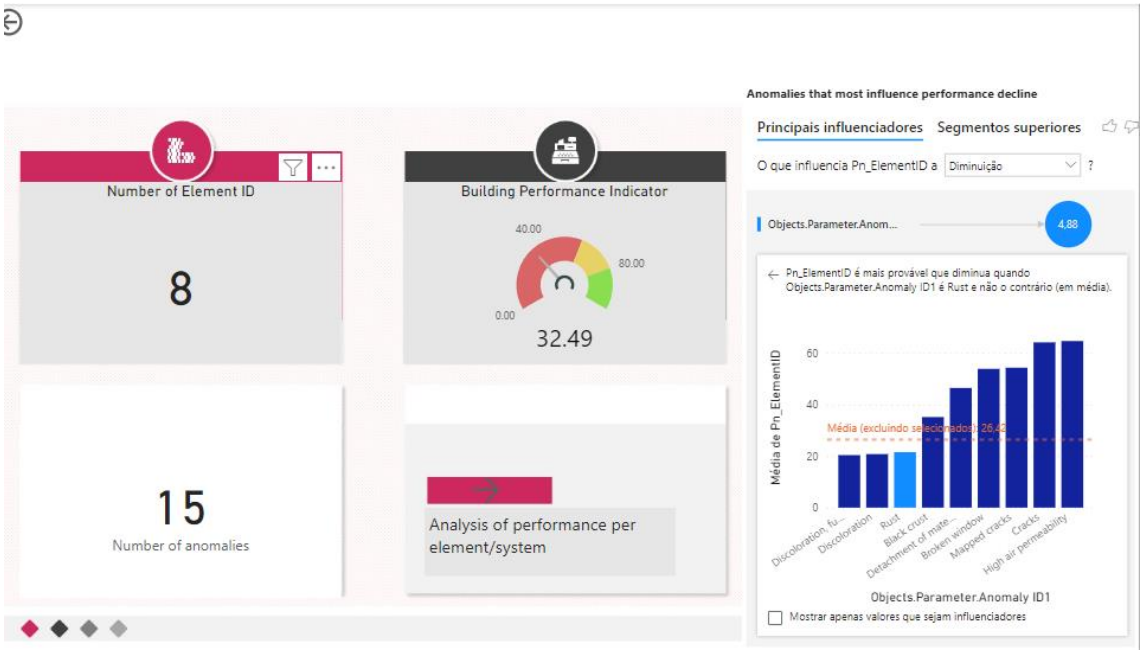


Figura 4 – Síntese de informação obtida no Power BI

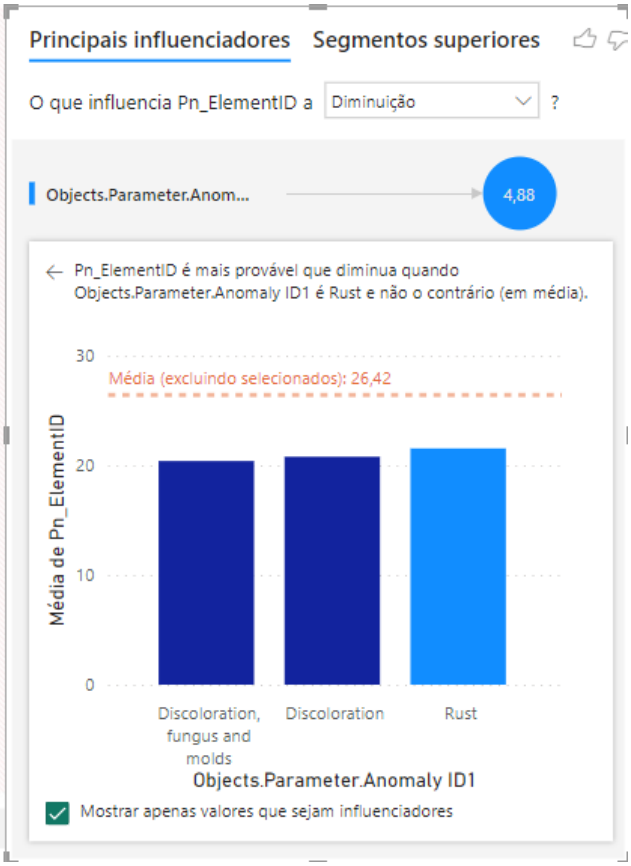


Figura 5 – Principais anomalias que contribuem para a redução de Pn

Para facilitar a análise dos dados, foi utilizado o *Tachometer* versão 3.0.1.0, desenvolvido pela Annik Inc, para apresentar a informação de uma forma que possa ser compreendida intuitivamente. Os ângulos de início e de fim, a orientação, a cor, as etiquetas e a escala dos eixos são configuráveis, o

que constitui um meio visual ideal para comunicar medidas de desempenho baixo, aceitável e elevado. Neste caso, foi utilizado para apresentar o desempenho de cada sistema do edifício. Desta forma, é fácil compreender se o sistema se encontra num estado aceitável ou se está a funcionar mal (Figura 6).

Figura 6 – Dashboard relativo ao desempenho de cada sistema do edifício

É possível perceber que os elementos em pior estado são o mármore rosa e a respetiva estrutura metálica do sistema de sombreamento, seguido da parede de betão aparente. Este facto é coincidente com os elementos onde se apresentam os principais influenciadores de anomalias na Figura 4, uma vez que se verifica uma elevada extensão de descoloração no mármore rosa, bem como corrosão na estrutura metálica do sistema de sombreamento.

3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os dados introduzidos no Revit, sem a representação gráfica fornecida pelo Power BI, não seriam facilmente comparáveis devido à quantidade e complexidade de dados a interpretar. A extração de valores do Revit, utilizando o plug-in 3DBI, permite uma atribuição mais precisa dos valores Cn, quase por elemento, no modelo Revit.

No entanto, o valor do BPI obtido e apresentado pelo Power BI (32,49) indica um estado do edifício que varia entre degradado e perigoso, alinhando-se com a avaliação previamente calculada sem recursos à integração modelo BIM-Power BI. A análise da plataforma dinâmica revela ainda quais são as anomalias mais gravosas para o desempenho do edifício, que é fortemente condicionado pelos sistemas construtivos que apresentam anomalias mais extensas.. Destacam-se as anomalias presentes em toda a estrutura de aço do sistema de sombreamento, descoloração de uma parte significativa das placas de mármore rosa no sistema de sombreamento, descoloração, fungos e bolores, bem como uma crosta negra numa grande parte da fachada principal e das placas de mármore rosa. Verificou-se que os resultados obtidos para o P_n estão de acordo com os valores obtidos previamente através da análise numérica, na qual o sistema de sombreamento e a parede de betão apresentam os valores mais baixos de P_n, seguidos pelo sistema de cobertura, portas, parede rebocada e janelas, por ordem decrescente de valores de P_n.

4 CONCLUSÕES

O Microsoft Power BI foi utilizado neste trabalho como uma ferramenta para apresentar resultados de forma dinâmica para apoiar as práticas de FM. Serviu como uma alternativa ao software CMMS, CAFM ou IWMS. É uma ferramenta gratuita, facilmente personalizável e de fácil utilização, que requer uma formação mínima em comparação com outros softwares de FM. Apesar da sua simplicidade, o Power BI transforma eficazmente informação extensa em gráficos que podem desempenhar um papel decisivo na tomada de decisões em FM. Neste trabalho, o modelo BIM foi incluído no *dashboard* do Power BI através da API 3DBI. Este modelo interage com a informação presente no Power BI, incluindo detalhes sobre as anomalias, a sua extensão, o estado atual do sistema e a frequência da manutenção preventiva. De forma a agregar o modelo BIM aos KPIs, procedeu-se à transformação da informação para se obter uma visualização dinâmica e precisa. Assim, após a importação dos dados para o Microsoft Power BI, seguiu-se a criação de gráficos e diagramas que melhoram a legibilidade da informação. Neste estudo de caso específico, a visualização gráfica foi adotada para facilitar a apresentação do número total de diferentes elementos modelados, a variedade de anomalias e a classificação geral do KPI selecionado -o Building Performance Indicator.

Além disso, foi possível relacionar o tipo e a extensão das anomalias com o seu impacto na redução de P_n. Esta abordagem ajuda a compreender quais as anomalias que mais influenciam na redução do desempenho do edifício, revelando uma relação direta com as anomalias mais graves.

Foi também utilizada a representação gráfica do tacómetro, permitindo uma avaliação visual do desempenho de cada sistema construtivo. Esta representação gráfica permite uma visualização rápida, auxiliando na tomada de decisões e no estabelecimento de prioridades de intervenção. Ajuda a evitar erros de visualização que podem ocorrer na análise de dados numéricos.

Financiamento:

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fulbright Scholarship Program PS00342214, atribuída à primeira autora (R. Matos). Este trabalho foi financiado pelo Governo Português através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) e o Fundo Social Europeu através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/147532/2019, atribuída à primeira autora (R. Matos). Este trabalho foi parcialmente financiado Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT)-Aveiro Research Centre for Risks and Sustainability in Construction (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020].

REFERÊNCIAS

Aziz, N. D., Nawawi, A. H., & Ariff, N. R. M. (2016). ICT Evolution in Facilities Management (FM): Building Information Modelling (BIM) as the Latest Technology. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *234*, 363–371. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.253

Besiktepe, D., Ozbek, M. E., & Atadero, R. A. (2020). Computerized Maintenance Management System Data Utilization in Facility Management Introduction and Purpose. *Istanbul Technical University*, *November*, 12–14.

Infraspeak Software. (2024). *“ Meet infraspeak ” available at https://infraspeak.com/en/about- us accessed on 30 January 2024*.

Machiraju, S., & Gaurav, S. (2018). *Power BI Data Analysis and Visualization*.

Man Win Win Software. (2024). *“ Man Win Win software:sobre nós ” available at https://www.manwinwin.com/pt/empresa-de-software-de-manutencao/ accessed on 30*

January 2024.

Matos, R., Rodrigues, H., Costa, A., & Rodrigues, F. (2022). *Building Condition Indicators Analysis for BIM-FM Integration*.

Matos, Raquel, Rodrigues, H., Costa, A., Requejo, C., & Rodrigues, F. (2023). Facility manager perspectives on building condition assessment for Portuguese higher education institutions. *Building Research and Information*, *51*(8), 949–964. https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2204415

May, M., & Krämer, M. (2023). BIM in Real Estate Operations. In *BIM in Real Estate Operations*. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40830-5

Planon Building Connections. (2024). *" CAFM | Computer Aided Facility Management " available at accessed on 30 January 2024*. https://planonsoftware.com/us/glossary/cafm/

Rodrigues, F., Alves, A., & Matos, R. (2022). *Construction Management Supported by BIM and Business Intelligence Tool*.

Shohet (a), I. M., Lavy-Leibovich, S., & Bar-On, D. (2003). Integrated maintenance monitoring of hospital buildings. *Construction Management and Economics*, *21*(2), 219–228. https://doi.org/10.1080/0144619032000079734

Shohet (b), I. M. (2003). Key performance indicators for maintenance of health-care facilities. *Facilities*, *21*, 5–12. https://doi.org/10.1108/02632770310460496

Shohet (c), I. M. (2003). Building evaluation methodology for setting maintenance priorities in hospital buildings. *Construction Management and Economics*, *21*(7), 681–692. https://doi.org/10.1080/0144619032000115562

Teicholz, E. (2012). Technology for facility managers: The impact of cutting-edge technology on facility management. In *Technology for Facility Managers: The Impact of Cutting-Edge Technology on Facility Management*.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A GESTÃO DE RISCOS EM EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO BRASILEIRAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

Renato Nunes Campos Júnior[a,b]; Cristina Guimarães Cesar[b]; Rui Alexandre Figueiredo de Oliveira[a]

[a] (ESTIG, IPB, Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, 5300-253, Bragança, Portugal - PT), roliveira@ipb.pt, nunescamposjunior@gmail.com

[b](CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Avenida Amazonas nº 5253, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil), cristinagcesar@gmail.com, nunescamposjunior@gmail.com

RESUMO

O mercado da construção civil enfrenta intensas mudanças tecnológicas. Em um mercado com elevada competição, a gestão de riscos se insere como uma das principais estrátegias de gerenciamento para grandes projetos de construção, auxiliando as construtoras em tomadas de decisões fundamentadas. Neste contexto, este estudo teve como objetivo identificar os principais fatores de risco nas construtoras brasileiras certificadas como nível A do PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat) na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Esses riscos foram obtidos a partir do mapeamento de artigos científicos e foram agrupados em seis categorias, nomeadamente: financeiro, gestão, técnico, ambiental, legal e sociopolítico. Para levantamento dos dados utilizados neste estudo foi aplicado um questionário online com técnicos de construção, com diversas funções em empresas de construção na região metropolitana de Belo Horizonte. Os resultados obtidos apresentaram a influência dos riscos financeiros, gerenciais e técnicos nas construtoras, onde destaca-se a "variação da taxa de juros" o risco que apresentou o maior nível em média, moda e mediana. Os resultados alcançados foram satisfatórios e contribuem para um avanço nos estudos de gestão de riscos.

Palavras-chave: Gestão de riscos, construção, empresas de construção, gestão de obras.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo tem passado por constantes mudanças nas relações sociais, empresariais e humanas. Esse cenário, cada vez mais dinâmico, demanda das empresas uma maior flexibilidade, profissionalismo e capacidade de atender às necessidades de seus clientes. Deste modo, o gerenciamento de projetos surge como um conjunto de ferramentas que permita às empresas atingirem seus objetivos, ao mesmo tempo que controla os riscos inerentes a esses ambientes (Vargas 2018; Ramos *et al.* 2019).

O Project Management Body of Knowledge (PMBOK) elaborado pelo Project Management Institute (2014), estabelece que o gerenciamento dos riscos do projeto se dão por: planejamento de gerenciamento, identificação, análise qualitativa, análise quantitativa, planejamento de respostas e controle dos riscos. Segundo Al-Bahar e Crandall (1990), os riscos abrangem diversos significados, resultando em diferentes abordagens e situações. Os autores definem risco como a "exposição à ocorrência de eventos que afetam positivamente ou negativamente os objetivos de um projeto devido a incerteza". Esses efeitos podem ser classificados como oportunidades ou ameaças, respectivamente (ABNT 2018; Project Management Institute 2014).

Para Aldeen e Naimi (2024), a gestão de riscos é uma das principais estrátegias de gerenciamento para grandes projetos de construção, sendo incluída aos processos de gerencimento do setor. A vantagem de adotar uma gestão de riscos está na possibilidade de tomar decisões fundamentadas, visto que qualquer organização sofre influência de fatores internos e externos que podem afetar seus objetivos propostos (ABNT 2018). Diante disso, para Yousri *et al.* (2023) a gestão de riscos de projetos tem como objetivo maximizar a probabilidade e efeitos de eventos benéficos à empresa e a minimização da probabilidade e efeitos decorrentes que são negativos à mesma.

O mercado da construção civil enfrenta intensas mudanças tecnológicas e no Brasil, o setor apresentou um crescimento significativo no período entre 2008 e 2014, gerando um ambiente altamente competitivo e uma queda na qualidade dos produtos ofertados. Atualmente, o ambiente competitivo exige com que a qualidade associada a produtividade e velocidade sejam demandas das empresas e contratantes, visto que a qualidade se tornou um diferencial procurado pelos clientes (Xavier 2008, Milton Costa Junior *et al.* 2024).

O Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) é uma ferramenta do Governo Federal Brasileiro que atua como um importante impulsionador da qualidade e produtividade na habitação social do país. O programa atua em parceria com construtores, projetistas, fornecedores, fabricantes de materiais e componentes ou proponentes de sistemas inovadores para aprimorar o nível de durabilidade e segurança nas obras e modernizar o setor da construção (PBQP-H s.d.).

Para as Construtoras que querem um auxílio financeiro do Governo Federal Brasileiro durante a construções habitacionais, o PBQP-H criou o Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras da Construção Civil (SiAC). O SiAC é um sistema de certificação de gestão da qualidade direcionado exclusivamente para as construtoras. O sistema admite a certificação de construtoras em dois níveis: A e B. Sendo o nível A o mais completo, voltado para empresas que já possuem o seu Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) implementado em sua totalidade (SiAC 2023).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo identificar os principais fatores de risco que representam desafios significativos para as construtoras brasileiras certificadas com o nível A do PBQP-H na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. O estudo seguiu a seguinte estrutura: na Seção 1, apresenta uma breve introdução ao tema; a Seção 2 descreve a metodologia utilizada; a Seção 3 analisa e discute os resultados obtidos; e finalmente, a Seção 4 apresenta as conclusões obtidas.

2 DADOS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os métodos utilizados para a realização da pesquisa. De acordo com a Figura 1, observa-se que o trabalho apresenta 4 etapas: a identificação dos fatores de risco, o questionário de pré-teste, o questionário final e análise de resultados.

Figura 1 - Etapas da metodologia de investigação

2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES DE RISCO

O estudo iniciou-se com um mapeamento sobre o tema de gestão de riscos descritos por diversos autores através de artigos científicos publicados em todo o mundo. Os artigos foram selecionados de modo a identificar fatores de risco que influenciam na construção civil habitacional. Para delimitar o estudo foram descartados artigos de outras áreas ou que não se aplicavam a edifícios habitacionais. O estado da arte permitiu a separação dos fatores de risco obtidos em categorias, as quais foram identificadas e listadas de acordo com os artigos (Quadro 1).

Quadro 1 - Artigos selecionados com fatores de risco

ID	Autores	Fatores de Risco	Categorias	Foco
1	Naji et al. 2021	31	Projeto, Partes Interessadas, Engenharia e Compras	Geral
2	Deep et al. 2021	18	Financeiro, Projeto, Execução e Sociopolíticos	Residencial
3	Nguyen et al. 2021	25	Financeiro, Gestão, Cronograma, Construção e Ambiental	Geral
4	Kumar, Narayanan 2021	34	Financeiro, Gestão, Mercado, Tecnico, Legal, Político, Ambiental	Geral
5	Viswanathan, Jha 2020	25	Projeto, Empresarial, Financeiro, Político	Construções multinacionais
6	Chen et al. 2020	22	Natural, Político, Econômico, Concepção, Projeto e Construção	Contrato colaborativo e BIM

ID	Autores	Fatores de Risco	Categorias	Foco
7	Ayudhya, Kunishima 2019	32	Negócio, Econômico, Financeiro, Gestão, Físico, Legal, Ambiental, Governamental	Residencial
8	Etges, Souza 2016	11	Técnico, Econômico, Social, Político e Pessoal	Residencial
9	Nguyen, Chileshe 2015	19	Não está separado em categorias	Geral
10	Silva 2012	42	Político, Legal, Econômico, Financeiro, Social, Mercado, Natural, Contratual, Projeto	Geral
11	Zou, Zhang, Wang 2007	25	Cliente, Projeto, Contratantes, Empreiteiros/Fornecedores, Governamental e Riscos externos	Geral

Os fatores de risco obtidos nos artigos científicos foram agrupados, sendo excluídos aqueles que se repetiam em mais de um artigo. Ao todo foram elencados 122 fatores de risco que foram listados para serem aplicados em um pré-teste com especialistas da área e integrantes do grupo foco do estudo.

O estudo em questão realizou uma adaptação da divisão proposta no artigo de Kumar e Narayanan (2021) e separou os riscos em 6 diferentes categorias: financeiros, gestão, técnicos, ambientais, legais e sociopolíticos. Sendo que, os riscos financeiros são de ordem econômico-financeiro, e podem influenciar diretamente no processo de execução do projeto, podendo comprometer as atividades da empresa. Os riscos enquadrados na categoria de gestão estão relacionados à gestão de pessoas e materiais, planejamento, decisões táticas, entre outros. Entretanto, os riscos técnicos estão focalizados na engenharia técnica (projetos, construção, técnicas e tecnologias construtivas). Por sua vez, os riscos ambientais são aqueles que influenciam diretamente impactos no meio ambiente. Os riscos legais envolvem a esfera jurídica, ocorrem por leis, regulamentos ou normas. Por fim, os riscos sociopolíticos estão relacionados ao comportamento e políticas sociais e fatores governamentais.

2.2 PRÉ-TESTE

Os 122 fatores de risco obtidos na primeira etapa do trabalho foram listados no programa Microsoft Excel e exportados como uma planilha e arquivo no formato PDF. Com o intuito de identificar quais os fatores de risco eram mais importantes, os ficheiros foram enviados como teste piloto para 6 pessoas ligadas à área da construção civil, e solicitado para que cada participante atribui-se uma nota de 1 a 5, conforme a escala Likert, adaptada de João Costa Júnior *et al*. (2024), e demonstrada a seguir:

- 1: Sem importância;
- 2: Pouca importante;
- 3: Neutro (Moderadamente Importante);
- 4: Importante;
- 5: Muito importante.

Ao final dessa etapa, foi solicitado um feedback aos participantes, de modo a elaborar o questionário final da melhor maneira possível, e corrigindo eventuais falhas, omissões ou problemas do questionário, e tendo como intuito atingir o maior número participantes. Com este pré-teste foram retirados ao todo 5 fatores de risco que não faziam sentido para região metropolitana de Belo

Horizonte, ou que eram similares a outros fatores existentes, e não se enquadravam no contexto como fatores de risco relevantes. No entanto, o autor do estudo considerou pertinente, face à opinião dos inquiridos, inserir um fator de risco que não estava inicialmente presente no questionário, uma vez que não existia qualquer fator de risco relacionado ao PBQP-H.

2.3 QUESTIONÁRIO FINAL

Após a realização dos ajustes pós feedback, foi adotado um critério para agilizar o processo de gestão de riscos a incluir no questionário final. Foram filtrados os fatores de risco que obtiveram um nível de importância maior ou igual a 3.5, atendendo à escala Likert do pré-teste realizado, totalizando-se assim 70 fatores de risco finais e considerados pertinentes.

De acordo com a ABNT (2021), o nível de riscos pode ser obtido pela combinação de probabilidade e consequência. Os fatores de risco finais selecionados e presentes no questionário final foram adicionados a um formulário online (Google Forms) e solicitado aos participantes que indicassem em uma escala indicada, os níveis de probabilidade e de consequência para cada fator de risco conforme a seguir descrito:

- 1: Baixa
- 2: Moderada
- 3: Alta
- Não sei / Não se aplica

A definição por 3 níveis de escalas foi devido a estética e redução de tempo de resposta dos participantes. A definição dos níveis adotados foram de acordo com a ABNT (2021) que estabelece na matriz de probabilidade/consequência que a escala pode ter quaisquer números de pontos, sendo 3, 4 e 5 as mais comuns. O questionário final pode ser respondido por técnicos de construção, com diversas funções em empresas de construção enquadradas no estudo, enquadrando-se na amostra.

2.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados obtidos na plataforma Google Forms foram exportados para uma planilha e tratados através do software Microsoft Excel. Os níveis de riscos se deram através da Equação (1) a seguir:

$$NR = P \times C \quad \text{(equação 1)}$$

Onde, NR é o nível de risco, P é a probabilidade e C a consequência.

Além da equação, para obteção dos riscos também foi utilizado as medidas de tendência central média, moda e mediana. Onde a média é obtida pelo somatório dos riscos dividido pelo número total de respostas, a moda é número de risco que mais se repete e a mediana o valor central do conjunto ordenado (Salsa *et al.* 2007).

A ABNT (2021) descreve a matriz probabilidade/consequência para classificar os riscos baseados em seus níveis de risco. Neste estudo a matriz foi utilizada para auxiliar na comunicação e compreensão dos níveis de riscos. A Figura 2, elaborada pelo autor apresenta uma matriz 3x3 que representa a escala de níveis utilizados no estudo. Onde o vermelho representa os riscos graves, o amarelo são os riscos moderados e verdes riscos toleráveis.

Probabilidade x Consequência		Consequência		
		1- Baixo	2 - Moderado	3 - Alto
Probabilidade	3 - Alto	3	6	9
	2 - Moderado	2	4	6
	1- Baixo	1	2	3

Figura 2 - Matriz probabilidade/consequência

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Através do endereço de correio eletrónico, o Governo Federal Brasileiro forneceu aos pesquisadores quais são as empresas do Estado de Minas Gerais que possuem certificação do PBQP-H. Foi relizado um filtro com as empresas que possuem o nível A SiAC na região metropolitana de Belo Horizonte e investigado o ramo de atuação de cada empresa. Diante disso, foi observado que 77 construtoras de habitação atenderam aos critérios (amostra do estudo) e estão qualificadas para responder esta pesquisa.

O questionário foi divulgado através de mídias digitais: endereços de correio eletrónico, sítios de internet, LinkedIn e Whatsapp. Durante o período de 1 mês, o questionário obteve 28 respostas com integrantes de 18 empresas diferentes ao todo. Conforme pode ser observado na Figura 3, a maior parcela dos participantes (46,4%) estão atuando no mercado entre 5 até 10 anos, enquanto a menor parcela (21,4%) está no mercado por 10 anos ou mais.

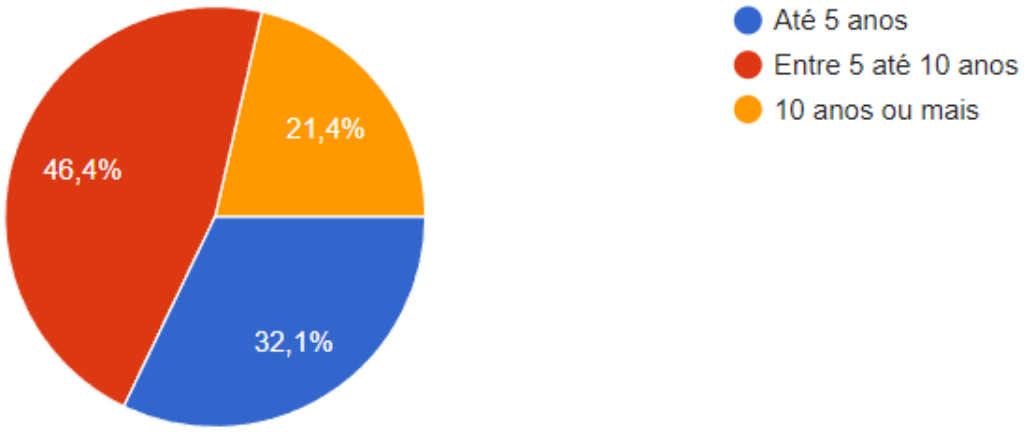


Figura 3 - Tempo de atução no mercado da construção civil

O estudo chegou a pessoas de 23 até 36 anos, sendo 30 anos a idade que mais participou com 8 respostas. Com relação ao setor de atuação dentro das construtoras, cerca de 43% das pessoas que responderam trabalham com orçamento de obras conforme a Figura 4. Esta pergunta permitiu múltiplas marcações de áreas, tendo em vista que existem empresas em que um integrante atua em mais de uma função, totalizando 37 marcações (6 participantes marcaram mais de uma área de atuação).

Figura 4 - Setor de atuação dos participantes

3.2 TRATAMENTO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

As respostas do questionário final foram agrupadas de acordo com o método explicitado na análise de dados da Seção 3. Os níveis de riscos foram obtidos através da Equação (1), o Quadro 2 a seguir apresenta as médias, moda e mediana das respostas que apresentam risco alto resultante da probabilidade e consequência (nível de risco maior ou igual a 6, representando riscos graves conforme a Figura 2).

Quadro 2 - Fatores que representam alto risco (nível de risco ≥ 6)

Categoria	ID	Fator de risco	NR (média)	Moda	Mediana
Financeiro	1.1	Variação da Inflação	7.00	6.00	6.00
	1.2	Variação da taxa de juros	7.00	9.00	7.50
	1.9	Pagamento fora do prazo pelo cliente	4.48	6.00	4.00
	1.11	Concorrência de outras empresas de construção	5.00	6.00	5.00
	1.13	Custo da mão de obra	5.96	9.00	6.00
	1.14	A renda é menor do que a esperada	4.89	6.00	4.00
	1.16	Crédito e empréstimo	6.00	9.00	6.00
	1.18	Dificuldades financeiras da empreiteira	5.89	9.00	6.00
Gestão	2.1	Utilização de materiais de baixa qualidade	4.18	6.00	4.00
	2.2	Alterações ou revisões de projeto	6.39	9.00	6.00
	2.3	Cronograma de obra inadequado	5.43	6.00	6.00
	2.4	Estabelecimento deficiente de logística	4.37	6.00	4.00
	2.5	Utilização de subempreiteiros não qualificados	4.75	6.00	4.00

Categoria	ID	Fator de risco	NR (média)	Moda	Mediana
Gestão	2.8	Atraso na execução dos subempreiteiros	6.39	9.00	6.00
	2.9	Alteração de subempreiteiros	5.57	6.00	6.00
	2.10	Má gestão de fornecedores	4.93	6.00	6.00
	2.12	Qualidade e gerenciamento de projetos inadequados	3.82	6.00	4.00
	2.13	Comunicação deficiente	5.68	9.00	6.00
	2.14	Problemas de gerenciamento interno	4.79	9.00	4.00
	2.16	Rotatividade de funcionários	5.25	9.00	5.00
	2.17	Cumprimento das metas	6.04	9.00	5.00
Técnico	3.1	Falta de mão de obra qualificada	6.21	6.00	6.00
	3.3	Execução arbitrária de uma nova atividade sem teste de aceitação das atividades anteriores	4.14	6.00	4.00
	3.6	Atraso na entrega dos projetos ao contratante	4.70	6.00	4.00
	3.9	Projetos com erros ou incompletos	4.89	6.00	4.00
	3.10	Alterações tardias de projeto pelo cliente	4.24	6.00	4.00
	3.11	Baixa produtividade da mão de obra	5.39	6.00	6.00
	3.13	Despesas muito altas no estágio inicial	4.74	9.00	4.00
	3.14	Erros operacionais e de construção	5.85	9.00	6.00
	3.15	Capacidade de inovação tecnológica	5.78	9.00	4.00
Ambiental	4.3	Regulamentações ambientais rígidas	5.30	4.00	6.00
Legal	5.3	Recusa ou atraso na aprovação do projeto	5.46	9.00	5.00
	5.4	Falta de apoio na concessão de licenças	5.08	6.00	4.00
	5.5	Aprovação tardia da mobilização do local para o contratante	4.73	6.00	4.00
Sociopolítico	6.1	Sistema governamental burocrático	5.64	9.00	6.00
	6.2	Códigos de construção	5.91	9.00	6.00
	6.4	Incentivos do governo	5.23	6.00	5.00

Conforme pode ser observado no Quadro 2, os fatores de risco que apresentaram o maiores NR se encontram na categoria financeiros, gestão e técnicos. Esse resultado mostra que além da própria atuação de engenharia, as construtoras de habitação sofrem grandes influências de fatores econômicos e gerenciais. Esse resultado pode estar relacionado ao setor de atuação dos respondentes, tendo em vista que a maior parcela dos respondentes atuam com orçamento ou planejamento de obras.

A categoria sociopolítico também é destacada tendo em vista que sua média de NR ficou entre 5 e 6 e 75% dos fatores de risco apresentaram elevados valores de moda (maiores ou iguais a 6). Deve-se

ressaltar que as categorias sociopolítico e legal foram as únicas que todos os riscos apresentaram no mínimo uma resposta de "não sei/não se aplica", isso pode estar relacionado a área de formação, já que 100% das pessoas que responderam são da área de engenharia.

A categoria ambiental não apresentou valores altos para média e moda, apenas a "Regulamentações ambientais rígidas" que apresentou uma variação grande nas respostas, aparecendo no Quadro 2 devido sua mediana.

O média e em seguida a mediana do nível de risco, os principais riscos observados para as construtoras da região metropolitana de Belo Horizonte são: a variação da taxa de juros, variação da inflação, alterações ou revisões de projeto, atraso na execução de subempreiteiros, falta de mão de obra qualificada, cumprimento das metas e crédito e empréstimo respectivamente. Os fatores restantes do Quadro 2 são importantes, mas não são críticos, possuem um risco moderado.

Os fatores de risco menos críticos foram a "celebração de contratos não padronizados" da categoria legal que apresentou moda, média e mediana do NR de 2.83, 2 e 2 respectivamente, e "dificuldade de reembolso por parte da construtora" da categoria financeiro com média, moda e mediana de 3.19, 1 e 2 respectivamente. Mesmo sendo os fatores que apresentaram os menores riscos da pesquisa, os seus valores de NR o enquadram como riscos moderados, e isso pode ser observado pela mediana que ficou no limite de risco tolerável (NR=2) em ambos.

Na categoria legal, o risco "Litígio" que significa "conflito com outra parte interessada no projeto através do sistema judicial" foi o que mais deu dúvida entre o participantes, com 7 respostas de não sei/não se aplica (25% das respostas). O fator de risco inserido pelo autor que trata-se do "Não atendimento de requisitos do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H)" foi considerado um risco moderado, com o NR de 3.44.

4 CONCLUSÕES

Os resultados consideram-se satisfatórios e contribuem para um avanço nos estudos de gestão de riscos, uma vez que todos os fatores abordados no questionário final apresentaram uma gravidade moderada ou grave. Pode-se concluir que o estudo em questão atingiu o objetivo proposto inicialmente identificando os principais fatores de risco que atuam nas construtoras brasileiras certificadas como nível A do PBQP-H na região metropolitana de Belo Horizonte em Minas Gerais.

Deve-se destacar o fator de risco "Variação da taxa de juros" que apresentou o maior NR em média, moda e mediana. Este fator de risco está relacionado ao estilo do setor que depende da taxa juros para o financiamento imobiliário, e a relação da taxa de juros com custos de materiais de construção. São também significativos os fatores de risco variação da inflação, alterações ou revisões de projeto, atraso na execução de subempreiteiros, falta de mão de obra qualificada, cumprimento das metas e crédito e empréstimo. Por outro lado, consideram-se menos expressivos a celebração de contratos não padronizados e dificuldade de reembolso por parte da construtora.

Recomenda-se para trabalhos futuros uma abordagem com uma amostra maior de respondentes, realizando o estudo em outros Estados no Brasil, e um estudo isolado para cada categoria indicada no estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT, N.I. (2018). ABNT ISO/IEC 31000: 2018. Gestão de riscos – Diretrizes. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

ABNT, N.I. (2021). ABNT ISO/IEC 31010: 2021. Gestão de riscos – Técnicas para o processo de avaliação de Riscos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Al-Bahar, J.F., Crandall, K.C. (1990). Systematic risk management approach for construction projects. Journal of construction engineering and management, 116(3):533-546. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:3(533)

Aldeen, O.S., Naimi, S. (2024). Assessment of the risk management construction projects in Turkey into 6 categories. Journal of Ecological Engineering, 25(2). https://www.jeengs.net/files/7270462947284_16.pdf

Ayudhya, B.I.N., Kunishima, M. (2019). Assessment of risk management for small residential projects in Thailand. Procedia Computer Science, 164:407-413. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.200

Chen, W., Wang, J., Wang, C. (2020). Study of risk evaluation for complex projects under BIM and IPD collaborative pattern based on neighborhood rough sets. Tehnički vjesnik, 27(2):444-449. https://doi.org/10.17559/TV-20191022112633

Costa Júnior, J.F.D., Santos Cabral, E.L.D., Souza, R.C.D., Bezerra, D.D.M.C., Freitas, P.T.D. (2024). Um estudo sobre o uso da escala de Likert na coleta de dados qualitativos e sua correlação com as ferramentas estatísticas. CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, 17(1):360-376. https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-021

Costa Junior, M.P.D., Pinheiro, S.M.D.M., Lopes, A.N., Braz, J. (2024). Atendimento aos requisitos de desempenho de vedações: Estudo de caso em empresa construtora certificada pelo PBQP-H. Revista Infinity, 9:134-155.

Deep, S., Bhoola, V., Verma, S., Ranasinghe, U. (2022). Identifying the risk factors in real estate construction projects: An analytical study to propose a control structure for decision-making. Journal of financial management of property and construction, 27(2):220-238. https://doi.org/10.1108/JFMPC-03-2020-0018

ETGES, A.P.B.D.S., SOUZA, J.S.D. (2016). Estruturação de uma metodologia para análise do risco financeiro envolvido em empreendimentos imobiliários. Revista ESPACIOS, 37(09):22.

Kumar, K.S., Narayanan, R. M. (2021). Review on construction risk and development of risk management procedural index–A case study from Chennai construction sector. Materials Today: Proceedings, 43:1141-1146. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.606

PBQP-H (s.d.). Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Governo Federal Brasileiro – GOV BR. https://pbqp-h.mdr.gov.br/

Project Management Institute (2014). A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide), pt, 5ª ed. Newton Square, PA: Project Management Institute. ISBN: 978-1-62825-007-7.

Naji, K., Gunduz, M., Salat, F. (2021). Assessment of preconstruction factors in sustainable project management performance. Engineering, Construction and Architectural Management, 28(10):3060-3077. https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2020-0333

Nguyen, P.T., Pham, C.P., Phan, P.T., Vu, N.B., Duong, M.T.H., Nguyen, Q.L.H.T.T. (2020). Exploring critical risk factors of office building projects. 8(2):309-315. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/109901/1/MPRA_paper_109901.pdf

Nguyen, T.P., Chileshe, N. (2015). Revisiting the construction project failure factors in Vietnam. Built Environment Project and Asset Management, 5(4):398-416. https://doi.org/10.1108/BEPAM-10-2013-0042

Ramos, V. das G.S., Lima, J.A. de L., De Andrade, R.C.D., De Vasconcelos, G. (2019). Uma proposta de utilização de gestão de risco para o Planejamento Acadêmico de uma Universidade Pública. Revista De Gestão E Projetos, 10(1):81–91. https://doi.org/10.5585/gep.v10i1.11000

Salsa, I.D.S., Moreira, J.A., Pereira, M.G. (2007). Medidas de tendência central: média, mediana e moda. Natal, RN: EDUFRN Editora da UFRN. ISBN 85-7273-287-X

SiAC (2023). SiAC - Sistema de Avaliação da Conformidade de Serviços e Obras. Governo Federal Brasileiro – GOV BR. https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-brasileiro-de-qualidade-e-produtividade-do-habitat-pbqp/siac-sistema-de-avaliacao-da-conformidade-de-servicos-e-obras

Silva, V.F. (2012). Análise de risco na construção: guia de procedimentos para gestão.

Vargas, R.V. (2018). Gerenciamento de Projetos 9a edição: estabelecendo diferenciais competitivos. Brasport. ISBN: 978-85-7452-903-5.

Viswanathan, S.K., Jha, K.N. (2020). Critical risk factors in international construction projects: An Indian perspective. Engineering, Construction and Architectural Management, 27(5):1169-1190. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2019-0220

Xavier, I. (2008). Orçamento, planejamento e custos de obras. São Paulo: Fupam.

Yousri, E., Sayed, A.E.B., Farag, M.A., Abdelalim, A.M. (2023). Risk identification of building construction projects in Egypt. Buildings, 13(4):1084. https://doi.org/10.3390/buildings13041084

Zou, P.X., Zhang, G., Wang, J. (2007). Understanding the key risks in construction projects in China. International journal of project management, 25(6):601-614. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.03.001

Tema 7. Patologia e reabilitação

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESTUDO DO EFEITO DE UM PRODUTO HIDRO E OLEOFÓBICO EM PEDRAS POROSAS PRESENTES NO PATRIMÓNIO CONSTRUÍDO

S. Mègre Pires[1a], A. P. Ferreira Pinto [2b], R. Machado[2c], B. Sena da Fonseca [1d]

[1] Centro de Química Estrutural-CQE, Institute of Molecular Sciences, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

[2] CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

[a] sofia.megre@tecnico.ulisboa.pt, [b] anapinto@civil.ist.utl.pt, [c] raul.l.machado@tecnico.ulisboa.pt, [d] bruno.fonseca@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A suscetibilidade à degradação de diversas variedades pétreas presentes no património construído faz com que o conhecimento do potencial desempenho de várias opções para a sua conservação seja uma importante ferramenta para prever o seu comportamento em obra, assim como para a preservação de objetos com valor cultural, histórico e artístico. Existem vários produtos e tratamentos que pretendem dar resposta a diversas necessidades da conservação, nomeadamente produtos capazes de desempenhar mais que uma função, tais como, produtos hidro e oleofóbicos, porém é frequente a utilização de solventes orgânicos na sua composição e são pouco amigos do ambiente.

Neste estudo avalia-se a potencial adequabilidade de um produto multi-função de proteção à base de água, com propriedades hidrofóbicas e oleofóbicas, quando aplicado em duas pedras porosas de natureza mineralógica distinta, um calcário (Pedra de Ançã) e um arenito (Grés de Silves). Para o efeito, procedeu-se à avaliação da potencial eficácia e das alterações de cor promovidas pelos tratamentos. A avaliação da potencial eficácia dos tratamentos recorreu à determinação do ângulo de contato à água (ação hidrofóbica) e ao óleo (ação oleofóbica), assim como à determinação da absorção de água por capilaridade. A avaliação das alterações de cor foi incluída neste estudo por ser um parâmetro relevante de compatibilidade de tratamentos de conservação em objetos de elevado valor cultural.

Os valores de ângulo de contacto evidenciaram a capacidade dos tratamentos em alterar as propriedades das superfícies de ambas as pedras relativamente ao contacto com a água e o óleo. Verificou-se também que os tratamentos promoveram uma redução significativa na taxa inicial de absorção de água e não induziram alterações de cor relevantes em ambas as pedras tratadas. Deste modo, o estudo realizado evidenciou que o produto multi-função manifestou potencial de utilização no âmbito da conservação de materiais pétreos porosos.

Palavras-chave: Pedras porosas; proteção; produtos multi-função; eficácia; sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

A constante necessidade de preservar o património para as gerações futuras, em especial do provido de valor cultural, histórico e artístico, e a preocupação referente à degradação dos materiais pétreos tem suscitado a necessidade de estudar e desenvolver soluções com o objetivo de preservar os seus valores e de prolongar a vida útil dos materiais que o constituem.

A pedra tem sido ao longo do tempo um material com importante presença nas construções, encontrando-se presente em edificações antigas de elevado valor cultural, como é o caso do Mosteiro dos Jerónimos, do Castelo de Silves, da Basílica da Estrela, entre outros (Aires-Barros, 2001). A elevada porosidade e absorção de água que algumas variedades apresentam, como o Grés de Silves, a Pedra de Ançã (Moura e Ramos, 1981), contribui para a sua elevada suscetibilidade à degradação, e facilita a fixação de biocolonização e graffiti. A diversidade de fenómenos de degradação em que a água está envolvida (ex.: cristalização de sais, ação de ciclos gelo/degelo, expansão de minerais argilosos, dissolução química, entre outros) justifica que esta seja frequentemente referida como sendo um dos mais importantes agentes de degradação de materiais porosos (Angeli, 2007; Siegesmund and Snethlage, 2011).

A diversidade das formas de alteração e degradação leva à necessidade de recorrer a diferentes ações de conservação e a produtos com funções específicas, por exemplo proteção, limpeza, consolidação, entre outras.

Os tratamentos de proteção podem contribuir para uma prática da conservação mais sustentável, uma vez que podem reduzir a necessidade intervenções e criam condições para prolongar a vida útil do material, evitando a sua substituição, na medida em que podem evitar ou atrasar processos de degradação associados à presença da água, biocolonização e remoção de graffiti. Presentemente, o mercado disponibiliza alguns produtos de proteção com capacidade para desempenhar mais do que uma função, nomeadamente produtos com ação hidrofóbica e oleofóbica. Estes, para além de evitarem ou minimizarem a penetração de água, têm potencial para proteger as superfícies contra várias substâncias causadoras de manchas, incluindo graffiti, devido à sua componente oleofóbica (Lettieri *et al.*, 2019; Scheerder *et al.*, 2005; Xi e Yuan, 2023; Mosquera *et al.* 2017). O recurso a produtos multi-função eficazes e compatíveis, que consigam dar resposta às necessidades específicas que se colocam em determinada situação, permite que determinadas ações de conservação sejam satisfeitas em simultâneo, reduzindo assim os recursos humanos e materiais necessários, a produção de resíduos e o risco do insucesso associada à aplicação de diversos produtos isoladamente.

Os produtos MasterProtect H305 (Master Builders Solutions, 2021), Fluoline HY (CTS, 2023) e o NANO SILO OR (CTS, 2021) são exemplos de produtos multi-função comerciais com ação hidrofóbica e oleofóbica. A presença de solventes na composição dos produtos de proteção comerciais é bastante frequente (Nanocathedral Project, 2018) e possibilita uma excelente capacidade de impregnação em profundidade (Gherardi, 2022; Lettieri et al., 2021). No entanto, essa particularidade representa um desafio do ponto de vista ecológico. A comunidade científica tem vindo a formular produtos hidrofóbicos à base de água (i.e. Aslanidou et al., 2018; Esposito Corcione et al., 2017; Lettieri et al., 2021, 2019), nem sempre com resultados promissores (Geurts et al., 2008; Ho et al., 2018), com o objetivo de reduzir a presença de compostos orgânicos voláteis (COV) e principalmente melhorar o desempenho desses produtos quando aplicados.

O presente estudo tem como objetivo avaliar a potencial adequabilidade de um produto multi-função comercial de proteção à base de água, com propriedades hidrofóbicas e oleofóbicas, no tratamento de duas pedras porosas de natureza mineralógica distinta e com importante presença em diversos monumentos portugueses, um calcário (Pedra de Ançã) e um arenito (Grés de Silves). Para tal, é realizada a avaliação da potencial eficácia inicial das ações e alterações de cor desencadeadas pelos tratamentos em ambas as pedras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

Para além de terem uma presença importante em monumentos do património português, pretendeu-se que os materiais pétreos para o desenvolvimento deste estudo tivessem elevada porosidade, mas composições mineralógicas distintas uma vez que podem influenciar o desempenho de produtos de conservação. Assim, as pedras selecionadas foram um calcário conhecido por Pedra de Ançã e um arenito de cor avermelhada denominado por Grés de Silves.

A Pedra de Ançã (Ançã), que aflora na região de Coimbra, é um calcário caracterizado pela sua tonalidade clara e homogeneidade, atribuídas principalmente à predominância significativa de calcite na sua composição. O Grés de Silves (Grés), presente com maior predominância na região de Silves, consiste numa pedra silicatada composta por grãos de quartzo e outros minerais, aglutinados por um cimento ferruginoso. Estes materiais pétreos podem ser encontrados no edificado antigo das regiões onde afloram, nomeadamente na Porta especiosa da Igreja de Santa Cruz, Porta férrea da Universidade de Coimbra (Pedra de Ançã) e no Castelo de Silves, Sé de Silves (Grés de Silves).

A campanha laboratorial foi realizada num conjunto de provetes cúbicos com 3 cm de aresta que resultaram do corte de blocos provenientes de pedreiras onde aflora a Pedra de Ançã e o Grés de Silves (Figura 1a e 1b).

O produto multi-função comercial selecionado para o estudo foi o MasterProtect H305 (Figura 1c). Este produto é uma emulsão aquosa (sem solventes orgânicos) à base de organo-silanos, propostos para conferir uma ação hidrofóbica e oleofóbica. A ficha técnica do MasterProtect H305 refere explicitamente que o mesmo é adequado para o tratamento de pedras naturais (Master Builders Solutions, 2021).

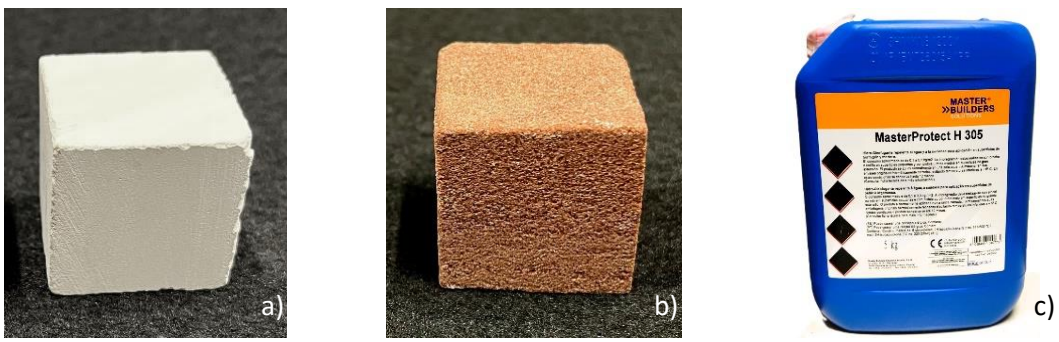


Figura 1 *– Materiais estudados: a) Pedra de Ançã, b) Grés de Silves, c) MasterProtect H305.*

2.2. TRATAMENTOS

Os tratamentos estudados resultaram de aplicações por pincelagem até saturação aparente da face superior dos provetes cúbicos. Uma vez que a penetração dos produtos em profundidade ocorre essencialmente por ação capilar, a sua aplicação foi realizada em superfície horizontal com o objectivo de tornar a aplicação o mais uniforme possível entre provetes e evitar escorrências. A diferença significativa na capacidade para absorver líquidos das variedades pétreas levou à necessidade de adotar critérios diferentes para a definição do momento de paragem da aplicação.

A saturação aparente dos provetes de Pedra de Ançã foi alcançada após a aplicação de 3 a 5 pincelagens, que correspondeu à superfície ter permanecido com um filme de produto líquido, não absorvido na sua totalidade, durante 5 segundos.

A maior capacidade de absorção do Grés de Silves levou a que não tivesse sido possível atingir a saturação aparente sem que tal levasse à aplicação de uma quantidade muito elevada de produto. Deste modo, optou-se por proceder ao tratamento dos provetes de Grés com 5 pincelagens, à semelhança do efetuado na Pedra de Ançã, para garantir a aplicação de um tratamento superficial e não em profundidade.

Uma vez que tratamentos ineficazes podem resultar de uma aplicação insuficiente de produto (Ferreira Pinto et al., 2003), após a primeira aplicação, voltou-se a tentar uma segunda aplicação em ambas as pedras após 1 semana da primeira.

A caracterização dos tratamentos foi efetuada recorrendo: ao registo da posição da franja líquida do produto ao longo do provete no final de cada aplicação (FP); à determinação da quantidade de produto absorvido (PA); à determinação do resíduo seco (RS) após estabilização da massa dos provetes tratados. As expressões [1] e [2] foram utilizadas para obter a PA e o RS, respetivamente.

$$PA = \frac{M_i - M_0}{A} \ [Kg/m^2] \qquad [1]$$

$$RS = \frac{M_f - M_0}{M_0 A} \times 100 \ [\%] \qquad [2]$$

Onde:

M_i - massa do provete após aplicação do produto;

M_0 - massa do provete antes do início do tratamento;

M_f - massa do provete depois de estabilizada a sua massa;

A – área do provete em contacto com o produto.

2.3. MÉTODOS

A avaliação da potencial adequabilidade dos tratamentos baseou-se na análise comparativa das características de cada variedade antes e após o tratamento. O plano de trabalhos seguido, encontra-se esquematicamente apresentado abaixo (Figura 3).

Figura 3 *– Representação esquemática do plano de trabalhos.*

A determinação dos ângulos de contato estáticos consistiu na medição do ângulo formado entre uma gota gerada por uma micropipeta e a superfície em estudo. Os ângulos de contacto foram determinados de acordo com o modelo de ajuste Young-Laplace, considerando um volume da gota para a sua determinação de 5 µl para a água e de 3 µl para o óleo. Tal como noutros estudos e uma vez apresenta uma reduzida tensão superficial (32 mN/m) utilizou-se um azeite comercial para a avaliação do efeito oleofóbico (Lettieri et al. 2019; Lettieri et al. 2018; Mosquera *et al.* 2017).

O procedimento adotado para determinação da absorção de água por capilaridade teve como base a recomendação RILEM Test No. II.6. As amostras foram colocadas em contato com uma camada de geotêxteis imersos em água, permitindo que a absorção capilar ocorresse de forma unidirecional apenas através de uma das superfícies (no caso das amostras tratadas, na superfície tratada). As curvas de absorção de água por capilaridade obtidas permitiram determinar através da equação (3), o coeficiente de capilaridade (Coef. C), que corresponde à taxa inicial de absorção de água. Onde, M corresponde à quantidade de água absorvida por área de superfície, A e para um determinado instante t.

$$Coef.C = \frac{M}{A\sqrt{t}} \qquad [3]$$

A avaliação da cor da superfície dos provetes foi realizada através do sistema CIELAB, determinando as coordenadas L*, a* e b*. Com base nas coordenadas cromáticas é possível calcular o valor de croma, C*, equação (4) e quantificar a diferença total de cor (ΔE*) segundo a equação (5), onde os valores ΔL*, Δa* e Δb* correspondem às variações das coordenadas colorimétricas antes (NT) e após o tratamento (T).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \qquad [4]$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \qquad [5]$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização das variedades pétreas

A Tabela 1 apresenta um conjunto de características físicas do material pétreo estudado que resultou do corte de blocos de Pedra de Ançã e de Grés de Silves.

Ambas as variedades pétreas são consideradas pedras de porosidade elevada a muito elevada (Delgado Rodrigues, 1988). Note-se, porém, que o Grés de Silves se distingue da Pedra de Ançã principalmente pelo facto de possuir uma capacidade de absorção de água por capilaridade superior à da Pedra de Ançã, como evidenciam os valores de porosidade e do coeficiente de absorção de água por capilaridade. O elevado coeficiente de capilaridade do Grés de Silves resulta das dimensões dos poros desta variedade pétrea (Sena da Fonseca et al., 2022).

Tabela 1 *– Propriedades físicas dos materiais pétreos estudados (valores médios±desvio padrão).*

Material pétreo	Porosidade (%)	Massa volúmica aparente (g/cm³)	Massa volúmica real (g/cm³)	Coeficiente de capilaridade (x10^{-3} Kg/m².s^{0,5})
Pedra de Ançã	17,1±0,2	2231±41	2693±39	47,7±1,4
Grés de Silves	22,4±0,4	2046±25	2637±36	228,2±16,8

3.2. Tratamentos

A Tabela 2, apresenta os valores da quantidade de produto absorvido, penetração da franja de produto e do valor de ângulo de contacto de gota de água determinado após cada uma das aplicações efetuadas.

Após a primeira aplicação, os provetes de Grés de Silves não revelaram capacidade de absorção de produto na sequência da tentativa realizada para o efeito, e as suas superfícies encontravam-se hidrofóbicas, uma vez que foram obtidos valores de ângulo de contacto à água superiores a 90°. Os provetes de Pedra de Ançã, por outro lado, apesar de não manifestarem grande capacidade para absorver mais produto, registou-se uma absorção de ~0,06 kg.m^{-2} na segunda aplicação. Contudo, esta segunda aplicação não originou um incremento adicional no valor do ângulo de contacto determinado.

A quantidade total de produto absorvido, resultante dos tratamentos efetuados em ambas as pedras, é, globalmente, reduzida (~0,3 – 0,5 Kg/m^2), espelhando assim o carácter superficial do tratamento de proteção. A penetração dos produtos (Tabela 2), analisada através da observação da evolução das franjas líquidas nas faces laterais dos provetes, evidencia as diferenças nas características do espaço poroso da Pedra de Ançã e do Grés de Silves, já manifestada na diferença dos coeficientes de absorção de água por capilaridade que apresentam (Tabela 1).

A Tabela 2 não apresenta os valores de resíduo seco obtidos, uma vez que para ambas as pedras estes valores foram muito reduzidos (~ 0%), devido ao tipo de produto estudado e às reduzidas quantidades envolvidas em tratamentos superficiais.

Tabela 2 – Características dos tratamentos efetuados (valores médios±desvio padrão).

Material Pétreo	Aplicação	Produto Absorvido (Kg/m²)	Ângulo contacto estático à água (°)	Franja líquida do produto (mm)
Pedra de Ançã	1ª	0,29±0,03	134±5	2,5
	2ª	0,06±0,03	133±4	
Grés de Silves	1ª	0,51±0,06	137±4	6

3.3. Avaliação da eficácia

A potencial eficácia da ação hidrofóbica dos tratamentos estudados foi avaliada recorrendo à determinação do ângulo de contacto estático à água e da capacidade de absorção de água por capilaridade. A avaliação da potencial eficácia da ação oleofóbica baseou-se nos resultados obtidos na determinação do ângulo de contacto estático ao óleo.

A análise da Figura 4 a), que apresenta os valores dos ângulos de contacto à água e ao óleo, permite verificar que os tratamentos estudados manifestam potencial eficácia para ambas as ações em causa, uma vez que foram obtidos valores de ângulo de contacto muito superiores a 90° (critério estabelecido para superfícies hidrofóbicas) tanto à água como ao óleo. A obtenção de valores de ângulo de contacto superiores a 90° resulta do facto de o produto aplicado ter alterado a tensão superficial das superfícies tratadas. Também é possível verificar na Figura 4 a) que, de um modo geral, os reduzidos valores do desvio padrão obtidos, indiciam que os tratamentos promoveram uma distribuição homogénea do produto nas superfícies tratadas.

A generalidade dos valores do ângulo de contacto foram significativamente superiores a 90°, no entanto, os valores entre a superfície e a gota de óleo foram inferiores aos obtidos com a gota de água, devido ao facto de a tensão superficial do óleo ser inferior (32 mN/m) à da água (72 mN/m), (Aslanidou et al., 2018; Lettieri et al., 2019).

Embora os tratamentos testados tenham promovido valores de ângulo de contacto semelhantes, o seu impacto na cinética de absorção de água por capilaridade foi significativamente diferente, Figura 4.b). A cinética de absorção de água em ambas as pedras não tratadas é, de um modo geral, semelhante, uma vez que ocorre inicialmente a uma taxa constante e tende a estabilizar quando a franja líquida atinge a face superior dos provetes em ensaio. No entanto, nas pedras tratadas, a cinética de absorção de água por capilaridade é notoriamente diferente na Pedra de Ançã e no Grés de Silves. Os tratamentos promoveram uma redução significativa da taxa inicial de absorção de água em ambas as pedras, mas muito mais relevante no Grés de Silves. Nos provetes de Grés de Silves tratados, a taxa de absorção de água manteve-se praticamente estável durante todo o ensaio, enquanto na Pedra de Ançã tratada a taxa inicial de absorção de água passou rapidamente para uma taxa mais elevada e, ao fim de aproximadamente 2 dias, a quantidade de água absorvida manifestou tendência para estabilizar.

A maior redução da absorção de água registada no Grés de Silves tratado resulta, muito provavelmente, do facto do seu tratamento ter alterado a tensão superficial da superfície e das

paredes dos poros e até uma maior profundidade (6 mm), face ao registado na Pedra de Ançã (2,5 mm), e assim reduzir de forma mais significativa a capacidade de absorção de água.

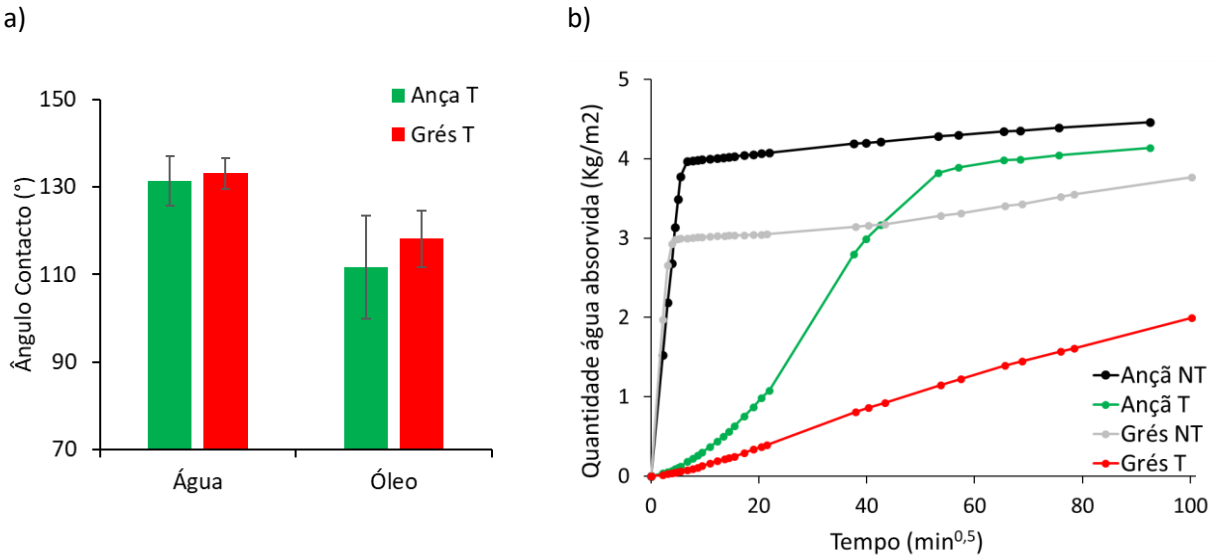


Figura 4 *– Avaliação da ação dos tratamentos: a) Ângulos de contacto estáticos à água e ao óleo; b) Curvas de absorção de água por capilaridade.*

3.4. Alterações de cor

As alterações de cor desencadeadas pelos tratamentos encontram-se representadas na Figura 5, através das variações registadas nas coordenadas cromáticas (L*, a* e b*) e croma (C*), que por sua vez originaram valores da variação total de cor (ΔE^*) inferiores a 3 (2,6 e 0,8 para a Pedra de Ançã e Grés de Silves, respetivamente), ou seja, as variações de cor não são percetíveis visualmente (Lettieri et al., 2018).

As alterações desencadeadas pelos tratamentos nas coordenadas foram similares em ambas as pedras estudadas, uma vez que corresponderam ao incremento da coordenada b* e no caso da Pedra de Ançã, um ligeiro incremento da coordenada C*. Estas variações nas coordenadas, traduzem um aumento da tonalidade amarela na superfície dos provetes (b*) e adicionalmente, na Pedra da Ançã, uma intensificação da cor (C*). Note-se que as variações mais significativas das coordenadas C* e b*, registadas na Pedra de Ançã tratada, justificaram o facto de ter sido nesta variedade pétrea que se registou o valor mais elevado da variação total de cor (2,6).

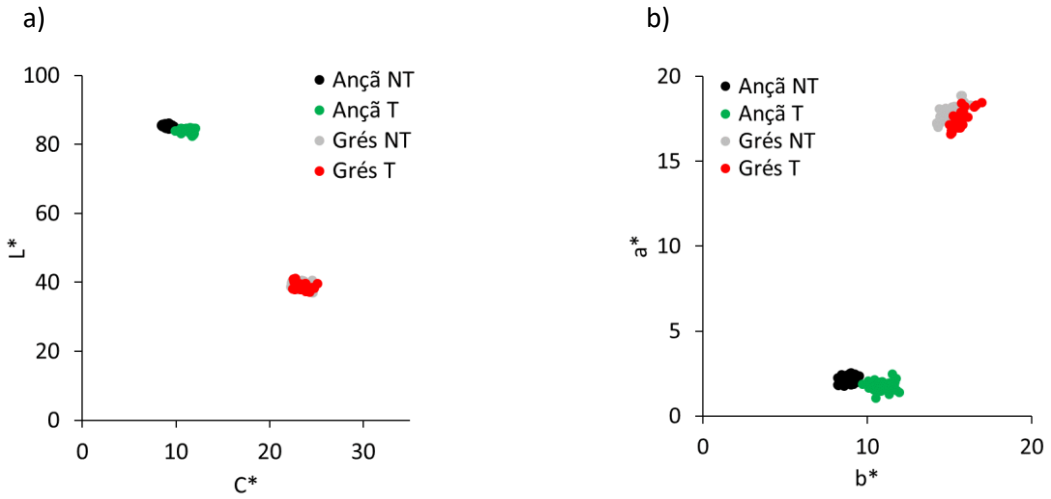


Figura 5 *– Coordenadas CIELAB obtidas antes e após o tratamento da Pedra de Ançã e do Grés de Silves: a) L* e C*; b) a* e b*.*

4. CONCLUSÕES

A breve caraterização das variedades de pedra estudadas, a Pedra de Ançã e o Grés de Silves, evidenciou semelhanças e diferenças nas suas características físicas, nomeadamente no que respeita ao espaço poroso e à capacidade de absorção. Embora ambas possuam elevada porosidade, a maior porosidade do Grés de Silves associada a diferenças nas características do seu espaço poroso face ao da Pedra de Ançã, justificam a maior capacidade de absorção de água por capilaridade revelada pelo Grés de Silves. Estas diferenças tiveram impacto tanto nos critérios de aplicação do produto comercial multi-função MasterProtect H305 devido às diferentes velocidades de absorção líquidos, assim como na sua profundidade de penetração.

Não obstante, a aplicação deste produto em ambas as pedras, revelou potencial de eficácia inicial para ambas as ações a que se propõe (hidrofóbica e oleofóbica). Os ângulos de contacto obtidos foram da mesma ordem de grandeza e superiores a 90°, refletindo a capacidade dos tratamentos para alterar as propriedades das superfícies de ambas as variedades pétreas relativamente ao contacto com a água e o óleo. Os tratamentos estudados promoveram ainda uma redução significativa na taxa inicial de absorção de água por capilaridade em ambas as pedras, porém, superior no Grés de Silves devido à provável presença de produto em maior profundidade.

As reduzidas alterações de cor desencadeadas com a aplicação do MasterProtect H305 não indiciam que a sua aplicação venha a ser condicionada por alterações de aspeto visual que possa promover.

Em suma, o produto multi-ação mostrou-se potencialmente eficaz para ambas as ações que se propõe conferir (hidrofóbica e oleofóbica) quando aplicado no tratamento das duas variedades pétreas estudadas e não tende a alterar de forma significativa o seu aspeto visual, exibindo potencial de utilização no âmbito da conservação de materiais pétreos porosos e não só. A opção pela aplicação de um produto multi-função de proteção com ação hidrofóbica e oleofóbica de base aquosa em detrimento da aplicação de produtos que possuam apenas uma função que integrem solventes orgânicos contribui para uma prática da conservação mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento ao Projeto GreenMAP: Green multi-action products for the sustainable conservation of historic porous building stones (https://doi.org/10.54499/PTDC/ECI-EGC/2519/2020); CQE (https://doi.org/10.54499/UIDP/00100/2020 e https://doi.org/10.54499/UIDB/00100/2020); IMS (https://doi.org/10.54499/LA/P/0056/2020) e CERIS (UIDB/04625/2020). B. Sena da Fonseca agradece o suporte individual (https://doi.org/10.54499/2020.04185.CEECIND/CP1587/CT0004).

REFERÊNCIAS

Aires-Barros, L., 2001. As rochas dos monumentos portugueses: tipologias e patologias. Instituto Português do Património Arquitectónico, Lisboa.

Angeli, M., 2007. Multiscale study of stone decay by salt crystallization in porous networks.

Araújo, A., 2003. Os materiais pétreos no restauro 1–40.

Aslanidou, D., Karapanagiotis, I., Lampakis, D., 2018. Waterborne Superhydrophobic and Superoleophobic Coatings for the Protection of Marble and Sandstone. Materials 11, 585. https://doi.org/10.3390/ma11040585

Delgado Rodrigues, J., 1988. Proposed geotechnical classification of carbonate rocks based on Portuguese and Algerian examples. Eng. Geol. 25, 33–43. https://doi.org/10.1016/0013-7952(88)90017-8

Esposito Corcione, C., De Simone, N., Santarelli, M.L., Frigione, M., 2017. Protective properties and durability characteristics of experimental and commercial organic coatings for the preservation of porous stone. Prog. Org. Coat. 103, 193–203. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.10.037

Gherardi, F., 2022. Current and Future Trends in Protective Treatments for Stone Heritage, in: Gherardi, F., Maravelaki, P.N. (Eds.), Conserving Stone Heritage: Traditional and Innovative Materials and Techniques, Cultural Heritage Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 137–176. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82942-1_5

Lettieri, M., Masieri, M., Aquaro, M., Dilorenzo, D., Frigione, M., 2021. Eco-Friendly Protective Coating to Extend the Life of Art-Works and Structures Made in Porous Stone Materials. Coatings 11, 1270. https://doi.org/10.3390/coatings11111270

Lettieri, M., Masieri, M., Morelli, A., Pipoli, M., Frigione, M., 2018. Oleo/Hydrophobic Coatings Containing Nano-Particles for the Protection of Stone Materials Having Different Porosity. Coatings 8, 429. https://doi.org/10.3390/coatings8120429

Lettieri, M., Masieri, M., Pipoli, M., Morelli, A., Frigione, M., 2019. Anti-Graffiti Behavior of Oleo/Hydrophobic Nano-Filled Coatings Applied on Natural Stone Materials.

Mosquera, M. J., Carrascosa, L.A.M. e Badreldin, N., 2018 Producing superhydrophobic/oleophobic coatings on Cultural Heritage building materials. *Pure and Applied Chemistry*, vol. 90, no. 3, 551-561. DOI: 10.1515/pac-2017-0404

Moura, A.C., Ramos, J.F., 1981. Catálogo Rochas Ornamentais Portuguesas [WWW Document]. URL https://rop.lneg.pt/rop/ (accessed 5.13.23).

RILEM TC 25-PEM (1980), "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods", Materials and Structures, Vol. 13, n. 75, 175 – 253

Scheerder, J., Visscher, N., Nabuurs, T., Overbeek, A., 2005. Novel, water-based fluorinated polymers with excellent antigraffiti properties. J. Coat. Technol. Res. 2, 617–625. https://doi.org/10.1007/BF02774591

Sena da Fonseca, B., Ferreira Pinto, A.P., Rodrigues, A., Piçarra, S., Santos, C., Montemor, M.F., 2022. Effect of the pore network and mineralogy of stones on the behavior of alkoxysilane-based consolidants. Constr. Build. Mater. 345, 128383. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128383

Siegesmund, S., Snethlage, R. (Eds.), 2011. Stone in Architecture. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2

Xi, X., Yuan, W., 2023. UV-Curable Fluorocarbon Polyurethane Coatings for Marble Kitchen Countertops. Coatings 13, 1394. https://doi.org/10.3390/coatings13081394

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

QUANTIFICAÇÃO DA LARGURA DE FISSURAS EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA POR TERMOGRAFIA

Matheus de Souza Silva [a]; Ana Luiza Rocha de Souza[b]; Elton Bauer[c]

[a] Pós-graduando, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: matheus.engcv@outlook.com

[b] Pós-graduanda, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: luiza31souza@gmail.com

[c] Docente, Universidade de Brasília/UnB, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, DF, 70910-900, Brasil. Email: bauer@unb.br

RESUMO

A fissura é a anomalia de maior ocorrência e de maior dano as fachadas de argamassa da cidade de Brasília, Brasil. As fissuras podem ser investigadas por termografia, sendo quantificadas pelo contraste Delta-T, que está em função da largura e profundidade das fissuras. Avalia-se a possiblidade de quantificar a largura das fissuras por termografia, identificando como o sentido do fluxo de calor e valores de Delta-T influenciam nos resultados. A investigação é efetuada em amostras que simulam um revestimento de argamassa, variando a largura e a profundidade das fissuras, submetidos à aquecimento e resfriamento, sendo as amostras monitoradas por câmera termográfica. A quantificação da largura das fissuras é efetuada quando o Delta-T é máximo, em módulo, no aquecimento e resfriamento, aos 60, 100, 180 e 220 minutos. Observa-se que a quantificação da largura das fissuras possui maior precisão quando o Delta-T é máximo durante o resfriamento, sendo as fissuras de maior dimensão facilmente identificadas, em comparação às fissuras de menor dimensão. A quantificação da largura das fissuras não sofre influência dos valores de Delta-T em função da profundidade, mas a precisão da investigação está em função da distância e resolução da câmera termográfica.

Palavras-chave: Fachada; Argamassa, Fissura; Termografia; Largura da fissura.

1 INTRODUÇÃO

As fachadas são sistemas posicionados externamente à edificação, garantindo a proteção do ambiente interno da ação do intemperismo (Morgado *et al*., 2021; Souza, 2019). A ação do intemperismo sobre as fachadas, possibilita o desenvolvimento da degradação (Bauer *et al*., 2014; Rodrigues *et al*., 2011). A degradação é um processo pelo qual a ação de agentes e mecanismos provocam modificações físicas ou químicas em um sistema construtivo, pelo surgimento de anomalias com capacidade de deterioração (British Standards Institution, 2012; Santos, 2018).

A anomalia de maior predominância nas fachadas de argamassa, na cidade de Brasília, Brasil, é a fissura. As fissuras são falhas parciais, visíveis e mensuráveis, através de uma superfície, decorrente à concentração e repetição de esforços, podendo propagar-se de modo generalizado e sem orientação definida (Broek, 1989; Romeiro *et al*., 2023; Veiga, 1998; William D. Callister *et al*., 2021).

A maior ocorrência de fissuras está relacionada a um grande número de causas prováveis. Investigações de degradação em revestimentos de argamassa na cidade de Brasília, Brasil, indicam que as fissuras representam mais da metade das anomalias presentes nas fachadas (Bauer *et al*., 2020, 2021). Além da maior ocorrência, a fissura é a anomalia de maior gravidade para as fachadas de argamassa. As fissuras permitem a ação de outros agentes agressivos, como penetração de chuva, e o desenvolvimento de outras anomalias, como eflorescência, pulverulência e incremento do descolamento (Santos, 2018; A. Silva *et al*., 2014).

As fissuras em revestimentos de argamassa podem ser investigadas por termografia. A termografia é uma técnica de aquisição de imagem e análise de informações térmicas, obtidas a partir da medição da radiação emitida e refletida de um objeto, permitindo obter sua temperatura (Infrared Training Center, 2008). A técnica de termografia apresenta a temperatura da superfície do objeto alvo em um termograma, que é uma imagem que representa a temperatura em uma escala de cores *(Barreira et al.*, 2019; Maldague, 2001).

A identificação de fissuras por termografia ocorre pelo fato que os defeitos alteram localmente o fluxo de calor nas fachadas, o que gera diferença de temperatura entre a fissura e a região sem defeito (Carretero-Ayuso *et al*., 2017). A diferença de temperatura entre a fissura e a região sem defeito é denominada contraste Delta-T, sendo um critério para identificação e atribuição de gravidade de uma fissura, determinado conforme a equação 1 (Bauer *et al*., 2018; Garrido *et al*., 2022; Maldague, 2001; M. de S. Silva *et al*., 2024).

$$Delta\text{-}T = T_d - T_{nd} \quad (1)$$

Onde:

Delta-T: Diferença entre a temperatura da fissura e da região livre de defeito (°C);

T_d: Temperatura média do defeito (°C);

T_{nd}: Temperatura média da região livre de defeito (°C).

Os valores de Delta-T, entre a fissura e região livre de defeito, é maior para maiores dimensões de fissura (largura e profundidade) (M. de S. Silva, 2023). A largura da fissura possui maior influência nos valores de Delta-T, observado no termograma, do que a profundidade, o que indica que fissuras de maior largura possuem maior gravidade (M. de S. Silva, 2023; M. de S. Silva *et al*., 2023). Consequentemente, avalia-se a possiblidade de quantificar a largura das fissuras em fachadas de argamassa por termografia. Objetiva-se identificar como o fluxo de temperatura e seu sentido

(aquecimento e resfriamento) influenciam na investigação e como valores de Delta-T, incrementados pela profundidade, interferem na quantificação da largura da fissura.

2 METODOLOGIA

Para a investigação da largura das fissuras em fachadas de revestimento em argamassa é desenvolvido amostras de argamassa, que simulam um revestimento em fachada, com diferentes dimensões de fissura, sendo submetidas à ciclos de aquecimento e resfriamento, nos quais são obtidos os termogramas para a análise pertinente. A metodologia é dividida em três etapas, sendo a primeira referente à descrição das amostras, a segunda consiste nas avaliações preliminares e layout do ensaio e a terceira é referente a obtenção do Delta-T e quantificação da largura das fissuras nos termogramas.

2.1 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras investigadas foram desenvolvidos por (Milhomem, 2019), no qual uma camada fina de argamassa autoadensável, que representa o revestimento, é moldada sobre uma placa base de argamassa de areia e cimento. Na camada de revestimento é definida as fissuras. As fissuras são induzidas pelo rompimento da camada de revestimento, já endurecida, no qual produz partes menores do revestimento que são aderidas sobre a placa base. A profundidade das fissuras é definida pela espessura da placa de revestimento, enquanto a largura é obtida pelo posicionamento de espaçadores na interface de rompimento no momento da moldagem.

As fissuras determinadas para a investigação possuem três configurações de dimensão (largura e profundidade), sendo cada uma delas definidas em três amostras, denominados de L1, L2 e L3, conforme apresenta a Figura 1 e Quadro 1, que descreve as dimensões das fissuras de cada amostra. Cada uma das amostras é selada lateralmente com poliestireno expandido, de modo a induzir que o fluxo de calor, durante o aquecimento, seja predominante no sentido da espessura da amostra.

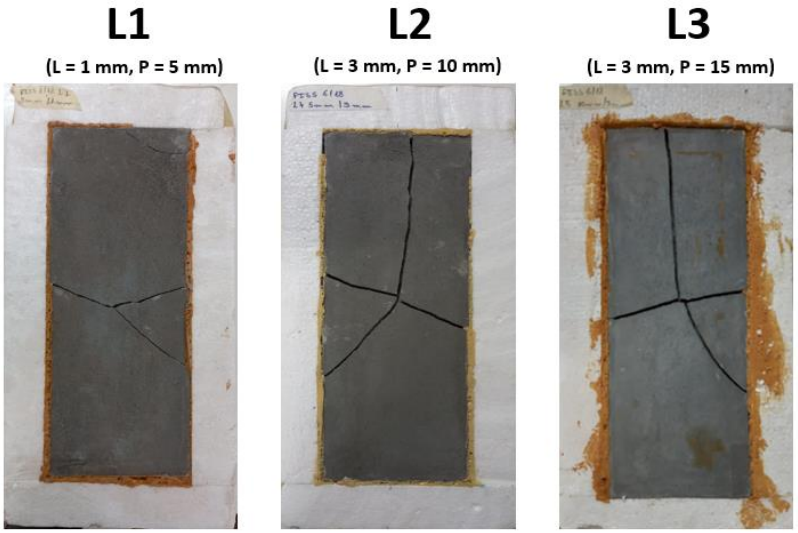


Figura 1 - Amostras de argamassa, onde L é a largura e P a profundidade da fissura

Quadro 1 - Dimensões das fissuras

Identificação	Largura (mm)	Profundidade (mm)
L1	1	5
L2	3	5
L3	3	10

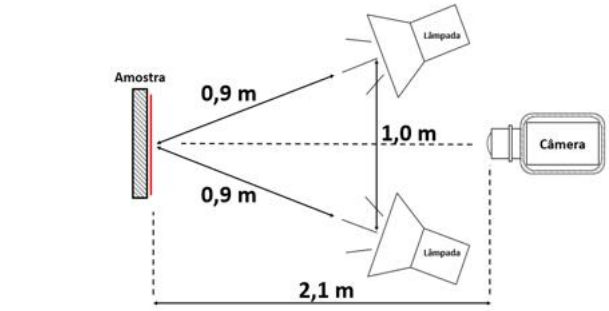
2.2 AVALIAÇÕES PRELIMINARES E LAYOUT DE INVESTIGAÇÃO

Efetua-se um ensaio piloto em uma amostra sem fissuras para a obtenção da temperatura aparente refletida e emissividade, que são dados de entrada da câmera termográfica, necessários para investigação. A temperatura aparente refletida é a temperatura emitida por um objeto externo à análise, que, somada a radiação do objeto alvo da investigação, gera imprecisão na quantificação da temperatura, caso não seja compensada (ABNT, 2021). A temperatura aparente refletida é determinada pelo método da lâmina de alumínio corrugada, seguindo as orientações das normas E1862 (ASTM, 2002) e NBR 16969 (ABNT, 2021). A emissividade é a propriedade que representa a capacidade de uma superfície em emitir radiação térmica, no qual pode ser obtida utilizando câmera termográfica ou radiômetro (ABNT, 2021). A emissividade é obtida pelo método da emissividade conhecida, segundo prescrições das normas E1933 (ASTM, 1999) e NBR 16969 (ABNT, 2021). O valor de temperatura aparente refletida empregado na investigação é de 34,3 ºC e emissividade de 0,96.

Para a obtenção dos termogramas, é empregado a câmera termográfica FLIR T-400, que possui faixa espectral de 7,5 a 13 µm, faixa de temperatura entre -20 e 120 ºC e resolução de 320 x 240 pixels. Na câmera é acoplada uma lente de 15º, o que resulta em um IFOV de 0,82 mrad.

Para o ciclo de aquecimento, é empregado um aparato experimental por meio de dois conjuntos de aquecimento compostos por 3 lâmpadas de infravermelho, com potencial total de 1500W, direcionados à superfície das amostras, possibilitando aquecimento uniforme. O aquecimento inicia quando o sistema de aquecimento é ligado e o resfriamento quando o sistema é desligado.

Para a análise termográfica, em ciclos de aquecimento e resfriamento, há um layout investigativo que envolve as amostras, a câmera termográfica e as fontes de calor. O layout investigativo é ordenado conforme a Figura 2 (a). Na Figura 2 (a) as fontes de calor estão direcionadas para a superfície da amostra com distanciamento de 0.9 metros, no qual cada conjunto de aquecimento é distanciado em 1.00 metro entre si. As fontes de calor estão fora do campo de visão da câmera termográfica, na qual se distância da superfície das amostras em 2.1 metros. Na Figura 2 (b) está apresentado o conjunto experimental de monitoramento termográfico e aquecimento de uma amostra. A Figura 2 (c) apresenta a visualização das fontes de calor direcionadas a uma amostra.



(a)

(b)

(c)

Figura 2 - Aparato de investigação termográfica: (a) Layout de ensaio de termografia; (b) observação do conjunto experimental; (c) observação lateral do layout

2.3 ENSAIO E INVESTIGAÇÃO DA LARGURA DAS FISSURAS

Para o início do ensaio de termografia, em ciclos de aquecimento e resfriamento, é posicionado uma amostra no layout de investigação, no qual a câmera termográfica está alimentada com os dados de entrada do ensaio piloto. Informações de temperatura ambiente e umidade relativa são obtidas para cada amostra ensaiada, por meio do aquisitor EXTECH MO297. Os valores de temperatura ambiente e umidade relativa de cada amostra ensaiada são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Dados de entrada para a investigação termográfica

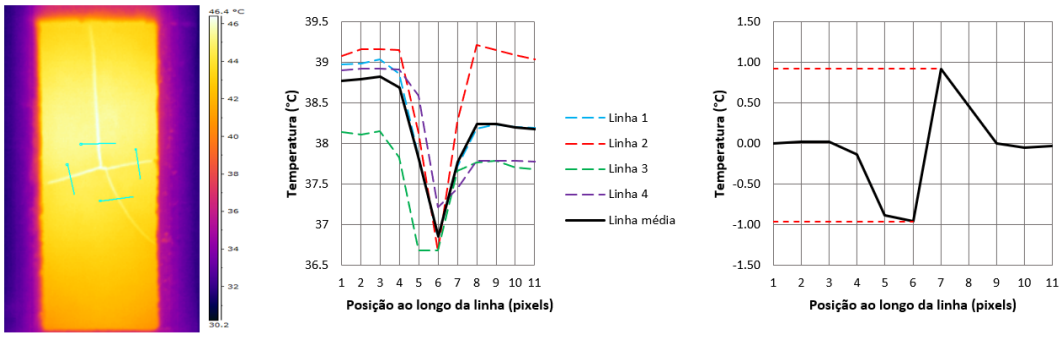
Identificação	**L1**	**L2**	**L3**
Temperatura ambiente (°C)	27,3	27,2	27,1
Umidade relativa (%)	46	59	59

Na sequência, liga-se as fontes de calor, iniciando o aquecimento. O ciclo de aquecimento tem duração de 120 minutos, no qual, decorrido os 120 minutos, as fontes de calor são desligadas, iniciando o resfriamento. Ao atingir 240 minutos, é finalizado o ensaio. Os termogramas são obtidos de forma contínua a cada 4 minutos, durante o aquecimento e resfriamento. A aquisição dos termogramas inicia com a obtenção de duas imagens com o sistema de aquecimento em repouso e em seguida é obtidos os termogramas referentes aos 120 minutos de aquecimento e resfriamento.

Os termogramas apresentam a evolução de temperatura na superfície da amostra, nos ciclos de aquecimento e resfriamento. Se determina na fissura a temperatura Td e na região livre de dano a temperatura Tnd, Td e Tnd são determinadas conforme as orientações de (M. de S. Silva, 2023), no qual a obtenção das temperaturas é efetuada em uma área central do termograma, que representa a totalidade das fissuras, por meio do software Flir Tools. Ao se obter a temperatura da fissura e região sem defeito, para cada termograma, se calcula o Delta-T aplicando a equação 1, o que possibilita

identificar o instante em que o Delta-T é máximo, em módulo, no aquecimento e resfriamento para a quantificação da largura da fissura.

A quantificação da largura da fissura por termografia leva em consideração, para a metodologia investigativa, a distância entre a câmera e o alvo, o IFOV da câmera utilizada e a quantidade de pixels que representam o defeito. A quantidade de pixels que representam o defeito é determinada no termograma por linhas transversais à fissura, conforme a Figura 3 (a). A linhas são exportadas em planilha para se obter a temperatura de cada pixel que a compõe, onde a linha representativa para quantificação da largura da fissura é obtida pela média da temperatura das linhas exportadas, conforme a Figura 3 (b). Na sequência, é obtido a inclinação da temperatura média (linha média) pela subtração da temperatura de um pixel em relação a temperatura do pixel anterior. O intervalo onde a inclinação é mínima e máxima representa a quantidade de pixels que contêm a fissura, conforme a Figura (3), onde a fissura está contida entre os pixels 6 e 7, consequentemente, a largura da fissura corresponde à 1 pixel.



(a) (b) (c)

Figura 3 - Esquema de investigação da largura da fissura: (a) obtenção das linhas perpendiculares as fissuras no termograma; (b) linha média composta pelas temperaturas das linhas perpendiculares às fissuras (c) variação de temperatura da linha média para a quantificação do número de pixels que representam a fissura

Obtido o número de pixels que representam a fissura, emprega-se a equação 2 (Pavón, 2017) para quantificação da largura da fissura, pelo produto entre a distância da câmera ao alvo, ângulo de abertura da lente (IFOV) e quantidade de pixels. A quantificação da largura da fissura é efetuada nas três amostras em três instantes do aquecimento e resfriamento, sendo: Delta-T máximo, em módulo, no aquecimento e resfriamento e aos 60, 100, 180 e 220 minutos de ensaio.

$$L = D \cdot IFOV \cdot N^{\circ} Pixels \quad (2)$$

Onde:

L: Largura da fissura (mm);

D: Distância da câmera termográfica para o alvo (m);

IFOV: Ângulo de abertura da lente (mrad);

Nº de pixels: Número de pixels correspondentes à fissura (n.u.).

3 RESULTADOS

A investigação busca quantificar a largura das fissuras em revestimentos de argamassa com emprego de termografia, identificando como os valores de Delta-T influenciam na análise. As diferenças de

temperatura de Td e Tnd, observadas no termograma, que ocorrem de modo perpendicular à fissura, indicam o número de pixels que correspondem à fissura. O produto entre a distância da câmera ao alvo, IFOV e número de pixels referente a fissura, possibilitam a quantificação da largura da fissura em milímetros.

No Quadro 3 é apresentado a largura das fissuras em milímetros, obtida pela aplicação da equação 2. Observa-se, para a amostra L1, com 1 mm de largura e 5 mm de profundidade, que, no momento em que o Delta-T é máximo, em módulo, no início do aquecimento e resfriamento, é obtido 1,7 mm de largura de fissura. No fim do aquecimento e resfriamento, instante em que o Delta-T reduz, os valores de largura da fissura são de 3,4 mm, referente aos intervalos 100 e 180 minutos de ensaio.

Quadro 3 - Largura das fissuras em milímetros obtidas em diferentes momentos do aquecimento e resfriamento

Identificação	Delta-T max. aquecimento	60 min.	100 min.	Delta-T max. resfriamento	180 min.	220 min.
L1	1,7	1,7	3,4	1,7	3,4	1,7
L2	3,4	3,4	3,4	3,4	5,2	3,4
L3	1,7	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4

Para a amostra L2, que possui 3 mm de largura e 5 mm de profundidade, é observado que, para os intervalos investigados, o valor de largura permanece, predominantemente, constaste, com valor quantificado em 3,4 mm. No intervalo de 180 minutos, metade do tempo do ciclo de resfriamento, há variação na largura da fissura quantificada, sendo obtido o valor de 5,2 mm.

A amostra L3, que possui fissuras com 3 mm de largura e 10 mm de profundidade, apresentam, constância na quantificação da largura da fissura em 3,4 mm. No intervalo onde o Delta-T é máximo, em módulo, no aquecimento, há diferença na quantificação dar largura da fissura, sendo obtido o valor de 1,7 mm de largura.

4 DISCUSSÕES

Observa-se que, independente, da dimensão das fissuras houve pouca variação nos valores de largura das fissuras encontrados nos intervalos de investigação. A amostra L1, de 1 mm de largura, apresenta variação de quantificação nos intervalos de 100 minutos e 180 minutos. As amostras L2 e L3, ambos com 3 mm de largura, possuem variação dos valores de largura apenas em um instante do ensaio, indicando que as fissuras de maior dimensão possuem menor variação na quantificação da largura das fissuras por termografia.

No fim do resfriamento, aos 220 minutos, não há variação dos valores de largura de fissura para qualquer amostra investigada, o que indica que os baixos valores de Delta-T que ocorrem no resfriamento podem não influenciar na quantificação da largura das fissuras. Investigações de fissuras em revestimentos de argamassa por termografia, apontam que os valores de Delta-T reduzem com a evolução dos ciclos, no qual os valores obtidos no resfriamento são menores que os encontrados no aquecimento. Consequentemente, os valores de Td e Tnd do ciclo de resfriamento, possuem maior semelhança, o que pode dificultar a identificação das fissuras devido aos menores valores de Delta-T (M. de S. Silva, 2023; M. de S. Silva *et al*., 2024).

A temperatura presente na superfície dos revestimentos durante o aquecimento, no entanto, tende à não uniformidade, o que indica que há maiores possibilidades de erros de quantificação da largura da

fissura no regime de aqueicmento (Maldague, 2001). Investigações de termografia em fissuras em compostos de fibra de carbono, indicam que a detecção das fissuras possui maior precisão quando o Delta-T é máximo (Moskovchenko *et al*., 2022). Consequentemente, o momento de maior adequação para a quantificação da largura das fissuras ocorre quando há maior contraste e maior uniformidade de temperatura, que corresponde ao instante onde o Delta-T é máximo durante regime de resfriamento. Observa-se que no intervalo onde o Delta-T é máximo do resfriamento, as amostras investigadas não possuem variação nos valores de largura de fissura.

Devido as fissuras da amostra L2 possuírem menor profundidade em relação as fissuras da amostra L3, os valores de Delta-T de L2 são inferiores aos obtidos para L3, tanto no regime de aquecimento como de resfriamento, devido a diferença de dimensão das fissuras (Oswald-Tranta, 2022; M. de S. Silva *et al*., 2023). No entanto, é observado que, para as fissuras das amostras L2 e L3 há constância e igualdade entre os valores de largura de fissura obtidos (3,4 mm). Consequentemente, os valores de Delta-T vinculados ao incremento da profundidade das fissuras, não interferem na quantificação da largura das fissuras, desde que a investigação seja realizada no instante em que o Delta-T é máximo no resfriamento.

Investigações de termografia realizadas em metais ferromagnéticos com fissuras de largura constante e profundidade variável, indicam que há pouca variação do contraste Delta-T em função da profundidade. Consequentemente, a profundidade da fissura não interfere na quantificação da largura, mesmo que tenha influencia no fluxo de calor da fissura e nos valores de Delta-T (Wu *et al*., 2020).

A quantificação da largura da fissura, obtida por termografia, diverge dos valores reais de largura. A maior diferença entre a largura real e a quantificada ocorre para a fissura de 1 mm de largura, pois fissuras de menor largura possuem maior dificuldade de detecção e quantificação (Pech-May *et al*., 2016). A menor diferença de quantificação da largura da fissura, entre o valor real e o obtido por termografia, ocorre para as fissuras de 3 mm, pois fissuras de maior largura são facilmente detectadas e quantificadas (Liu *et al*., 2003).

Investigações de termografia em blocos de concreto com fissuras superficiais, indicam que, para obter precisão na quantificação da largura da fissura o tamanho do pixel em milímetros deve ser menor a largura da fissura (Park *et al*., 2022). As observações de Park *et al*., (2022) estão de acordo com os resultados obtidos na investigação, pois é atribuído 3,4 mm paras as fissuras de 3 mm de largura (variação de 13%) e 1,7 mm para as fissuras de 1 mm de largura (variação de 70%). Para a distância de 2,1 metros e um IFOV de 0,82, utilizados na investigação proposta, um pixel possui 1,7 mm de largura, fazendo com que a investigação de fissuras de 1 mm seja imprecisa, pois o pixel é maior que a largura da fissura. Já as fissuras de 3 mm possuem maior precisão de quantificação, pois a fissura possui largura superior ao tamanho do pixel.

Consequentemente, em uma investigação de termografia, para a quantificação da largura das fissuras, o valor de IFOV e a distância entre a câmera e o alvo, devem garantir que o tamanho do pixel do termograma seja menor que a largura do defeito investigado. A investigação conduz que o sentido do fluxo de calor, o instante em que o Delta-T é máximo, o IFOV da câmera utilizada e a distância de investigação, para a captura do termograma, são determinantes para a precisão da quantificação da largura das fissuras.

5 CONCLUSÕES

A investigação de termografia, aplicada para a quantificação da largura de fissuras em revestimentos de argamassa, é conduzida pela identificação da diferença de temperatura que ocorre de modo perpendicular às fissuras, durante o aquecimento e resfriamento. A investigação da largura das fissuras, por meio da termográfica, está relacionada com os valores de Delta-T e os instantes da investigação durante o aquecimento e resfriamento, conduzindo as seguintes afirmações:

- Para ambos os regimes, aquecimento e resfriamento, há semelhança na quantificação da largura das fissuras, na qual as maiores variações de quantificação ocorrem para as fissuras de menor dimensão. Já as fissuras de maior dimensão são facilmente identificadas e quantificadas nos termogramas.
- Para os regimes de aquecimento e resfriamento investigados, a quantificação da largura das fissuras apresenta variação próximo ao fim dos ciclos, o que indica que baixos valores de Delta-T dificultam a identificação e quantificação da largura das fissuras. O instante de maior adequação para a quantificação da largura das fissuras, ocorre quando o Delta-T é máximo, em módulo, no qual o regime de resfriamento apresenta maior precisão dos valores obtidos.
- Diferentes valores de Delta-T, vinculados a fissuras de maior profundidade, não interferem na quantificação da largura das fissuras. Com a evolução do Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, há pouca variação entre os valores largura obtidos para fissuras de igual largura e diferentes profundidades, indicando que a investigação da largura não é dependente dos valores de profundidade.
- Fissuras de menor dimensão possuem menor precisão de investigação quando comparadas com fissuras de maior dimensão. A precisão da investigação está em função do sentido do fluxo de calor, instante de maior Delta-T, IFOV da lente da câmera termográfica e a distância entre câmera e alvo. Consequentemente, o conhecimento prévio do defeito investigado e suas possíveis dimensões, auxiliam na definição da resolução da câmera termográfica empregada e a distância máxima para a obtenção dos termogramas.
- Por meio da investigação de termografia, realizada em ciclos de aquecimento e resfriamento, é possível identificar a largura das fissuras pela diferença da temperatura entre a fissura e região sem defeito. A atribuição da largura das fissuras auxilia, juntamente com a investigação de Delta-T, na classificação de gravidade das fissuras em fachadas com revestimento de argamassa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM-UnB) pela disponibilidade e permissão para o desenvolvimento experimental deste trabalho. Esse estudo foi financiado em partes, via bolsa, por meio do Decanato de Pós-Graduação da Universidade de Brasília (DPG-UnB), pelo conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

ABNT. (2021). NBR 16969 - Ensaios não destrutivos - Termografia infravermelha - Princípios gerais. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*.

ASTM. (1999). *E 1933 - Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers*.

ASTM. (2002). E 1862 - Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared imaging Radiometers. *American Society for Testing and Materials*.

Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Pereira, M. (2019). Evaluation of heat transfer in humidification phenomena – Comparison between infrared thermography and numerical simulation. *MATEC Web of Conferences*, *282*(2019), 02032. doi: 10.1051/matecconf/201928202032

Bauer, E., Kraus, E., Silva, M. N. B., & Zanoni, V. A. G. (2014). Evaluation of damage of building facades in Brasília. *DBMC - International Conference on Durability of Materials and Components*, *XIII*(1), 535–542.

Bauer, E., Milhomem, P. M., & Aidar, L. A. G. (2018). Evaluating the damage degree of cracking in facades using infrared thermography the elements for allowing degradation agents such as. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12. doi: 10.1007/s13349-018-0289-0

Bauer, E., Piazzarollo, C. B., de Souza, J. S., & dos Santos, D. G. (2020). Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *5*(1), 1–10. doi: 10.1007/s41024-020-0072-6

Bauer, E., Souza, J. S., & Mota, L. M. G. (2021). Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. *Ambiente Construído*, *21*(4), 23–43. doi: 10.1590/s1678-86212021000400557

British Standards Institution. (2012). 15686: Buildings and constructed assets — Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. *BS ISO 15686-2*.

Broek, D. (1989). The Practical Use of Fracture Mechanics. *Kluwer Academic Publishers*, 522.

Carretero-Ayuso, M. J., Moreno-Cansado, A., & de Brito, J. (2017). Study of the prevalence of critical and conflict-prone points in facades. *Engineering Failure Analysis*, *75*, 15–25. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.009

Garrido, I., Barreira, E., M.S.F. Almeida, R., & Lagüela, S. (2022). Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building façades. *Infrared Physics and Technology*, *121*. doi: 10.1016/j.infrared.2021.104012

Infrared Training Center. (2008). Termografia Nivel 1 - Manual do Curso. *Infrared Training Center*, *Sorocaba*.

Liu, H., Sakamoto, M., Kishi, K., Shobu, K., Tabaru, T., Tateyama, H., & Akimune, Y. (2003). Detection of Defects in Thermal Barrier Coatings by Thermography Analyses. *Materials Transactions, 44*(9), 1845–1850.

Maldague, X. P. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. *Wiley*, *1*(New York), 704.

Milhomem, P. M. (2019). Critérios para identificação e avaliação do grau de dano de fissuras em fachadas de edifícios com aplicação da termografia de infravermelho. *Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação Em Estruturas e Construção Civil e Estruturas - PECC/UNB, Brasília*, 124. Retrieved from https://repositorio.unb.br/handle/10482/35308

Morgado, A., Soares, A., Flores-Colen, I., Veiga, M. D. R., & Gomes, M. G. (2021). Durability of thermal renders with lightweight and thermal insulating aggregates: Regranulated expanded cork, silica aerogel and expanded polystyrene. *Gels*, *7*(2). doi: 10.3390/gels7020035

Moskovchenko, A., Švantner, M., Vavilov, V., & Chulkov, A. (2022). Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography. *NDT and E International*, *130*(February). doi: 10.1016/j.ndteint.2022.102673

Oswald-Tranta, B. (2022). Detection and characterisation of short fatigue cracks by inductive thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, *19*(4), 239–260. doi: 10.1080/17686733.2021.1953226

Park, M. J., Kim, J., Jeong, S., Jang, A., Bae, J., & Ju, Y. K. (2022). Machine Learning-Based Concrete Crack Depth Prediction Using Thermal Images Taken under Daylight Conditions. *Remote Sensing*, *14*(9), 1–12. doi: 10.3390/rs14092151

Pavón, E. (2017). Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho. *Tese (Doutorado Em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação Em Estruturas e Construção Civil e Estruturas - PECC/UNB, Brasília*, 250. Retrieved from https://repositorio.unb.br/handle/10482/31912

Pech-May, N. W., Oleaga, A., Mendioroz, A., & Salazar, A. (2016). Fast Characterization of the Width of Vertical Cracks Using Pulsed Laser Spot Infrared Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, *35*(2), 1–10. doi: 10.1007/s10921-016-0344-x

Rodrigues, M. F. S., Teixeira, J. M. C., & Cardoso, J. C. P. (2011). Buildings envelope anomalies: A visual survey methodology. *Construction and Building Materials*, *25*(5), 2741–2750. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.029

Romeiro, T. R. de L. M., de Souza, A. L. R., Lopes, M. L. F., Silva, M. de S., & Bauer, E. (2023). Classifying the severity levels of cracking anomaly on façades. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *8*(1), 1–8. doi: 10.1007/s41024-023-00287-1

Santos, D. G. (2018). Estudo Da Vida Útil E Degradação De Fachadas Em Argamassa a Partir Da Inspeção De Edifícios. *Dissertação (Mestrado Em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, UnB. Brasília*, 136.

Silva, A., Gaspar, P. L., & De Brito, J. (2014). Durability of current renderings: A probabilistic analysis. *Automation in Construction*, *44*, 92–102. doi: 10.1016/j.autcon.2014.04.002

Silva, M. de S. (2023). Avaliação de fissuras em fachadas de argamassa com o emprego de termografia. *Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação Em Estruturas e Construção Civil e Estruturas - PECC/UNB, Brasília*, 125.

Silva, M. de S., & Bauer, E. (2023). Avaliação de fissuras lineares e ramificadas em revestimentos de argamassa com o emprego de termografia de infravermelho. *DEGRADA 2023 - 5º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação Em Estruturas de Concreto*, *5*, 10.

Silva, M. de S., & Bauer, E. (2024). Investigação termográfica para caracterização de fissuras em fluxo de aquecimento e resfriamento: estudos de laboratório. *Ambiente Construído*, *24*, 1–18.

Souza, J. S. de. (2019). Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil das fachadas de edifícios. *Tese (Doutorado Em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação Em Estruturas e Construção Civil - PECC/UNB, Brasília*, 139.

Veiga, M. do R. da S. (1998). TPI 12 - Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. *Teses e Programas de Investigação - LNEC*.

William D. Callister, J., & Rethwisch, D. G. (2021). Ciência e engenharia de materiais - Uma introdução. *LTC - Livros Técnicos e Científicos*, 864.

Wu, J., Zhu, J., & Tian, G. Y. (2020). Depth quantification of surface-breaking cracks in ferromagnetic materials using DC-biased magnetization based induction thermography. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *141*, 106719. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106719

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DO ENSAIO DE POTENCIAL DE CORROSÃO COM HASTES DE COBRE DE DIFERENTES DIÂMETROS

Wilamy Valadares de Castro[a]; Walfrides Monteiro dos Santos Junior[b]; Gustavo Corrêa Cerqueira[c]; Idalmo Petrucci Ribeiro Filho[d]

[a]Universidade de Brasília (Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Brazil), wilamycastro1@gmail.com

[b]Universidade Católica de Brasília (QS 07, Lote 01, 71966-700, Brasília, Brazil), walfridesjunior@gmail.com

[c]Universidade Católica de Brasília (QS 07, Lote 01, 71966-700, Brasília, Brazil), gustavo.c.cerqueira@hotmail.com

[d]Universidade Católica de Brasília (QS 07, Lote 01, 71966-700, Brasília, Brazil), idalmoribeiro6@hotmail.com

RESUMO

Um dos temas de maior relevância dentro da engenharia é a questão da durabilidade das edificações, onde os avanços tecnológicos contribuíram fortemente no desempenho e na qualidade das construções. Para a longevidade de uma edificação é imprescindível que ocorra uma manutenção periódica, que não só previne danos, como também identifica os que foram provocados por condições ambientais agressivas ou pelo natural desgaste dos materiais. Dentro deste contexto é vastamente empregado para diagnósticos locado o ensaio de potencial de corrosão, que indica a probabilidade de ocorrer corrosão nas armaduras analisadas. Tendo como propósito avaliar a precisão do ensaio diagnóstico e fomentar a cultura da manutenção predial, o presente estudo analisa o potencial de corrosão de meia célula de cobre-sulfato de cobre, conforme definido pela norma americana ASTM C876-22b (2022), utilizando barras de cobre com diferentes diâmetros. Além do diâmetro convencional de 6mm, analisou-se eletrodos com hastes de cobre de 2,5 e 10 mm. Os resultados revelaram um coeficiente de variação médio (C.V.) entre 4-5% das medições entre os eletrodos utilizados, o que indica a confiabilidade dos resultados mesmo com a utilização de diferentes diâmetros de hastes de cobre.

Palavras-chave: Potencial de Corrosão, Diferentes diâmetros, ambientes agressivos.

1 INTRODUÇÃO

No atual panorama, motivado por uma demanda crescente por manutenção de estruturas mais antigas, o setor da engenharia que trata de diagnosticos, reabilitações e reparos de costruções está se consolidando fortemente. Respaldado por ensaios técnicos e por análises criteriosas de profissionais de engenharia, o diagnóstico exato de manifestações patológicas é vital para garantir a segurança e o bem estar dos usuários (Romeiro *et al.* 2022).

O adágio popular "é melhor prevenir do que remediar" adquire uma relevância nunca antes vista na indústria da construção. Conforme observado por Medeiros *et al.* (2011), cerca de 50% dos investimentos em engenharia, em alguns paises europeus, são destinados para manutenções e reparos. Embora essa destinação possa parecer significativa, os benefícios são muito claros, tais como: a prolongação da vida útil das estruturas; detectando problemas incipientes antes que se agravem; a redução de custos a longo prazo evitando gastos excessivos com reparos emergenciais ou substituição de elementos estruturais, além da valorização comercial e acima de tudo a segurança dos ocupantes das edificações.

Em consonância com o desenvolvimento da cultura de manutenção predial e com o objetivo de avaliar a precisão dos ensaios diagnósticos, este estudo analisa o ensaio de potencial de corrosão de meia célula de cobre-sulfato de cobre, conferido pela ASTM C876-22b (2022), utilizando barras de cobre com diâmetros pré-estabelecidos, inferior e superior ao convencional. Os diâmetros superiores a 6mm são adotados de acordo com a norma, porém uma análise comparativa foi conduzida utilizando um fio de cobre com 2,5mm de espessura, com a finalidade de examinar possiveis variações resultantes dos diferentes diâmetros utilizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AMBIENTES AGRESSIVOS

Conforme estabelecido pela norma brasileira NBR 6118 (2023), a agressividade do ambiente refere-se as ações químicas e físicas que afetam a estrutura de concreto armado. As características específicas do ambiente podem apresentar potencial de deterioração para a durabilidade da estrutura de concreto. A seguir a Tabela 1 categoriza os níveis de agressividade ambiental de acordo com a localidade destinada ao projeto.

Tabela 1 – Classificação de agressividade ambiental para estruturas de concreto.

CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL			
Classe de Agressividade Ambiental	**Agressividade**	**Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto**	**Risco de deterioração da Estrutura**
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de Maré	

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023).

Esta classificação serve como referência para ajuste do projeto de acordo com as condições específicas do local, além de servir como critério para determinar algumas características fundamentais do concreto para a estrutura, como relação água/cimento, cobrimento e tipo de cimento, descritos na NBR 6118 (2023).

2.2 CORROSÃO

A corrosão ocorre naturalmente de duas maneiras distintas. Primeiramente, na forma de corrosão química, onde ocorrem reações ao longo da superfície do material metálico que se encontra em contato com o ambiente e não se faz necessária a presença de um meio eletrólito. Um exemplo seria a oxidação de barras metálicas expostas ao ar atmosférico, explicada por Gentil (2023), como uma perda natural de energia em condições favoráveis do metal industrializado que após seu processo de fabricação apresenta um nível energético maior que sua matéria prima, minério de ferro, devido aos processos metalúrgicos. Inicialmente a corrosão química pode auxiliar a armadura a ter maior durabilidade, pois com o cálcio do cimento, o óxido de ferro auxilia na formação de ferrito de cálcio que é uma substância estável sobre o metal, ao ocupar a porosidade do material (Verçoza, 1991; Cascudo, 1997).

Na corrosão eletroquímica, há uma diferença de potencial entre o metal e o ambiente circundante, o que resulta na geração de corrente elétrica. Esta corrente auxilia a transferência de elétrons de uma região anódica para uma região catódica por meio de um eletrólito, geralmente água, na presença de oxigênio. Esse processo configura uma pilha de corrosão (Helene, 1986).

No concreto armado a corrosão das armaduras é comumente originada pela ação de agentes externos. Para Gentil (2023), os íons cloretos são registrados na literatura como os principais causadores da corrosão de metais. Em consonância com os estudos de Lima *et al.* (2020), a mera penetração de íons de cloreto no concreto, por si só, não configura um problema patológico de vulto. No entanto, quando entrelaçados à presença de armaduras metálicas, esses íons assumem o papel de agentes instigadores de um processo de deterioração gradativa, cujo impacto recai à tenacidade à tração e à flexão do conjunto estrutural. A corrosão localizada, por sua vez, se configura como um tipo de ataque que ocupa um estágio intermediário no espectro da degradação, situando-se entre a corrosão uniforme, que acomete a superfície do metal de forma homogênea, e a corrosão por pites, caracterizada pela formação de cavidades pontiagudas e localizadas.

O processo corrosivo no aço resulta na redução de seção e comprometimento da função estrutural. Além disso, os hidróxidos e óxidos formados durante o processo aumentam a tensão dentro do concreto devido ao aumento considerável no volume do metal original, gerando fortes fissuras de tração que facilitam a entrada de oxigênio e água. Isso auxilia a propagação contínua da corrosão do material (Andrade, 1997).

3 METODOLOGIA

O estudo se reproduz a partir da confecção do aparelho de potencial de corrosão, tendo como eletrodo uma haste de cobre ao qual será imersa em uma solução de sulfato de cobre. Este equipamento será utilizado como medidor de probabilidade de corrosão, em função do meio eletrólito da atividade eletroquímica estimulada. As alterações para esta investigação está na confecção de mais dois equipamentos com hastes diferentes, uma inferior e outra superior ao convecional.

3.1 MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a execução desse experimento foram produzidos 27 corpos de prova prismáticos com base de (6x6) centímetros e altura 12 centímetros. O traço configurou-se por 1:3:0,8 (1 porção de Cimento para 3 porções de areia e relação água-cimento de 0,8). Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova foram:

- Cimento Portland tipo 2, com adição de Filler e classe de resistência de 32MPa;
- Areia Fina com módulo de finura 2,03;
- Barra de aço CA-50 com diâmetro de 10 milímetros;
- 0,8 litro de água para cada 1kg de cimento.

Para a produção dos corpos de prova, a areia utilizada foi previamente submetida a passagem pela peneira de 76mm, conforme descrito na NBR 6457 (2016), para retirar possíveis materiais grosseiros e também foi seca em estufa para evitar que a sua umidade interferisse na composição do traço. Essa composição foi propositalmente escolhida para que o concreto tivesse uma maior porosidade, com o objetivo de facilitar o processo corrosivo do aço.

No interior de cada corpo de prova foi inserida uma barra de aço CA-50 de diâmetro de 10 milímetros. Este diâmetro foi escolhido por ser frequentemente utilizado em estruturas de concreto armado. O aço foi previamente submetido a um processo de limpeza segundo os parâmetros estabelecidos pela norma americana ASTM G1-03 (2017), primeiramente recebendo tratamento ácido e posteriormente sendo lavado com água corrente, limpo com escova metálica e finalizado com a secagem através de acetona, com o intuito de eliminar qualquer impureza que possa interferir nas medições a serem realizadas.

Após a limpeza, as barras de aço foram submetidas a pintura com resina epóxi, começando em 3 centímetros a partir da base, 3 centímetros sem revestimento e os 6 centímetros restantes revestidos, sendo que na ponta superior fora instalado um fio condutor de cobre para os registros das leituras de potencial de corrosão. A pintura foi realizada com o objetivo de não ocorrer corrosão nos locais onde a leitura não será realizada, agindo como uma camada de proteção (Viana, 2021). Por fim, os corpos de prova foram para cura úmida durante 24 horas e revestidos com resina epóxi nas faces superior e inferior para concentrar ainda mais a corrosão através das faces laterais.

3.2 CONFECÇÃO DOS APARELHOS DE LEITURA DE POTENCIAL DE CORROSÃO

Para a leitura do potencial de corrosão, foram confeccionados três aparelhos de meia célula de cobre-sulfato de cobre, a partir do modelo da norma americana ASTM C876-22b (2022). Cada unidade foi constituída por uma barra de cobre de diâmetro diferente, sendo utilizadas barras de 2,5mm, 6mm e 10mm (Figura 1).

A ponta porosa dos dispositivos é constituída de material inerte para não interferir nos resultados e proporcionar a ponte líquida entre a face do corpo de prova aferido e a barra de cobre imersa em solução de cobre saturada. Neste experimento utilizou-se a ponta de madeira, como material inerte e poroso, que tem como objetivo proporcionar a continuidade elétrica do eletrodo de referência com o eletrodo de trabalho (Medeiros *et al.*, 2017).

Para minimizar a possibilidade de erros no procedimento, as leituras foram realizadas 3 vezes em cada medição por corpo de prova. Antes das leituras dos corpos de prova ensaiados, estes eram mergulhados em água corrente afim de diminuir a resistividade elétrica do concreto. A face em contato com a ponta porosa recebia uma esponja umedecida com água e detergente neutro para promover uma ponte úmida onde houvesse maior condutividade elétrica de acordo com a Figura 2.

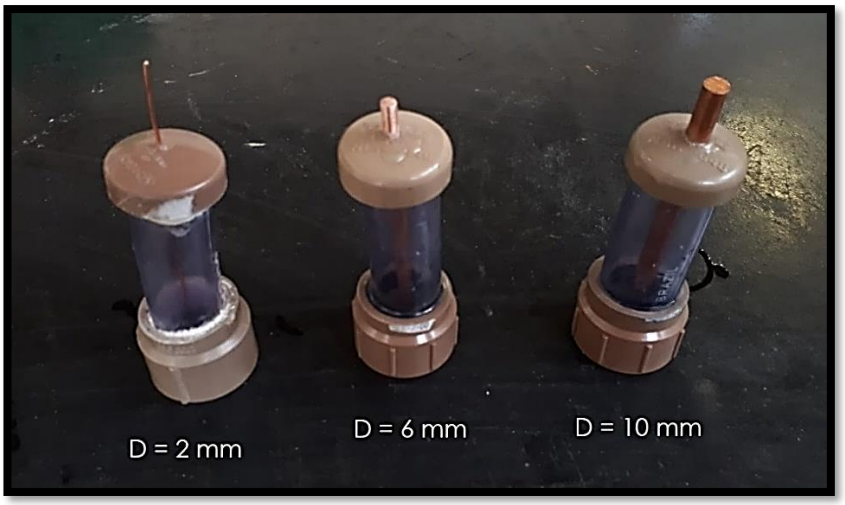


Figura 1 – Aparelhos de Leitura de Potencial de Corrosão

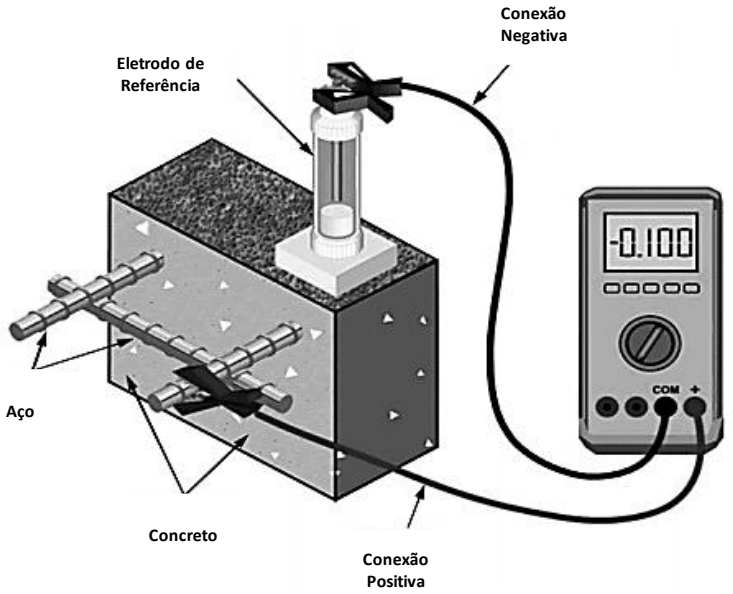


Figura 2 – Exemplo de Leitura de Potencial de Corrosão (adaptado ASTM C876-22b, 2022)

Ressalta-se que esta técnica empregada de potencial de corrosão de meia célula cobre – sulfato de cobre, não classifica a peça analisada como corroída de fato, mas apresenta uma relação entre a leitura do aparelho registrada no multímetro e a probabilidade de ocorrência de corrosão, assim como descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre Leituras e Probabilidade de Corrosão (adaptado ASTM C876-22b, 2022)

ANÁLISE DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO	
VALOR AFERIDO (mV)	**PROBABILIDADE DE CORROSÃO**
Maior que -200	Menor que 10%

Entre -200 e -350	Incerto
Menor que -350	Maior que 90%
Menor que -500	Corrosão Severa

3.3 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO POR CLORETOS

Este método utilizado para a corrosão das armaduras consiste em expor os corpos de prova ao ingresso acelerado de cloretos através de ciclos de umedecimento e secagem. Aplicado por pesquisadores como Cabral (2000) esta metodologia é bem aceita no âmbito científico e tem apresentado bons resultados. Neste estudo cada ciclo teve a duração de uma semana sendo que os semiciclos de umedecimento duraram três dias e os de secagem quatro dias, por conseguinte.

Na parte úmida os corpos de prova foram submersos em uma mistura de água corrente e cloreto de sódio (NaCl) na proporção de 3,5% (35g/kg de água) baseado nos dados do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA – (BRASIL, 2000), simulando regiões litorâneas brasileiras ao qual és comum este tipo de patologia em concreto armado. A secagem ocorreu em estufa com temperatura de 60º Celsius. Na Tabela 3 apresenta-se a cronologia dos ciclos do trabalho, sendo realizada as leituras de potencial de corrosão em cada uma das fases, conforme demonstração da Figura 3.

Tabela 3 – Cronograma de Ciclos de Umedecimento e Secagem

CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM LEITURA INICIAL EM 16/08/2023		
CICLOS	UMEDECIMENTO	SECAGEM
1° CICLO	16/08 – 19/08	19/08 – 23/08
2° CICLO	23/08 – 26/08	26/08 – 30/08
3° CICLO	30/08 – 02/09	02/09 – 06/09

Figura 3 – Ensaio de Potencial de Corrosão

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das medições de potencial de corrosão são apresentados conforme a Tabela 4. As colunas de "A" até "I" representam os nove corpos de prova utilizados no experimento por espessura de barra de cobre utilizada, totalizando os 27 corpos de prova. As linhas indicam os diâmetros das barras nos diferentes dispositivos confeccionados. A última linha, "C.V.", indica a maior diferença percentual encontrada durante a análise dos dados. O coeficiente de variação (C.V.) é uma medida de dispersão utilizada estatisticamente para relacionar o desvio-padrão e a média aritmética de um grupo amostral.

Tabela 4 – Resultados das Leituras de Potencial de Corrosão

LEITURAS INICIAIS 16/08									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**
2,5 mm	-210	-231	-232	-252	-228	-255	-190	-245	-223
6 mm	-217	-253	-229	-244	-220	-241	-212	-239	-214
10 mm	-222	-256	-234	-247	-226	-245	-215	-243	-217
C.V.	6%	11%	2%	3%	4%	6%	13%	3%	4%
LEITURAS DO 1° CICLO 23/08									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**
2,5 mm	-325	-382	-416	-350	-361	-295	-327	-356	-313
6 mm	-337	-387	-419	-353	-364	-296	-324	-365	-322
10 mm	-344	-342	-427	-361	-379	-312	-333	-378	-326
C.V.	6%	13%	3%	3%	5%	6%	3%	6%	4%
LEITURAS DO 2° CICLO 30/08									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**
2,5 mm	-384	-395	-450	-363	-426	-432	-398	-421	-450
6 mm	-380	-395	-445	-360	-420	-409	-420	-428	-470
10 mm	-398	-418	-464	-371	-434	-437	-406	-426	-457
C.V.	5%	6%	4%	3%	3%	7%	6%	2%	4%
LEITURAS DO 3° CICLO 06/09									
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**
2,5 mm	-423	-475	-450	-487	-462	-415	-453	-456	-469
6 mm	-440	-466	-474	-523	-467	-426	-491	-472	-482
10 mm	-436	-476	-466	-529	-467	-425	-464	-472	-482
C.V.	4%	2%	5%	9%	1%	3%	8%	4%	3%

Nota: Valores em vermelho do 1º ciclo se referem aos corpos de prova que já apresentaram alta probabilidade de corrosão.

A estratégia descrita na metodologia para acelerar e facilitar o processo corrosivo foi bem-sucedida. Visto que, no primeiro ciclo de exposição acelerada a cloretos, foi detectado que ao menos 13 corpos de prova já apresentavam uma alta probabilidade de corrosão (superior a 90%).

Ao fim do 3º ciclo de corrosão, os 27 corpos de prova apresentaram alta probabilidade de corrosão. Verificou-se também, que dois corpos de prova "D", para as espessuras de 6 e 10 mm, apresentaram valores condizentes à corrosão severa, conforme Tabela 2. Entretanto esse resultado foi considerado atípico, representando aproximadamente 7% dos corpos de prova ensaiados apenas, conforme mostrado da Figura 4.

As Figuras 5 e 6 ilustram os dados coletados na Tabela 4 referentes a leitura inicial executada antes dos ciclos de corrosão, e os valores da leitura final realizada após 3 ciclos de corrosão, sendo o eixo das abscissas representados pelos corpos de prova e o eixo das ordenadas os valores, em milivolts (mV), das medições registradas no multímetro.

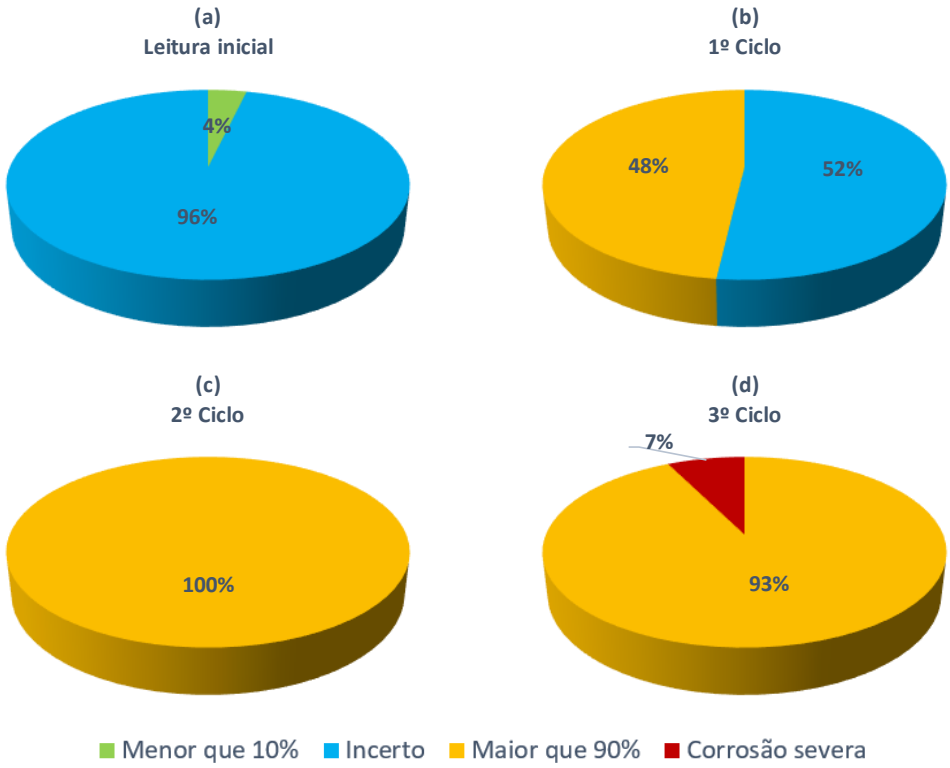


Figura 4 – Disposição das amostras por ciclo de corrosão

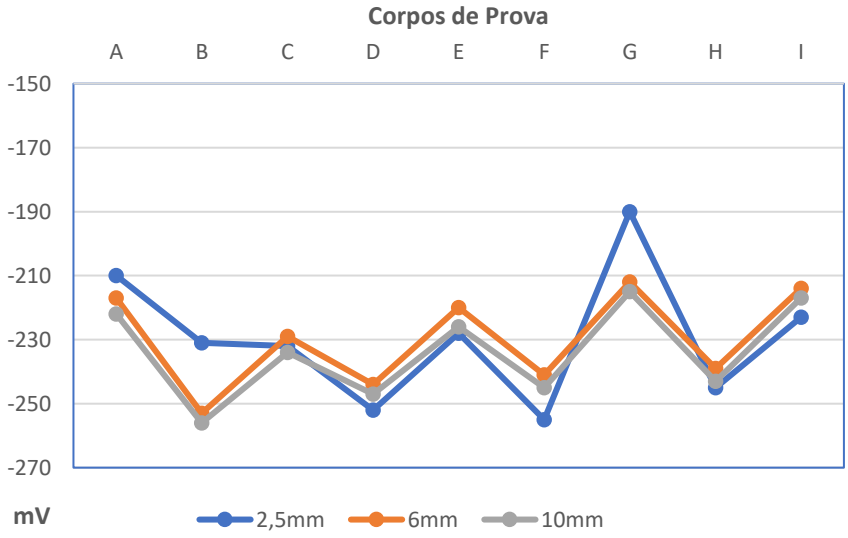


Figura 5 – Resultados das leituras iniciais antes dos ciclos de corrosão.

Os resultados apresentados a partir da Tabela 4 indicam uma baixa oscilação das leituras de potencial de corrosão. Embora existam variações do C.V. acima de 10%, como por exemplo dos corpos de prova "B" e "G" referentes à leitura inicial e do primeiro ciclo, o valor do coeficiente de variação ainda

apresenta resultado satisfatório que não supera a 5% ao final do 3 ciclo, justificado pela estabilidade temporal da corrosão nos ciclos seguintes, ou seja, à medida que os ciclos ocorriam sucessivamente, amenizavam-se as variações. A Tabela 5 apresenta os valores médios do coeficiente de variação. Nota-se que houve um decréscimo dos valores de leitura, tanto para o ciclo inicial, 1º, 2º e 3º ciclos, conferindo 5%, 5%, 4% e 4%, respectivamente.

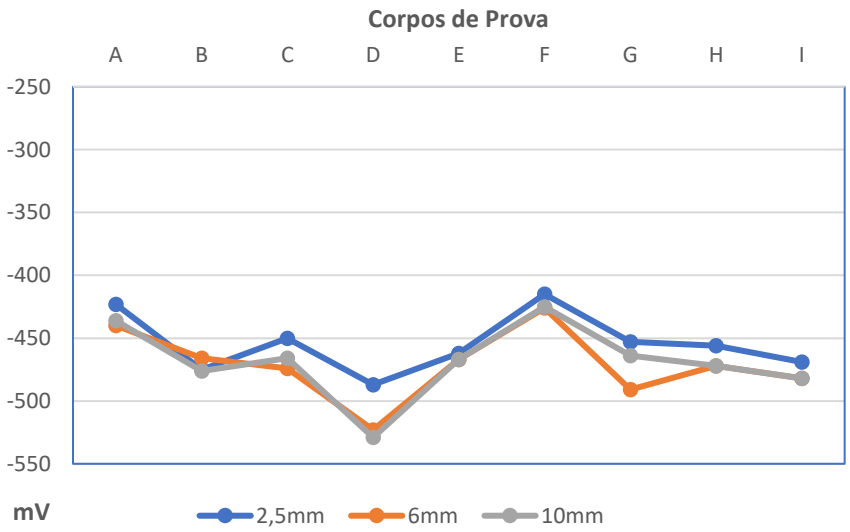


Figura 6 – Resultados das leituras finais após os ciclos de corrosão

Tabela 5 – Média do coeficiente de variação das leituras por corpo de prova

LEITURA INICIAL	5%
1° CICLO	5%
2° CICLO	4%
3° CICLO	4%

A utilização de hastes de cobre com espessuras diferentes das indicadas na norma ASTM C876-22b (2022) tinha como objetivo verificar a qualidade dos resultados com o uso dessas mais finas. Tal experimento teve como motivador o alto custo de aquisição de hastes de cobre com espessuras maiores.

Os resultados apresentados tornaram legítima a experimentação com a barra de 2,5mm, visto que ela apresentou resultados parecidos com os das barras de 6mm e 10mm, com variações maiores apenas nos corpos de prova “D” e “G”, que podem ser visualizadas nas Figuras 5 e 6.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que após a análise dos resultados obtidos, conforme norma ASTM C876-22b, o aparelho de leitura de potencial de corrosão de meia célula cobre-sulfato de cobre apresenta resultados condizentes para as hastes de 6 mm e 10 mm. No caso específico da haste do mesmo material de 2,5mm de diâmetro, o coeficiente de variação médio não foi superior a 5%, o que contribui significativa e objetivamente para a consolidação deste método como forma de diagnóstico da probabilidade de corrosão em estruturas de concreto armado.

Destaca-se a possibilidade de maior flexibilidade no uso uso materiais disponíveis para a realização do ensaio, visto que com apenas a haste de cobre de 2,5mm de diâmetro se obteve resultados muitos semelhantes aos resultados que obedeceram a metodologia da norma vigente, o que poderia justificar seu uso por motivo econômico.

A única dificuldade encontrada dar-se-á quando a se realizar os ensaios com o potencial que possui a haste de cobre de 2,5mm, no quesito execução. A esbeltez do material em questão pode ser um obstáculo ao encaixar das garras no próprio aparelho, justificando uma oscilação maior de resultados.

Os resultados satisfatórios abriram um precedente para uma futura pesquisa com a utilização de barras de aço com diâmetros diferentes bem como as hastes de cobre, para a verificação da qualidade dos resultados e a diminuição da dificuldade na realização do ensaio que poderia resultar em valores menores de C.V.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023. 242p.

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

Andrade, J. J. O. (1997). Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 148 p.

ASTM. American Society For Testing And Materials. ASTM C876-22b: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete – Annual Book of ASTM Standard, 2022.

ASTM. American Society For Testing And Materials. ASTM G1-03: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. Philadelphia, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2000). Resolução CONAMA nº 274 de 29 novembro de 2000 Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Brasília, DOU.2000. Seção 1, páginas 70-71.

Cabral, A. E. B. (2000). Avaliação da eficiência de sistema de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos. Porto Alegre-RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 187p.

Cascudo, O. (1997). O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. 1. ed., São Paulo: Ed. Pini. 237 p.

Gentil, V., de Carvalho, L. J. (2023). Corrosão. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1524 p. ASIN: B09NW7W39G

Lima, R. F. M., dos Santos Lisboa, D. C., Rocha, L. N., Rangel, A. N., de Santana, C. G., Muller, R. M. L. (2020). Análise do concreto armado em relação à agressividade em ambiente marinho: Estudo comportamental quanto à influência de cloretos da água do mar. Brazilian Journal of Development, 6(3), 10692-10720.

Helene, P. R. L. (1986). Corrosão em Armaduras para Concreto Armado. São Paulo: PINI, IPT, 45 p.

Medeiros, M. H. F., Andrade, J. J. O., Helene, P. (2011). Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 773-808.

Medeiros, M.H.F., Rocha, F.C., Medeiros-Junior, R.A., Helene, P. (2017). Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. Ibracon, v. 10, n° 4, p. 864 – 885.

Romeiro, T. R. L. M., Castro, W. V., Carvalho, M. T. (2022). Parâmetros fundamentais no controle da manutenção na construção civil com auxílio do BIM. In: Congresso Construção 2022, Brasília, Brazil.

Verçoza, E. J. (1991). Patologia das edificações. Porto Alegre: SAGRA. 173 p.

Viana, R.T. (2021). Avaliação da resistência à corrosão de aços com diferentes revestimentos superficiais.Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Dissertação (Mestrado).

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS: COMPARAÇÃO ENTRE INSPEÇÕES VISUAIS E MODELOS TEÓRICOS

Ilídio S. Dias[ab]; Ana Silva[a]; Inês Flores-Colen[ab]

[a]CERIS, IST - Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, ilidio.dias@tecnico.ulisboa.pt

[b]Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, IST - Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

RESUMO

Nas cidades, os edifícios apresentam claros sinais de degradação consequentes de uma política de manutenção reativa. Neste sentido, tem surgido uma preocupação crescente na adoção de estratégias de manutenção para a envolvente do edifício, por forma a minimizar o processo de degradação e prolongar a vida útil dos elementos do edifício. Neste estudo, é analisada a influência da aplicação de diferentes ações de manutenção na condição dos elementos da envolvente dos edifícios. São estudados cinco elementos da envolvente do edifício. Estes foram alvo de uma inspeção visual *in* situ, antes e após intervenção, sendo avaliada a sua condição com recurso a um índice numérico, denominado de severidade da degradação, que traduz a condição de degradação global de cada elemento construtivo. É analisada a influência das ações de manutenção no estado de conservação dos elementos, através da diferença entre o índice numérico de degradação obtido na segunda e na primeira inspeção. Os resultados obtidos nas inspeções visuais são comparados com modelos de manutenção teóricos, o que permite a compreensão do impacte real das ações de manutenção nos elementos. Em síntese, constatou-se que os modelos teóricos são conservativos e que, na realidade, as ações de manutenção permitem melhorar a condição dos elementos de forma mais significativa do que a estimada ou prevista em modelos teóricos.

Palavras-chave: Manutenção, Envolvente dos edifícios, Inspeções visuais, Influência das ações

1 INTRODUÇÃO

Devido ao avançado estado de degradação dos edifícios nas cidades, nomeadamente ao nível dos elementos da envolvente dos edifícios, tem surgido uma preocupação crescente na adoção de políticas de manutenção nos edifícios (Ferreira *et al.* 2022). O processo de degradação dos edifícios e seus componentes é inevitável, a partir do momento em que os edifícios entram na sua fase de utilização (Silva *et al.* 2016). Neste sentido, a intervenção na envolvente exterior dos edifícios é essencial para garantir a sua durabilidade, funcionalidade e perceção estética (Madureira *et al*. 2017; Sandak *et al*. 2019; Ferreira *et al.* 2021a). Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos estudos teóricos para avaliar a eficácia da manutenção na durabilidade dos edifícios e seus componentes (Ferreira *et al.* 2020). Na sequência destes trabalhos foi desenvolvido um modelo de manutenção estocástico com base na condição, aplicado à envolvente dos edifícios, com recurso às redes de Petri. Este modelo permite avaliar o impacte de diferentes planos de manutenção na vida útil dos elementos da envolvente e surgiu com o objetivo de otimizar a manutenção dos elementos da envolvente do edifício, reduzindo os custos e maximizando a vida útil dos elementos (Ferreira *et al.* 2021c, 2022). No seguimento deste trabalho, no presente estudo é comparada a influência da manutenção nos modelos teóricos desenvolvidos (Ferreira *et al.* 2021b), com a influência da manutenção verificada nos elementos em trabalho de campo no âmbito do doutoramento do primeiro autor.

A investigação começa por apresentar a metodologia de inspeção aplicada aos casos de estudo. Segue-se a descrição dos casos de estudo com o objetivo de avaliar a condição de degradação dos elementos, antes e após a realização de uma ação de manutenção. São analisados cinco tipos de elementos da envolvente do edifício, nomeadamente revestimentos em reboco corrente, revestimentos cerâmicos aderentes, revestimentos em pedra natural, caixilharias de alumínio e revestimentos cerâmicos em coberturas inclinadas. Nestes elementos foram aplicadas intervenções ligeiras e substituições totais, conforme decisão do proprietário. Com base nas inspeções visuais é calculada a condição dos elementos, antes e após a intervenção, através de um índice designado de severidade da degradação (S_w). Posteriormente, determina-se a influência das ações de manutenção *in situ* e comparam-se com os resultados dos modelos teóricos de manutenção. Por fim, discutem-se as principais diferenças encontradas.

2 METODOLOGIA DE INSPEÇÃO DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS

A metodologia de inspeção que se apresenta serviu de base para o desenvolvimento do trabalho de campo, nomeadamente na recolha da informação necessária à avaliação da condição dos elementos da envolvente dos edifícios antes e após a intervenção. Esta aplica-se a vários elementos da envolvente dos edifícios, nomeadamente revestimentos de fachada, caixilharias e revestimentos de cobertura. Foi realizada com recurso à inspeção visual, por ser facilmente aplicável, sem custos elevados e permitir uma análise rápida da condição do elemento (Dias *et al.* 2021). Este método orienta o processo de levantamento da informação em campo, através de uma caracterização física e visual das anomalias existentes, e apresenta o sistema de avaliação da condição de degradação global dos elementos da envolvente. A metodologia será posteriormente aplicada em campo aos casos de estudo que abrangem diferentes elementos da envolvente do edifício.

A inspeção tem como objetivo recolher informação quantitativa relativa aos elementos da envolvente, nomeadamente as características dimensionais dos elementos, as áreas de anomalias, o enquadramento do elemento no edifício, e informação qualitativa e quantitativa relativa aos níveis de degradação dos elementos, tendo em vista a definição da condição global de degradação do elemento, através de um índice que expressa a condição global da degradação do elemento analisado, designado por severidade de degradação - S_w. Para a aplicação desta metodologia é necessária uma câmara fotográfica digital, uma fita métrica e/ou um laser de medição de distâncias, uma régua de fissuras e um *software* de desenho e tratamento de imagem. Este trabalho deve ser desenvolvido por um técnico especializado (e.g. engenheiro ou arquiteto com experiência no domínio da patologia da construção).

A metodologia para o desenvolvimento do trabalho de campo e avaliação da condição dos elementos da envolvente, antes e após as intervenções, divide-se essencialmente em quatro momentos principais: (i) a preparação das inspeções; (ii) as inspeções em campo; (iii) a análise dos dados recolhidos; e a (iv) comunicação de resultado. O processo inicia-se com a recolha de informação e preparação da inspeção, segue-se o levantamento dimensional do elemento a inspecionar e o registo e quantificação das anomalias em campo. Por fim, aplica-se o método de avaliação da condição global dos elementos da envolvente.

Neste sentido, de forma preliminar à inspeção, deve ser recolhida informação relativa à localização do edifício, peças desenhadas, principalmente plantas e alçados, a história do edifício e os registos de manutenção do elemento em estudo. Antes de avançar para o trabalho de campo, é também importante planear a inspeção e prevenir eventuais falhas. Em campo, a informação deve ser recolhida através da ficha de inspeção, por forma a padronizar o processo e garantir a recolha de toda a informação importante. No caso de não existirem peças desenhadas é necessário fazer um levantamento dimensional em campo que permita desenhar os elementos. Este trabalho pode ser realizado de forma simples, com recurso à fita métrica ou ao laser de medição, para posteriormente representar em duas dimensões o elemento, através de um *software* de desenho. O registo e a quantificação das anomalias é um dos pontos principais da metodologia. No terreno este trabalho é realizado através das fichas de inspeção, da recolha fotográfica e complementado com o registo esquemático das anomalias sobre as peças desenhadas. Nas fichas de inspeção devem ser indicadas as anomalias presentes, o seu nível de gravidade, conforme o sistema classificativo proposto para o elemento em causa, e a área afetada por cada anomalia, caso seja possível medir em campo. A recolha fotográfica deverá permitir a quantificação das anomalias através do tratamento informático das imagens em conjunto com os desenhos à escala dos elementos em formato digital, a fim de possibilitar a medição quando não é exequível em campo. Em gabinete, uma das principais tarefas consiste em quantificar as anomalias. Nos elementos contínuos, a medição das áreas das anomalias, é realizada com recurso ao tratamento das fotografias recolhidas sobrepostas às peças desenhadas, através de um *software* de desenho. O processo inicia-se com o tratamento das imagens recolhidas em campo através do *software* - *Adobe Photoshop CC* para remover a distorção proveniente das câmaras fotográficas. Segue-se o desenho do elemento no *software* de desenho *AutoCAD,* com base no levantamento dimensional previamente realizado. No caso de já existirem peças desenhadas do elemento à escala e em formato *.dwg*, basta sobrepor as imagens tratadas ao desenho do elemento e redimensioná-las à escala do elemento em análise. Posteriormente, são desenhadas e quantificadas as áreas das anomalias sobre a imagem, com o apoio da informação recolhida em campo. Uma vez

determinadas as áreas das anomalias, importa avaliar a condição de degradação dos elementos, antes e após a intervenção (Figura 1).

A condição de degradação global dos elementos da envolvente pode ser quantificada através do índice designado de severidade de degradação (S_w), que se traduz num rácio entre a área degradada, ponderada em função da condição de degradação e gravidade das anomalias, e uma área de referência, equivalente à superfície total do elemento com o maior nível de degradação possível (Equação 1).

$$S_w = \frac{\sum(A_n \times k_n \times k_{a,n})}{A \times \sum(k_{máx})} \qquad 1$$

Na equação, o S_w representa a severidade de degradação do elemento, em percentagem, A_n a área do elemento afetada por uma dada anomalia n, em m^2, k_n é o factor multiplicativo da anomalia n, em função do seu nível de condição de degradação (varia entre 0 e 4), $k_{a,n}$ é o coeficiente de ponderação correspondente ao peso relativo da anomalia n, (assume o valor de 1 quando não existe qualquer especificação), A é a área total do elemento, em m^2, $\sum(k_{máx})$ é o somatório dos fatores de ponderação iguais ao nível mais elevado de condição de degradação de um elemento de área A. Especificamente, o factor k_n está associado à gravidade das várias anomalias consideradas no sistema classificativo e traduz-se nos níveis de condição de degradação que variam desde o nível A (condição mais favorável, sem degradação visível, com k_n igual a 0) até ao nível E (condição mais desfavorável, com degradação generalizada, com k_n igual a 4). O coeficiente de ponderação $k_{a,n}$ permite relativizar a importância dos diferentes grupos de anomalias, visto que nem todas as anomalias possuem a mesma gravidade. Este valor foi definido com base em custos de reparação das anomalias, na forma como a presença de anomalias compromete as exigências mínimas de desempenho do elemento e na sua tendência para originar novas anomalias (Silva *et al.*, 2016).

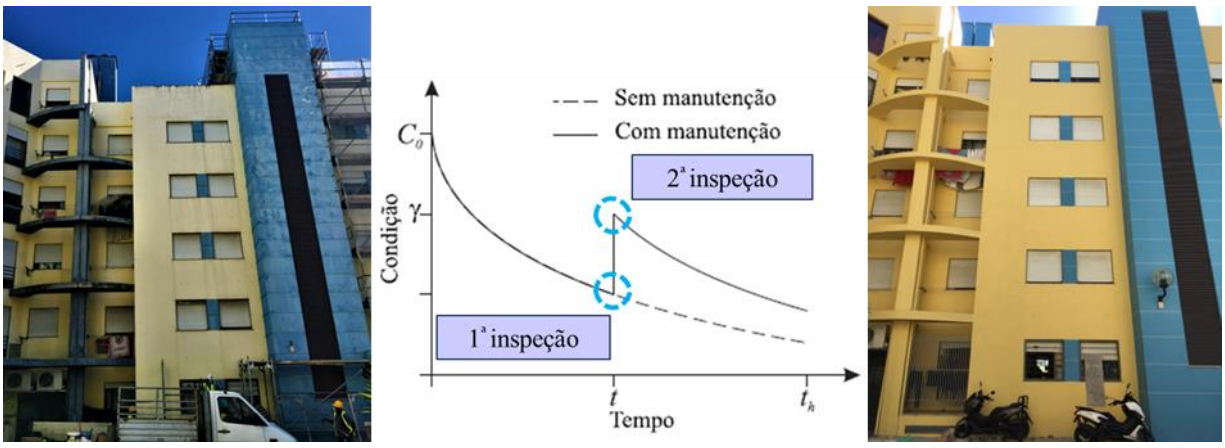


Figura 1 - Quantificação da degradação antes (esq.) e após a intervenção (dir.)

Em virtude de estarem associadas diferentes anomalias a cada elemento da envolvente existem nove sistemas classificativos com diferentes níveis de condição degradação (k_n) e diferentes coeficientes de ponderação das anomalias ($k_{a,n}$). Para alguns dos elementos da envolvente (rebocos correntes, revestimentos por pinturas e ETICS), os níveis de condição de degradação dos sistemas classificativos foram definidos com base em critérios visuais, onde a avaliação da gravidade das anomalias observadas é qualitativa e com base em imagens referência. No caso de outros elementos

(revestimentos cerâmicos aderentes, revestimentos em pedra natural, superfícies em betão à vista, revestimentos cerâmicos em coberturas inclinadas e caixilharias), os critérios de avaliação são quantitativos e o nível de degradação de condição degradação (k_n) é atribuído em função da extensão da anomalia (Ferreira *et al.*, 2022). Na secção seguinte é aplicada esta metodologia e o respetivo sistema classificativo de anomalias consoante os elementos da envolvente em estudo. Este índice quantitativo (S_w) pode ser associado a uma escala qualitativa composta por cinco condições de degradação: condição A - sem degradação visível ($S_w \leq 1\%$); condição B - bom ($1\% < S_w \leq 8\%$); condição C - degradação ligeira ($8\% < S_w \leq 20\%$); condição D - degradação moderada ($20\% < S_w \leq 45\%$); condição E - degradação generalizada ($S_w \geq 45\%$), que são mais bem ilustrados no trabalho de Barrelas *et al.* (2021). A quantificação da condição de degradação global dos elementos da envolvente é feita em dois momentos, antes e após a ação manutenção, através do cálculo do S_w (Figura 2). O objetivo final do trabalho em campo visa a quantificação da variação do S_w, com a realização da ação de manutenção. O resultado representa o ganho real conseguido com a ação de manutenção no elemento (ΔS_w).

3 CASOS DE ESTUDO

No seguimento da metodologia apresentada, descreve-se genericamente os casos de estudo e as suas principais características, recolhidas através da inspeção visual, com o objetivo de avaliar a condição de degradação dos elementos, antes e após ocorrer a intervenção nos elementos da envolvente dos edifícios, de acordo com a metodologia desenvolvida.

Os casos de estudo foram recolhidos e analisados ao longo de dois anos e meio, em resultado do contacto de 42 entidades, entre empresas de reabilitação, aluguer de meios de acesso a edifícios, *Facility Management*, gestão de condóminos, fiscalização, engenheiros civis e arquitetos ligados à gestão de edifícios. Foram angariados 17 edifícios potenciais de estudo, correspondentes a 45 elementos da envolvente do edifício. No entanto, foram identificadas diversas dificuldades e limitações, que impossibilitaram a concretização deste plano, e a recolha de um maior número de casos de estudo. As principais limitações identificadas foram: obter previamente casos de estudo com manutenção programada; à partida, ter a garantia que a ação de manutenção vai ocorrer, estando esta dependente da aceitação de todos os proprietários; ter a garantia da manutenção ocorrer ao longo do período de estudo; conseguir a partilha de toda a informação necessária e manter o contacto com o gestor do edifício; obter o acesso ao elemento para inspeção, em zonas não acessíveis da via pública; dificuldade em conseguir peças desenhadas do elemento; conseguir a partilha dos custos e mão de obra utilizadas nas ações; e obter informação histórica sobre o elemento em análise, nomeadamente o registo de manutenção. No total foram realizadas 56 inspeções a elementos da envolvente dos edifícios (incluindo os casos cancelados) e algumas visitas para o acompanhamento das intervenções.

O resultado deste trabalho foi o estudo de oito edifícios, correspondentes a 19 elementos da envolvente dos edifícios. Os edifícios são localizados na sua maioria na região de Lisboa, sendo que apenas um se situa no concelho de Leiria. O tipo de utilização é maioritariamente habitacional, com o rés-do-chão do edifício dedicado a comércio ou serviços. Os 19 elementos inspecionados distribuem-se entre revestimentos em reboco corrente, revestimentos cerâmicos aderentes, revestimentos em pedra natural, caixilharias em alumínio e revestimentos cerâmicos em coberturas inclinadas. O elemento mais representado é destacadamente o reboco corrente, com 12 elementos.

Contudo, o revestimento cerâmico aderente tem a maior área analisada, com um total de 7100 m^2 (Tabela *1*).

Tabela 1 – Informação recolhida nos casos de estudo

Caso de Estudo	Código do elemento	Elementos	Tipo de intervenção	Material	Extensão (cm /m^2)	Última intervenção (anos)	$S_{w, inicial}$ (%)	$S_{w, final}$ (%)
ED01	F1-1	RC	ST	Reboco de argamassa bastarda	56,50	52	28,17	0,00
	F1-2	RC	ST	Reboco de argamassa bastarda	93,30	52	32,89	0,00
ED02	F2-1	RC	IL	Reboco de argamassa bastarda	21,68	7	10,88	0,03
ED03	F3-1	RC	ST	Reboco de cimento corrente	170,83	15	9,30	0,00
	F3-2	RC	ST	Reboco de cimento corrente	287,64	15	7,55	0,00
	F3-3	RC	ST	Reboco de cimento corrente	431,03	15	7,82	0,00
ED04	C4-1	RCCI	ST	Telha cerâmica Romana	348,34	55	17,86	0,00
	F4-1	RC	IL	Reboco de cimento corrente	116,15	26	5,77	0,44
	J4-1	CA	IL	Alumínio anodizado	730,00	55	15,71	0,83
	J4-2	CA	IL	Alumínio anodizado	444,00	55	31,84	0,00
	J4-3	CA	IL	Alumínio anodizado	804,00	55	32,66	1,07
ED05	F5-1	RC	ST	Reboco de cimento corrente	232,38	27	16,97	0,00
	F5-2	RC	ST	Argamassa de cal hidráulica	123,67	27	15,65	0,00
	F5-3	RC	ST	Argamassa de cal hidráulica	63,48	27	25,60	0,00
	F5-4	RC	ST	Reboco de cimento corrente	72,71	27	1,82	0,00
ED06	F6-1	RC	IL	Reboco de cimento corrente	183,98	7	13,23	0,00
ED07	F7-1	RCA	ST	Azulejo vidrado do tipo faiança	3736,84	10	0,63	0,00
	F7-2	RCA	ST	Azulejo vidrado do tipo faiança	3363,16	10	1,28	0,00
ED08	F8-1	RPN	IL	Vidraço rosal amaciado e mármore Estremoz branco bujardado	1200,00	22	2,03	0,00

Legenda: RC - reboco corrente; RCA - revestimentos cerâmicos aderentes; RPN - revestimentos em pedra natural; CA - caixilharias em alumínio; RCCI - revestimentos cerâmicos em coberturas inclinadas; ST - substituição total; IL - intervenção Ligeira.

A partir do trabalho de campo foi realizado, para cada caso de estudo, uma caracterização geral do edifício, um enquadramento da exposição ambiental do elemento, uma descrição do historial de manutenção do elemento e uma identificação as anomalias antes da intervenção. Foi descrita a estratégia de manutenção adotada para cada elemento e identificadas as anomalias após a intervenção. Posteriormente, esta informação serviu de base à avaliação da condição de degradação de cada elemento, antes e após a intervenção, através do cálculo da severidade da degradação (S_w).

Nos elementos inspecionados distinguem-se dois tipos de intervenção, a substituição total (ST) e a intervenção ligeira (IL). A amostra estudada é composta por 12 elementos que foram alvo de substituição total e 7 de intervenções ligeiras. As principais anomalias identificadas na primeira inspeção (antes da intervenção), foram manchas de sujidade e acumulação de detritos, manchas de colonização biológica, fissuração na superfície do elemento e destacamentos.

Na Tabela 1 apresentam-se as principais informações recolhidas em campo, e aplica-se a metodologia de avaliação da condição de degradação, aos oito casos de estudo, para posteriormente determinar a influência da manutenção no desempenho dos elementos da envolvente do edifício. Um exemplo ilustrativo da avaliação da condição de degradação do ED03 surge na Figura 1, onde o elemento F3-1 se encontra na condição C antes da intervenção (Fig.1 - Esq.) e após a intervenção melhora para a condição A (Fig.1 - Dir.).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO *IN SITU*

O principal resultado obtido com o trabalho de campo foi a quantificação da influência da manutenção (ΔS_w) na condição de degradação dos elementos da envolvente dos edifícios. Este valor foi calculado através da severidade da degradação (S_w)**,** antes e após a intervenção em cada elemento da envolvente, nomeadamente pela diferença entre a severidade da degradação inicial ($S_{w,\ inicial}$) e a severidade da degradação final ($S_{w,\ final}$) (Tabela 1).

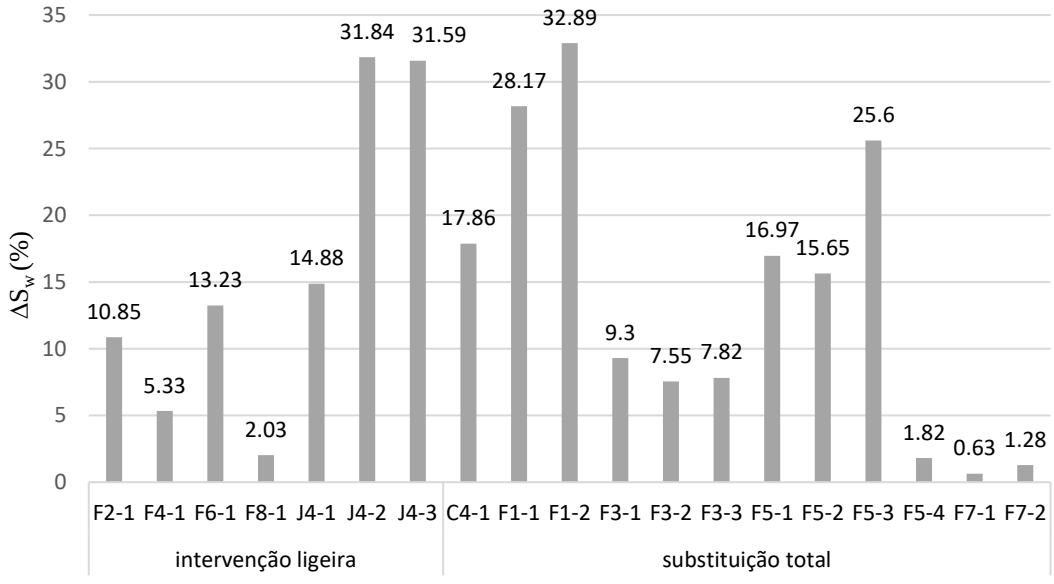


Figura 2 - Influência de cada intervenção na condição de degradação dos elementos

Os resultados da influência de cada intervenção (ΔS_w) surgem na Figura 2, onde a melhoria dos elementos com as intervenções varia entre 0,63% e 32,89%, considerando as ações de substituição total e as intervenções ligeiras. De forma a simplificar a identificação de cada elemento da envolvente estudado, foi criado um código para cada elemento, onde a letra identifica o tipo de elemento (F – fachada; C – cobertura; J – janela), o número seguinte diz respeito à designação do edifício e o último algarismo identifica o elemento dentro de cada edifício (Figura 2).

Estas ações conduziram quase todos os elementos à condição de degradação A ($S_w \leq 1$), com exceção do caixilho em alumínio (J4-3), que melhorou apenas para a condição B, com uma intervenção ligeira (Tabela 1). Era expectável que a influência da intervenção fosse maior na substituição total, porém como existem elementos em que a intervenção foi aplicada com um S_w inicial muito baixo, esta tendência nem sempre se verifica. No caso dos elementos de fachada, F7-1 e F7-2, os problemas construtivos levaram a uma substituição total antecipada e, consequentemente, um ΔS_w baixo. No entanto, tendo em consideração que a substituição total termina o ciclo de vida de um determinado elemento da envolvente e altera as suas características iniciais, para efeitos de análise da influência das intervenções na vida útil dos elementos, apenas se consideram as intervenções ligeiras. Neste sentido, os elementos que sofreram uma maior influência das ações de manutenção foram as caixilharias em alumínio (J4-2; J4-3), por oposição ao revestimento em pedra natural (F8-1), que foi o elemento cuja ação de manutenção apresenta menos impacte na condição de degradação global do elemento.

Avaliando a influência da intervenção ligeira (ΔS_w) nos elementos da envolvente, em termos médios, as caixilharias (CA) contabilizaram uma melhoria de cerca de 26% na severidade da degradação, em três elementos, para uma idade média de 55 anos (Figura 3). No revestimento em reboco corrente (RC) a influência média da intervenção ligeira foi de 9,8%, para uma idade média de 13 anos. Representado apenas por um elemento, o revestimento em pedra natural (RPN) teve apenas uma melhoria de cerca de 2% da severidade da degradação com a ação de manutenção. A influência média da substituição total não foi considerada, tendo em conta que o elemento substituído atingiu a sua vida útil e deu lugar a um novo elemento.

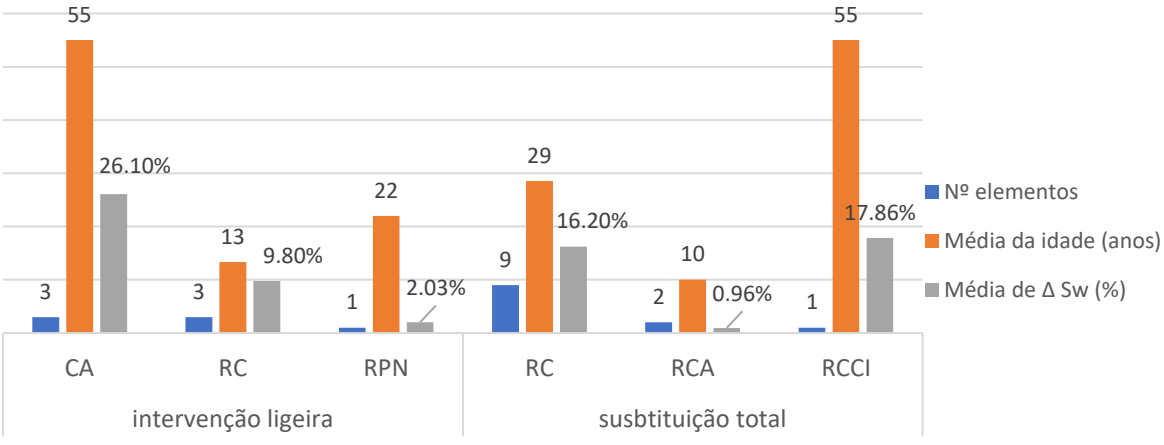


Figura 3 – Influência média das intervenções nos elementos da envolvente

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CAMPO E OS MODELOS TEÓRICOS

Apresentados os resultados obtidos através das inspeções, estabelece-se uma comparação entre aquilo que foi admitido nos modelos estocásticos (Ferreira *et al.* 2022) para modelar a influência da manutenção na condição dos elementos da envolvente, e os resultados da influência da manutenção recolhidos em trabalho de campo. Nos modelos de manutenção estocásticos com base na condição, a modelação da influência das ações de manutenção no desempenho dos elementos da envolvente dos edifícios, foi realizada com recurso às redes de Petri e encontra-se detalhada em trabalhos anteriores dos autores (Ferreira *et al.* 2022).

No caso das ações de substituição total, era expectável que o elemento voltasse à condição de degradação A, conforme foi assumido nos modelos estocásticos. Em campo, isto verificou-se, pelo que os elementos que tiveram este tipo de intervenção, nomeadamente o revestimento em reboco corrente, o revestimento cerâmico em coberturas inclinadas e o revestimento cerâmico aderente em fachadas, retomaram todos à condição inicial, com um S_w igual a zero, após a substituição total do elemento (Tabela 1). No entanto, conforme referido, entendeu-se neste trabalho que este resultado não se pode considerar como um novo incremento na condição de degradação do elemento, visto que a substituição total colocou o fim à vida útil do elemento.

Relativamente às intervenções ligeiras, foram analisados os sete casos de estudo que foram alvo de uma intervenção ligeira, sobre os quais foi possível comparar os resultados obtidos em campo com os impactes da manutenção considerados nos modelos estocásticos de manutenção (Tabela 2).

Tabela 2 – Quadro comparativo da influência da manutenção nos elementos da envolvente

Elementos	Nº elementos	Trabalho de campo									Modelo teórico			
		Condição inicial			Condição final		Impacte da manutenção							
		B	C	D	A	B	Prob. A	Prob. B	Prob. C	$\Delta S_{w,}$ médio	Prob. A	Prob. B	Prob. C	$\Delta S_{w,}$ médio
RC	3	0	3	0	3	0	100%	0%	0%	9,80	61,3%	38,7%	0%	8,94
CA	3	0	1	2	2	1	66,7%	33,3%	0%	26,10	0%	30,4%	69,5%	2,99
RPN	1	1	0	0	1	0	100%	0%	0%	2,03	0%	80,4%	19,6%	7,06

Nos elementos em reboco corrente (RC), constatou-se que os três elementos inspecionados estavam na condição C, e que após a intervenção retomaram à condição A. Neste sentido, a probabilidade de transição da condição deste elemento, de acordo com a informação obtida *in situ*, é de 100% para a condição A, enquanto nos modelos foi estimado um valor de 61,3%, para a condição A, e 38,7% para a condição B. Na caixilharia de alumínio (CA), os três elementos inspecionados estavam na condição C e D, antes da intervenção, e transitaram para a condição A e B, com a intervenção ligeira. A probabilidade de transição de condição deste elemento, de acordo com os resultados de campo, apresenta alguma diferença em relação ao que foi considerado no modelo, com um valor de 66,7%

recolhido em campo, para a condição A, enquanto no modelo esta probabilidade de transição é de 0%. Por sua vez, o revestimento em pedra natural (RPN) encontrava-se na condição B quando foi intervencionado, e após a intervenção transitou para a condição A. Neste caso existe uma maior discrepância entre o que foi considerado no modelo e o que se verificou em campo, uma vez que no modelo a probabilidade de transição para a condição A é zero, enquanto *in situ* foi de 100%. Esta diferença pode estar associada ao facto de o elemento estudado ter sido intervencionado ainda na condição B de degradação, ao invés do instante previsto no modelo teórico para a ação (condição C).

Comparando a influência da intervenção ligeira (ΔS_w), no revestimento em reboco corrente inspecionado verificou-se um decréscimo do índice de severidade da degradação muito próximo do modelo teórico, com um valor ligeiramente superior medido em campo, de 9,80%, face a um valor médio de 8,94% verificado no modelo. Na caixilharia em alumínio o decréscimo do ΔS_w médio obtido em campo foi muito superior (26,10%) ao do modelo (2,99%). Por outro lado, no revestimento em pedra natural, o ΔS_w em campo foi inferior ao estimado no modelo, com os valores de 2,03% e 7,06%, respetivamente.

Posto isto, verifica-se que a influência da manutenção na condição dos elementos da envolvente é bastante significativa, visto que estas ações possibilitaram que mais de 50% de cada tipo de elemento inspecionado atingisse a condição de degradação A, de acordo com o trabalho de campo. Confrontando os resultados de campo com os modelos, observa-se que a influência das intervenções ligeiras observada em campo é maior que o considerado nos modelos, visto que para os três materiais estudados a maioria dos elementos transitam para a condição A, enquanto nos modelos isso só se verifica no RC. Adicionalmente, a melhoria da severidade da degradação (ΔS_w) obtida em campo é maior que a estimada nos modelos, exceto no RPN. No entanto, de referir que no caso do RPN e da CA, as intervenções não foram todas realizadas no estado de condição previsto no modelo teórico (Condição C). Os resultados mostraram ainda uma influência da manutenção no revestimento em reboco corrente bastante próxima entre a observação de campo e o modelo.

5 CONCLUSÕES

Este estudo começa por apresentar uma metodologia de inspeção visual aplicável aos elementos da envolvente dos edifícios, com o objetivo de quantificar a melhoria da condição de degradação dos elementos da envolvente do edifício com a realização de uma intervenção. A metodologia foi aplicada a oito casos de estudo, que totalizam 19 elementos da envolvente, distribuídos por cinco tipos de elementos da envolvente dos edifícios. Na primeira inspeção, as principais anomalias identificadas nos elementos foram as manchas de sujidade e acumulação de detritos, manchas de colonização biológica, fissuração na superfície do elemento e destacamentos. As intervenções que se seguiram, dividiram-se em 12 substituições totais e 7 intervenções ligeiras aos elementos. A partir da informação recolhida foi quantificada a influência da manutenção (ΔS_w) na condição de degradação dos elementos da envolvente dos edifícios. Verificou-se que para efeitos de análise da influência das intervenções na vida útil dos elementos apenas fez sentido considerar as intervenções ligeiras, uma vez que a ação de substituição total termina o período de vida útil de um determinado elemento. As caixilharias foram o elemento estudado em campo que contabilizou a melhoria mais significativa do índice de severidade da degradação (~26%). Por outro lado, o revestimento em pedra natural teve uma influência de apenas 2% no S_w. Comparando os dados de campo com os modelos teóricos, constatou-se que a influência das intervenções ligeiras observada em campo é maior que o considerado nos modelos teóricos, mais

especificamente, o ΔS_w obtido em campo é maior que o estimado nos modelos, exceto no RPN. Adicionalmente, a influência das ações possibilitou que mais de 50% de cada tipo de elemento inspecionado atingisse a condição de degradação A, enquanto nos modelos isso apenas se verifica no RC. Os resultados recolhidos mostram que a influência da manutenção nas caixilharias pode ser superior à considerada nos modelos e que no reboco corrente a influência é bastante próxima. Ou seja, os modelos teóricos têm uma abordagem conservativa. Esta comparação vai permitir calibrar os modelos de manutenção teóricos existentes, contribuindo para uma visão mais pragmática na avaliação do impacto da manutenção na durabilidade e desempenho dos edifícios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro de Investigação - CERIS (Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa), através projeto (DOI:10.54499/UIDB/04625/2020), e da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do financiamento da bolsa de doutoramento (UI/BD/151150/2021) e do projeto CITIESTWINS: A digital framework to merge durability data, maintenance models and energy retrofitting decisions (2022.15504.MIT).

REFERÊNCIAS

Barrelas, J., Dias, I. S., Silva, A., de Brito, J., Flores-Colen, I., & Tadeu, A. (2021). Impact of environmental exposure on the service life of façade claddings—A statistical analysis. Buildings, 11(12), 615.

Dias, I. S., Flores-Colen, I., & Silva, A. (2021). Critical analysis about emerging technologies for building's façade inspection. Buildings, 11(2), 53.

Ferreira, C., Barrelas, J., Silva, A., de Brito, J., Dias, I. S., & Flores-Colen, I. (2021a). Impact of environmental exposure conditions on the maintenance of facades' claddings. Buildings, 11(4), 138.

Ferreira, C., Neves, L. C., Silva, A., & de Brito, J. (2020). Stochastic maintenance models for ceramic claddings. Structure and Infrastructure Engineering, 16(2), 247-265.

Ferreira, C., Silva, A., de Brito, J., & Flores-Colen, I. (2022). Maintainability of Building Envelope Elements: Optimizing Predictive Condition-Based Maintenance Decisions. Cham, Switzerland: Springer.

Ferreira, C., Silva, A., De Brito, J., Dias, I. S., & Flores-Colen, I. (2021b). Definition of a condition-based model for natural stone claddings. Journal of Building Engineering, 33, 101643.

Ferreira, C., Silva, A., De Brito, J., Dias, I. S., & Flores-Colen, I. (2021c). The impact of imperfect maintenance actions on the degradation of buildings' envelope components. Journal of Building Engineering, 33, 101571.

Madureira, S., Flores-Colen, I., de Brito, J., & Pereira, C. (2017). Maintenance planning of facades in current buildings. Construction and building materials, 147, 790-802.

Sandak, A., Sandak, J., Brzezicki, M., & Kutnar, A. (2019). Bio-based building skin (p. 183). Springer Nature.

Silva, A., De Brito, J., & Gaspar, P. L. (2016). Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings. Springer.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MAPEAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: CAUSAS, ORIGENS E RECOMENDAÇÕES.

Frederico Artoni Leal Diogo[a]; Douglas Barreto[b]

[a]Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia Civil, Rodovia Washington Luis, km 235 – São Carlos SP-Brasil, email: fredericoartoni.civil@gmail.com

[b]Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia Civil, Rodovia Washington Luis, km 235 – São Carlos SP-Brasil, email: dbarreto@ufscar.br

RESUMO

As manifestações patológicas podem surgir em diferentes momentos do ciclo de vida das edificações e investigar os seus mecanismos de ocorrência, origens e causas contribui na resolução desses problemas. Este trabalho propõe a sistematização de causas e efeitos para estas anomalias, sinalizando ações preventivas ou corretivas, embasando-se em referências bibliográficas. A partir disso, considera-se as classificações da ISO 19208:2016 para avaliar a representatividade dos diferentes subsistemas prediais e, supletivamente, especular sobre a provável origem dos problemas, considerando-se as fases de projeto , fabricação, execução e utilização. Os resultados obtidos convergiram aos apontados por outras literaturas, obtendo-se 33,2% das anomalias originadas durante projetos, 14,8% na fabricação, 32,2% na execução e 19,8% para utilização. Adicionalmente, analisou-se quais foram os subsistemas mais contemplados para cada etapa, sendo as instalações hidráulico-sanitárias as mais propensas para as fases de projeto e utilização, 41% e 34,5%, respectivamente, e os subsistemas de compartimentação vertical e horizontal externos à edificação os mais vulneráveis para as etapas de execução e fabricação, 22,6% e 38,7% respectivamente. Os subsistemas mais incidentes foram os fechamentos verticais externos da edificação sobre o solo, com incidência em 48,2% dos problemas abordados; seguido dos susbsistemas de superestrutura com 30,6% e instalações hidráulico-sanitárias com 27,8%.

Palavras-chave: Patologia, Terapia, Engenharia diagnóstica, Perícia, Sistemas Prediais.

1. INTRODUÇÃO

Os defeitos que ocorrem nas construções podem ser originados nas diferentes etapas do ciclo de vida da edificação, como na fase de projeto (concepção, escolha dos materiais, definição dos parâmetros e especificações), na fabricação de materiais fora do canteiro, no processo executivo (controle de qualidade) e na vida útil da obra (fase de uso, inspeção, monitoramento e manutenção) (Bertolini, 2010). Portanto, para diagnosticar uma determinada anomalia, é necessário compreender o comportamento dos materiais, elementos e sistemas a partir de suas falhas, considerando-se os fenômenos físicos, químicos e biológicos pertinentes e associando-se a ocorrência dos mesmos às decisões tomadas nas diferentes fases do ciclo de vida da edificação.

O estudo das manifestações patológicas nas construções é o ramo da engenharia civil que se dedica à identificação dos efeitos deletérios observados nas obras, de suas características, causas, origens e mecanismos de ocorrência (Helene, 1988). O origem da palavra “patologia” provém das palavras gregas “pathos” (sofrimento, doença) e “logia” (ciência, estudo) sendo, portanto, o estudo do desvio do que é considerado normal ou esperado para um determinado elemento da edificação (Bolina et al, 2019). De acordo com Helene (1988), de forma complementar, a terapia das construções trata da correção e da solução das deficiências observadas, balizando-se nas informações diagnósticas.

Diante da complexidade das variáveis que podem condicionar o surgimento de um determinado problema patológico, um desafio que se apresenta consiste na disposição de procedimentos padronizados, que contribuam na classificação da manifestação patológica, no direcionamento do seu diagnóstico e na proposição de terapias e de medidas profiláticas adequadas. Este trabalho busca, nesse viés, contribuir na sistematização de causas e efeitos para caracterizar as múltiplas manifestações patológicas incidentes nas edificações, sinalizando possíveis ações corretivas, mitigadoras ou preventivas.

Souza e Ripper (1998) enfatizam a importância da sistematização dos conhecimentos nas diferentes áreas da engenharia civil, contribuindo com a abordagem científica dos problemas patológicos. Com a organização das informações acerca desses problemas, pode-se contribuir na implantação de melhorias ao longo do processo produtivo, trazendo progressos em projetos e obras futuros. Torna-se posssível, portanto, analisar os problemas não somente de forma corretiva ou mitigadora, mas também de forma preventiva, evitando a reincidência de problemas patológicos.

A partir de um acervo de dados com os registros das manifestações patológicas categorizados, é possível obter parâmetros que sinalizem, em termo gerais, em quais sistemas/subsistemas prediais as manifestações patológicas são mais recorrentes e, desses subsistemas, quais são os mais susceptíveis à ocorrência de falhas em cada etapa do ciclo de vida da edificação. Com essas informações, pode-se estabelecer planos de ação prioritários e direcionados a fim de implementar mudanças que evitem a recorrência dos problemas patológicos.

A aplicação dos conhecimentos adquiridos em projetos e obras futuras permite o aprimoramento da qualidade e a otimização dos custos. Como apontado por Marcelli (2007) e Thomaz (2020), é quase sempre mais viável em termos de segurança e economia utilizar das boas práticas de engenharia durante o projeto e a execução, visto que restauros, reparos e reforços posteriores são mais dispendiosos.

Na presente pesquisa, realizou-se um mapeamento, baseado em bibliografia qualificada, das causas, origens e recomendações para as manifestações patológicas incidentes na construção civil, de modo a se obter uma catalogação balizada na visão sistêmica proposta pela norma ISO 19208 (ISO,2016), que

sirva como orientação para o diagnóstico, a terapia e a prevenção das principais falhas ocorrentes nas obras.

1.1 VISÃO SITÊMICA DA EDIFICAÇÃO

A ISO 19208 (ISO, 2016) traz uma abordagem sistêmica da edificação considerando diferentes níveis entre o edifício como um todo e suas partes consituíntes como os sistemas, subsistemas, ambientes, elementos, conjuntos, componentes, produtos e materiais. Considera-se que os objetivos e critérios de desempenho associados a uma parte da edificação não precisam necessariamente ser idênticos aos da edificação como um todo mas que, por outro lado, sejam derivados dos mesmos.

1.2 DIAGNÓSTICO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Ao tratar das manifestações patológicas incidentes nos diferentes subsistemas da edificação, como nas fundações, superestrutura, vedações ou instalações, é necessário um conhecimento integrado entre eles, para que se possa definir um diagnóstico completo. Os subsistemas interagem e uma série de variáveis podem atuar em conjunto condicionando o surgimento de uma determinada anomalia. Nos itens a seguir , apresentam-se os termos relevantes na estruturação do diagnóstico que, segundo Helene (1988), podem ser classificados em: sintoma, mecanismo de ocorrência, origem e causa.

1.3 SINTOMAS

Os sintomas, também chamados de defeitos, lesões, danos ou manifestações patológicas, correspondem às características que sinalizam uma anormalidade. Elas representam a motivação inicial do estudo diagnóstico e são suas peculiaridades que conduzem aos procedimentos de perícia empregados na investigação do problema, permitindo, em muitas ocasiões, as primeiras identificações, com base nas manifestações patológicas já conhecidas.

Deve-se comentar que, eventualmente, os problemas patológicos podem não apresentar uma manifestação externa característica, o que dificulta na identificação do problema e na condução do diagnóstico. Tomando como referência as manifestações patológicas pertinentes às instalações prediais hidráulico-sanitárias, alguns exemplos seriam a contaminação da água potável em reservatórios ou redes, erosões decorrentes de vazamentos, o volume excessivo de descarga em bacias sanitárias e desperdícios de água não detectados, como citado por Carvalho Jr (2015).

Apesar de causarem o desconforto do usuário e a descaracterização de determinado elemento, componente ou sistema, as manifestações patológicas indicam um problema ou defeito, exigindo uma intervenção de reparação, reduzindo os impactos na segurança, na salubridade da edificação e nos custos associados à intervenção.

1.4 MECANISMOS DE OCORRÊNCIA

Denominam-se mecanismos de ocorrência os processos que desencadeiam as diversas manifestações patológicas presentes nas edificações. Esses mecanismos se desenvolvem através de fenômenos físicos, químicos ou biológicos motivados por agentes agressivos, condições intrínsecas dos insumos ou falhas no processo executivo. Segundo Helene (1988), o entendimento do mecanismo de ocorrência do problema é determinante para uma terapêutica adequada. Compreender o processo que propicia o surgimento de uma determinada manifestação patológica permite prever o viés da terapia, ou seja, se a solução empregada será reparativa, tratando apenas o sintôma, ou efetiva, a ponto de evitar a reincidência do efeito tratado.

Alguns dos mecanismos de ocorrência que podem ser mencionados seriam o processo de corrosão do aço em estruturas de concreto armado, recalques em fundações, o carreamento de partículas em fachadas, eflorescências e a fricção em acabamentos (desgastes abrasivos).

1.5 ORIGEM

Como comentado, os mecanismos que resultam na ocorrência de manifestações patológicas podem ser iniciados em diferentes fases da edificação. O processo de construção pode ser dividido em cinco grandes etapas: planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes fora do canteiro, execução e uso ou operação, sendo que na etapa de uso caracteriza-se como sendo a mais longa, envolvendo os processos de manutenção das obras de reparo (Helene, 1988).

Uma parte significativa das manifestações patológicas tem origem nas etapas de planejamento e projeto, sendo a maioria dos casos mais graves aquelas advindas da qualidade dos materiais ou da execução, o que justifica a importância em investir-se mais tempo no planejamento e detalhamento (Helene,1988).

1.6 CAUSAS

As causas dos problemas patológicos remetem aos agentes específicos que incitam o desenvolvimento dos mecanismos de ocorrência. As cargas nos edifícios, variações de umidade, variações térmicas, agentes atmosféricos, biológicos e químicos ou incompatibilizações entre materiais , são alguns dos exemplos desses agentes (Helene, 1988).

O principal objetivo das informações diagnósticas consiste em balizar as terapias a serem adotadas na resolução dos problemas. À partir dos dados diagnósticos, do prognóstico, das condições de intervenção do local e de um cenário de custos, pode-se implantar as medidas corretivas necessárias em cada caso.

1.7 TERAPIA (RECOMENDAÇÕES)

De um modo geral, terapias que incidem sobre as causas permitem resultados mais efetivos, intervindo nos recursos que desencadeiam os mecanismos de ocorrência dos problemas patológicos e evitando a sua reincidência. Entretanto, em alguns casos, devido às condições de uso, à complexidade de uma intervenção mais profunda e ao custo, opta-se por utilizar medidas reparadoras que ocultam ou atenuam os sintomas por um tempo determinado.

As medidas terapêuticas adotadas para as correções das anomalias podem ser de vários níveis, dependendo da fase, da dimensão e das peculiaridades das manifestações patológicas analisadas. Essas correções podem incluir reparos localizados ou até mesmo procedimentos generalizados de recuperação, sendo sempre recomendável a adoção de medidas protetivas acompanhadas de programas de manutenção periódica (Helene, 1988).

2. DADOS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho foi estruturada como apresentado à seguir:

- Definição do domínio bibliográfico para consulta e das estratégias de levantamento das informações;
- Levantamento de manifestações patológicas, causas e soluções associadas em referências bibliográficas;

- Compilação dos dados com a classificação, atribuição da referência bibliográfica e recorte nos sistemas prediais;
- Associação dos subsistemas preconizados na ISO 19208:2016 às manidestações patológicas levantadas;
- Classificação quanto à origem das manifestações patológicas nas fases de projeto (P), de fabricação (F), de execução (E) e de utilização (U));
- Associação da tipologia e do ano de publicação da referência bilbiográfica (consolidação dos cadastros);
- Análises qualitativa e quantitativa sobre a bibliografia que balizou os cadastros;
- Análises qualitativa da incidência dos subsistemas sobre os cadastros e as manifestações patológicas
- Análises qualitativa e quantitativa da incidência das origens da manifestações patológicas nos subsistemas

Considerando que os dados foram estruturados em uma planilha eletrônica, para realizar as análises, parametrizou-se as variáveis por meio de indexadores que foram considerados tanto para os diferentes subsistemas prediais quanto para as diferentes origens das manifestações patológicas. Nesta planilha constam 907 registros bibliográficos, sendo identigficadas 769 patologias disitntas.

Salienta-se que os dados sobre as manifestações patológicas e respectivas incidências nos subsistemas da edificação, havendo portanto diferentes registros referentes às mesmas patologias e que sugerem recomendações diferentes

Neste trabalho, ao se mencionar a incidência de um subsistema sobre as manifestações patológicas, entende-se que refere-se à quantidade de manifestações patológicas cadastradas que envolviam o subsistema em questão. A mesma consideração deve ser estendida à incidência das origens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE DOS DADOS LEVANTADOS NA BIBLIOGRAFIA

Para estruturação do acervo da bibliografia sobre manifestaçõess patológicas foram consideradas diferentes tipologias de materiais para a consulta, sendo utilizados desde textos técnicos até artigos publicados em revistas, apresentações em congressos, manuais técnicos, materiais didáticos, dissertações de mestrado ou trabalhados de conclusão de curso. As análises bibliográficas apresentadas a seguir esboçam o perfil do banco de dados levantado neste trabalho, tanto quanto a atualidade das informações presentes quanto ao nível da aprofundamente das mesmas.

No Quadro 1, apresentado a seguir, destaca-se o número de cadastros levantados para cada tipo de referência, ou seja, a incidência numérica de cada tipo de documento no total de cadastros levantados. Na última coluna à direita, tem-se a quantidade de autores envolvidos para cada tipologia.

Quadro 1 - Análise das referências bibliográficas.

Tipo de documento	Quantidade	Percentual	Autores
Materiais didáticos	433	48%	10
Dissertações de Mestrado	196	22%	12
Trabalhos de Conclusão de Curso	86	9%	14
Matéria em sites	75	8%	15
Manual Técnico	71	8%	9
Artigos	34	4%	7
Apresentação em Seminários	12	1%	2
Total	907	100%	69

Dos dados do Quadro 1, pode-se identificar que as principais referências consideradas na base de dados consistiram em materiais didáticos e dissertações de mestrado, totalizando cerca de 70% de cadastros pautados sobre essas suas tipologias. Deve-se comentar também que, em muitos casos, foram citados indiretamente autores de teses de doutorado e outros documentos não considerados nesta análise, mas que contribuiram sobremaneira com a quantidade e a qualidade das informações. Complementarmente, realizou-se a avaliação cronológica das referências bibliográficas do trabalho, como apresentado na Figura 1, a seguir.

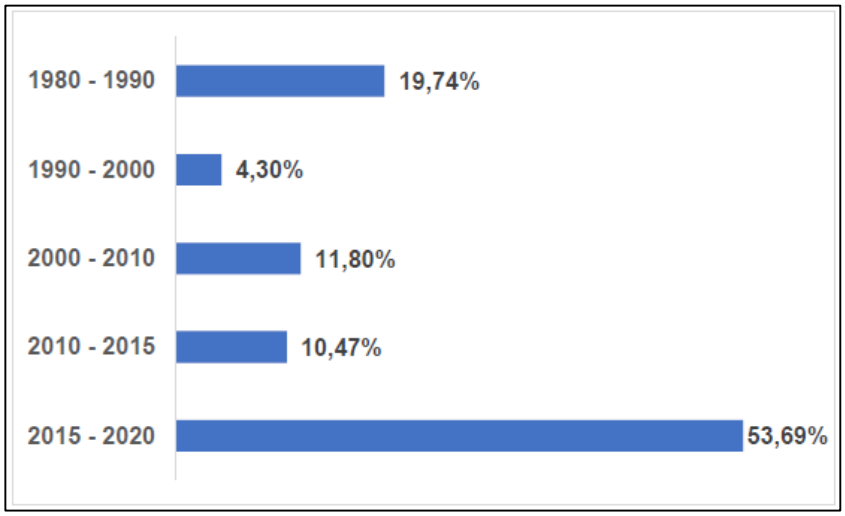


Figura 1 - Mapeamento cronológico das referências bilbiográficas.

Com base nos dados apresentados na Figura 1, nota-se que cerca de 65% das referências, que embasaram os cadastros, foram publicadas após o ano de 2010 e que cerca de 75% foram publicadas após o ano 2000. As referências mais antigas utilizadas são constituídas, em boa parte, por materiais consolidados na literatura, como Helene (1988) e Souza e Ripper (1998).

3.2. Análises de Representatividade dos Subsistemas da Edificação.

Para efeito das análises acerca dos registros das manifestações patológicas identificadas nas referências bibliográficas, as manifestações foram parametrizadas por meio de indexadores. No Quadro 2, apresentado a seguir, estão os indexadores definidos para os sistemas e subsistemas prediais preconizados na ISO 19208 (ISO, 2016).

Quadro 2 - Sistemas, subsistemas e indexadores correspondentes.

Sistema	Subsistema	Indexador
Estrutura	Fundações ou Subestrutura	1a
	Superestrutura	1b
Fechamentos Externos da Edificação	Fechamentos Externos no Subsolo	2a
	Fechamentos Externos Sobre o Solo	2b
Compartimentações Externas à Edificação	Compartimentações Verticais Externas	3a
	Compartimentações Horizontais Externas	3b
	Escadas/ Rampas Externas	3c
Compartimentações Internas à Edificação	Compartimentações Verticais Internas	4a
	Compartimentações Horizontais Internas	4b
	Escadas/ Rampas Internas	4c
Serviços	Distribuição de Água Potável e Disposição de águas residuárias e de reuso	5a
	Aquecimento e Ventilação	5b
	Distribuição de Gás	5c
	Energia Elétrica	6a
	Telecomunicação	7a
	Transporte Mecânico e Eletromecânico	7b
	Transporte Pneumático ou por Gravidade	7c
	Segurança	7d

A partir da classificação dos cadastros das manifestações identificadas, e agrupadas por subsistemas da edificação, foram elaboradas planilhas com os dados que permitiram organizar a frequência de registros em ordem decrescente, a fim de organizar os resultados obtidos e selecionar os dados mais relevantes para as representações gráficas.

No total doram idenficados 769 registros de manifestações patológicas disitntas, a partir das quais foram realizadas as análises de incidência e representatividade (frequência) nos subsistemas indicados na Quadro 2. A frequência das manifestações nos registros está apresentada no Quadro3, a seguir, e figura 2, na sequência corresponde à representação análoga em forma de gráfico.

Quadro 3 - Incidência das manifestações nos subsistemas.

Indexador	Subsistema	Incidência	(%)	(%acumulado)
2b	Fechamentos Externos Sobre o Solo	371	25,1%	25,1%
1b	Superestrutura	235	15,9%	41,0%
5a	Distribuição de Água Potável e Disposição de águas residuárias e de reuso	214	14,5%	55,4%
4a	Compartimentações Verticais Internas	195	13,2%	68,6%
3a	Compartimentações Verticais Externas	140	9,5%	78,1%
4b	Compartimentações Horizontais Internas	130	8,8%	86,9%
3b	Compartimentações Horizontais Externas	119	8,0%	94,9%
1a	Fundações ou Subestrutura	44	3,0%	97,9%
7b	Transportes Mecânico e Eletromecânico	25	1,7%	99,6%
6a	Energia Elétrica	4	0,3%	99,9%
3c	Escadas/ Rampas Externas	1	0,1%	99,9%
5c	Distribuição de Gás	1	0,1%	100,0%

Quadro 3 - Incidência das manifestações nos subsistemas (Cont).

Indexador	Subsistema	Incidência	(%)	(%acumulado)
2a	Fechamentos Externos no Subsolo	0	0,0%	100,0%
4c	Escadas/ Rampas Internas	0	0,0%	100,0%
5b	Aquecimento e Ventilação	0	0,0%	100,0%
7a	Telecomunicação	0	0,0%	100,0%
7b	Transportes Mecânico e Eletromecânico	0	0,0%	100,0%
7c	Transporte Pneumático ou por Gravidade	0	0,0%	100,0%
7d	Segurança	0	0,0%	100,0%
Total		1.479	100%	

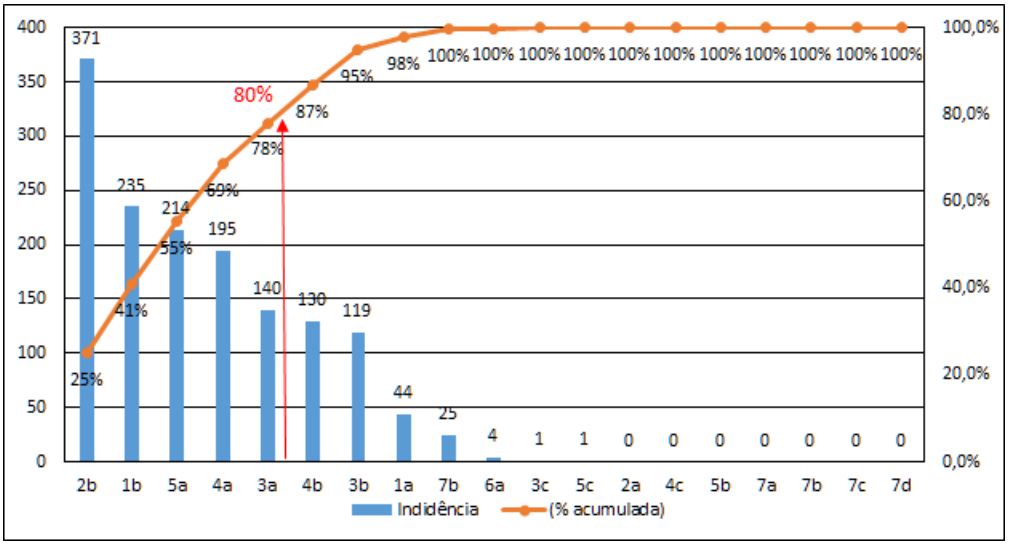


Figura 2 - Gráfico de Pareto referente à associação dos subsistemas às manifestações patológicas.

A partir do gráfico na Figura 2, verifica-se que os subsistemas “2b”, “1b”, “5a”, “4a” e “3a” apresentaram 1.155 incidências, correspondendo a cerca de 80% do total de incidências. Vale reforçar que, para um mesmo problema patológico pode ter sido associado mais de um indexador de subsistema predial, visto que um mesmo elemento da edificiação pode desempenhar funções em subsistemas diferentes simultaneamente. Isso também justifica o número de incidências ser superior ao número de problemas patológicos do banco de dados, obtendo-se 1.479 associações de subsistemas aos 769 manifestações patológicas analisadas.

A Figura 3, apresentada a seguir, apresenta a participação dos susbsistemas que compõem 80% das manifestações registradas em relação ao total de problemas patológicos considerados.

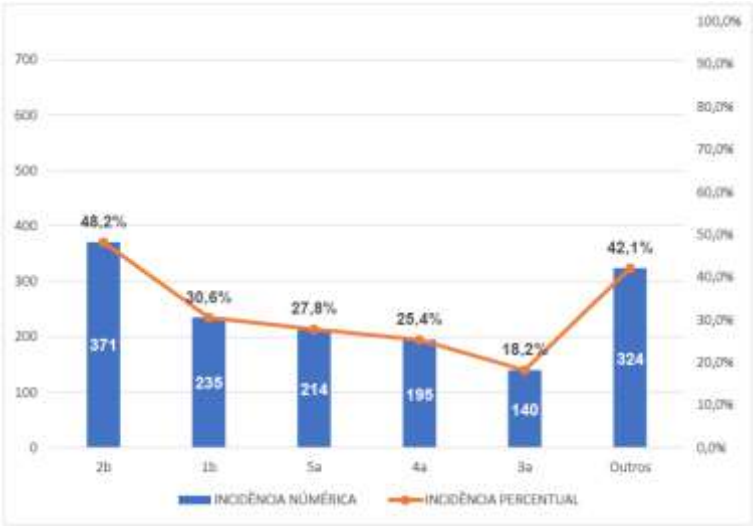


Figura 3 - Gráfico de representatividade dos subsistemas sobre os problemas patológicos.

Fonte: O autor.

Analisando-se o gráfico da Figura 3, observa-se que dos 769 problemas patológicos levantados, 371 deles tiveram a associação do indexador 2b (fechamentos externos sobre o solo), ou seja, em 48,2% dos problemas patológicos considerados, o conjunto, elemento ou componente alvo do problema desempenhava (dentre outras funções) a função de fechamento externo sobre o solo.

Ao avaliar os resultados observou-se que os subsistemas de fechamentos externos sobre o solo, superestrutura, serviços relacionados às instalações prediais hidráulico-sanitárias e as compatimentações verticais internas e externas da edificação foram os susbsistemas mais relevantes totalizando, em conjunto, quase 80 % de participação sobre os problemas patológicos considerados.

Por outro lado, outros subsistemas tiveram participação inexpressiva ou até mesmo inexistente, como no caso dos serviços de distribuição de gás, telecomunicação, aquecimento e ventilação. Deve-se considerar que a recorrência de abordagem de determinadas manifestações patológicas na bibliografia está relacionada com a frequência com que ocorrem nas obras e com o risco que elas representam, o que justifica a elevada incidência de patologias estruturais.

3.3. ANÁLISES DE REPRESENTATIVIDADE DAS ORIGENS.

Na classificação dos cadastros referentes às origens das manifestações patológicas foram considerads as etapas do ciclo de vida da construção nas quais as manifestações poderiam ter sido originadas.

Foram consideradas as etapas do ciclo de vida da edificação, desde Projetos (P), Fabricação (F) de materiais e componentes, Execução (E) e Utilização (U).

A partir desta classificação e da análise sobre a incidência dos indexadores, sendo que as 769 manifestações pode ter mais de uma origem, foi possível identificar quais foram as etapas mais indicaram à ocorrência de falhas, conforme apresentado no Quadro 4, a seguir.

Quadro 4 - Incidência das origens das manifestações patológicas.

Origem nas etapas	Quantidade de associações	Percentual
Projeto (P)	401	33,2%
Fabricação (F)	179	14,8%
Execução (E)	389	32,2%
Utilização (U)	239	19,8%
Total	1208	100,0%

Portanto, de acordo com as 769 manifestações patológicas identificadas, a etapa de Projeto (P) foi indicada como a mais sensível à ocorrência de falhas com 33,2% dos problemas patológicos podendo ser originados nessa fase. Em seguida, obteve-se a fase de Execução (E) com 32,2%; Utilização (U) com 19,8%; e a etapa de Fabricação (F), de materiais fora do canteiro com 14,8%.

Para análise dos subsistemas, um mesmo problema patológico pode ter sido associado por diferentes origens, o que justifica a quantidade total de associações para indexadores ser superior ao número total de manifestações contidas no banco de dados.

Considerando-se uma análise das manifestações registradas para cada subsistema da edificação e a origem destas manifestações, foi possível identificar a ordem de ocorrência (1ª à 5ª posição) de falhas para cada uma das possíveis etapas do ciclo de vida da edificação. O Quadro 5, a seguir apresenta os resultados obtidos.

Quadro 5 - Ordem de registros da origem das manifestações patológicas.

Posição	Projeto (P)	(%)	Fabricação (F)	(%)	Execução (E)	(%)	Uso (U)	(%)
1ª Posição	5a	41,0	3b	22,6	3a	38,7	5a	34,5
2ª Posição	1b	30,9	1b	22,3	4a	36,7	4a	17,3
3ª Posição	3b	29,5	4b	20,7	2b	35,9	4b	17,1
4ª Posição	2b	28,6	2b	19,2	1b	34,9	3a	16,5
5ª Posição	4a	28,6	4a	17,3	4b	34,1	2b	16,3

A Figura 4, a seguir, apresenta a frequência de registros de manifestações patológicas nas etapas do ciclo de vida edificação, em ordem de ocorrência (1ª a 5ª posição) e a média representativa da origem das manifestações.

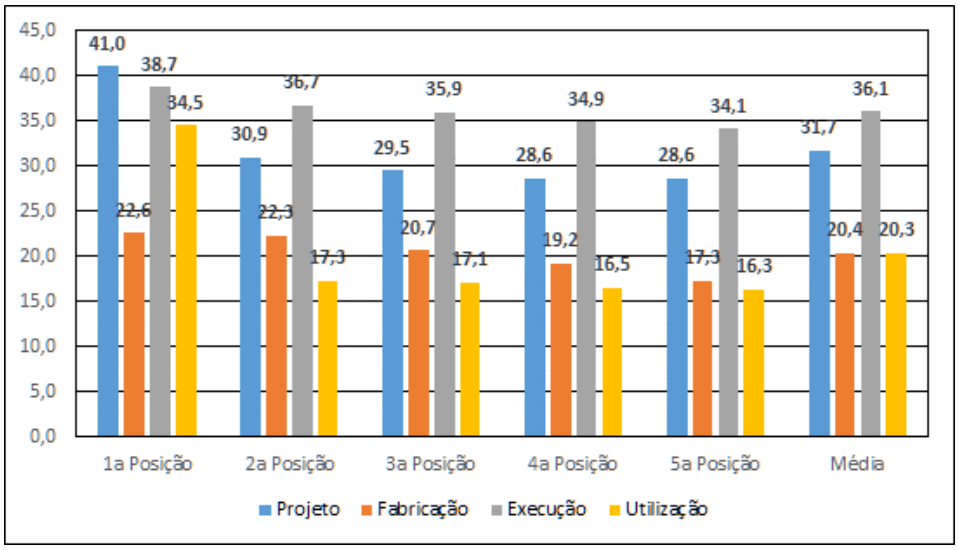


Figura 4 - Ordem de ocorrência (posição) das origens das manifestações patológicas.

Analisando-se as informações apresentadas no Quadro 4 e Figura 4, denota-se que os subsistemas com maior incidêcia de registros, e portanto mais sujeitos às falhas durante as fases do ciclo de vida da edificação, foram respectivamente:

- Etapa de Projeto (P): 5a - Distribuição de Água Potável e Disposição de águas residuárias e de reuso;
- Etapa de Fabricação (F): 3b - Compartimentações Horizontais Externas;
- Etapa de Execução (E): 3a - Compartimentações Verticais Externas;
- Etapa de Uso (U): 5a - Distribuição de Água Potável e Disposição de águas residuárias e de reuso;

Para as etapas de Projeto (P) e de Uso (U), o subsistema 5a, referente às instalações hidráulico sanitárias apresenta-se na primeira posição em relação aos registros de ocorrências de manisfestações patológicas.

Como exemplo, pode-se se citar o registro na bibliografia da manifestação patológica “Pressões inadequadas nos pontos de utilização”, com origem no Projeto e com a seguinte terapia para mitigação:

> (...) O reservatório deve ser localizado o mais próximo possível dos pontos de consumo. O ideal seria localizá-lo em uma posição equidistante dos pontos de consumo, diminuindo, consequentemente, as perdas de carga e a altura necessária para compensar essas perdas." (CARVALHO JR, 2015, p.63)

E para manifestação com origem no Uso (U), o registro de “Vazamentos em torneiras (se manifestam por gotejamento ou escoamento em filete), com terapia para mitigação:

> “as instalações prediais de água fria devem ser projetadas de modo a promover economia de água e energia durante a vida útil do edifício. Portanto, a manutenção periódica, com a substituição do reparo da torneira, evita este desperdício." (CARVALHO JR., 2015, p.79)

Para as manifestações originadas nas fases de Fabricação (F) e de Execução(E), os subsistemas referentes aos subsistemas 3b e 3a, respectivamente compartimentações horizontais e verticais externas e de compartimentações verticais e horizontais internas, respectivamente. Como exemplo, pode-se indicar uma manifestação patológica que ocorrem nestes 2 susbsitemas “Delaminação:

descolamento da argamassa superficial do concreto", cuja origem pode ser creditas para as estapas de Fabricação (F) e Execução (E), com a seguinte terapia (recomendação):

> "Limitar o teor de ar incorporado, a exsudação, e o teor de argamassa. Verificar o traço antes da concretagem; Executar placa teste (incluir no cronograma da obra); Evitar condições atmosféricas desfavoráveis: insolação direta, ventos, baixa umidade etc. (RODRIGUES, P.P.F., 2020).

CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, foi possível levantar um conjunto expressivo de registros na literatura, da ordem de 800, sobre manifestações patológicas que permitiram identificar as origens, causas e efeitos mais presentes na Construção Civi, e a partir dos registros pode-se identificar as recomendações de ações corretivas e preventivas, que podem contruir na resolução de mitigação dos efeitos destas manifestações.

Pode-se concluir que houve a necessidade de encontrar fontes na bibliografia que estivem associados aos subsistemas propostos pela ISO 19208 (ISO,2016), que serviu de estrutura para organizar os registros, de modo que se tivesse um arranjo de causas, efeitos e terapias, em sintonia com a visão sistêmica proposta pela ISO.

Analisando-se as bibliografias que serviram para formar o banco de dados com os cadastros das manifestações patológicas, conclui-se que 47,74% referem-se a materiais didáticos (livros), e dissertações de mestrado com 21,49%. Também que que cerca de 65% dos documentos consultados foram publicados após o ano de 2010 e cerca de 75% foram publicados após o ano 2000.

Com relação à planilha geral de cadastros, os subsistemas que mais foram associados aos problemas patológicos foram os fechamentos verticais externos sobre o solo, presentes em 48,2% dos problemas abordados, seguido dos subsistemas de superestrutura, com 30,6%, e instalações prediais hidráulico-sanitárias com 27,8%.

As análises percentuais das origens destacaram o quanto alguns subsistemas são mais suscetíveis às falhas em determinadas etapas, como no caso das instalações prediais hidráulico-sanitárias nas fases de projeto e utilização, com 41% das manifestações patológicas levantadas originadas na fase de projeto e 34,5% na etapa de utilização. Deve-se comentar também as compartimentações horizontais e verticais externas à edificação que consistiram nos subsistemas com maior incidência percentual de problemas patológicos originadas nas fases de fabricação e execução, com 22,6% e 38,7% respectivamente.

Com as análises realizadas, obteve-se resultados percentuais muito similares aos apresentados em outras literaturas, no que diz respeito à distribuição dos percentuais das origens para os problemas patológicos levantados corrroborando que a metodologia empregada foi aderente aos objetivos do trabalho.

Por fim, espera-se que os cadastros levantados sejam objeto de melhorias e aproveitados para consultas por profissionais da área da construção civil, contribuindo na disseminação de lições aprendidas relacionadas às manifestações patológicas e às boas práticas da engenharia.

REFERÊNCIAS

Bertolini, L. Materiais de construção. São Paulo: Oficina de texto. 2010. 415p.

Bolina, F. L; Tutikian B. F., Helene P. R. L.. Patologia de estruturas. São Paulo: Oficina de texto. 2019.

Carvalho Junior, R... Patologias em sistemas prediais hidráulico-sanitários: 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

Helene, P. Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988.

International Organization For Standardization. ISO 19208:2016 - Framework for specifying performance in buildings. Vernier, 2016.

Rodrigues, P. P. F. Patologias em pisos de concreto: causas e soluções. In: Seminário de pisos e revestimento de alto desempenho. 2017, São Paulo. Disponível em: <http://docplayer.com.br/75017710- Patologia-em-pisos de-concreto- causas-e-solucoes.html.>. Acesso em: 19 fev. 2020

Souza, V. C.; Ripper, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO

José Robero Hortêncio Romero[a]; Carla Raquel Felippini Dreossi[b]

[a]Engenheiro Civil (NeoMix Concreto, São Paulo, Brasil), jose.romero@neomixconcreto.com.br.

[b]Técnico em Edificações (NeoMix Concreto, São Paulo, Brasil), carla.dreossi@neomixconcreto.com.br.

RESUMO

O presente artigo aborda as principais manifestações patológicas em pisos industriais de concreto, destacando a importância de práticas construtivas adequadas, a utilização de materiais de qualidade, contratação de profissionais qualificados e uso de equipamentos específicos, além da adesão a padrões rigorosos de qualidade em todas as etapas construtivas, bem como a manutenção preventiva para garantir a durabilidade e integridade estrutural. O papel do projeto é ressaltado como fundamental na prevenção de manifestações patológicas, exigindo uma análise minuciosa do local e uma compreensão completa das demandas da atividade. Estratégias de mitigação de fissuras são discutidas, e a coleta e análise extensiva de dados são apresentadas como ferramentas indispensáveis para entender e mitigar manifestações patológicas, contribuindo para a excelência na construção civil e prolongando a vida útil das estruturas de concreto. O artigo visa também fomentar a conscientização sobre a relevância de práticas preventivas e cuidados específicos na construção e manutenção de pisos industriais.

Palavras-chave: pisos e pavimentos de concretos, manifestações patológicas, fissuração, procedimento de execução de pisos, pavimentos de concreto.

1 INTRODUÇÃO

A integridade e funcionalidade de pisos industriais são cruciais em ambientes industriais, sendo o concreto amplamente empregado devido às suas propriedades de durabilidade e versatilidade. Contudo, esses pisos estão suscetíveis a manifestações patológicas, particularmente fissuras, que podem comprometer tanto a estética quanto a performance estrutural. A prevenção e mitigação dessas manifestações patológicas são, portanto, essenciais, demandando uma compreensão abrangente de suas causas, consequências e estratégias de intervenção.

Este artigo tem como principal objetivo elucidar as complexidades associadas às manifestações patológicas em pisos industriais de concreto, com foco na fissuração, e destacar a necessidade de práticas construtivas aprimoradas e manutenção preventiva. A relevância desta investigação reside na busca por soluções que assegurem a durabilidade e eficácia desses pisos em condições industriais adversas, contribuindo assim para o avanço das práticas de construção e manutenção no setor industrial.

O concreto, pilar essencial na engenharia civil, desempenha um papel crucial na estruturação e durabilidade dos pisos industriais. Sua composição e propriedades estruturais são determinantes para a capacidade de carga, resistência ao desgaste e preservação da integridade estrutural ao longo do tempo.

Aprofundar-se nesses conceitos é imperativo para a identificação, avaliação e mitigação efetiva das manifestações patológicas que podem comprometer os pisos industriais, constituindo um alicerce para o aprimoramento das estratégias de manutenção e conservação destas estruturas vitais.

2 PISOS E PAVIMENTO DE CONCRETO

Referente a pisos e pavimentos de concreto, enfatiza-se a importância destes componentes estruturais na distribuição de cargas verticais e melhoria das condições de tráfego, visando segurança, conforto e durabilidade (ABNT, 1982). A construção destas estruturas envolve a complexa sobreposição de diversas camadas com propriedades específicas, demandando cálculos precisos para tensões e deformações. A Associação Nacional Pisos Revestimentos Alto Desempenho – Anapre, sublinha a função vital dos pisos de concreto no suporte a atividades produtivas e na movimentação de cargas, resistindo a variados esforços. Adicionalmente, destaca-se que os pisos de concreto podem ser compostos por até cinco camadas, cada uma cumprindo papéis cruciais tanto na execução quanto na prevenção e tratamento de possíveis falhas construtivas e manifestações patológicas.

2.1 TIPO DE PISOS/PAVIMENTOS DE CONCRETO

Os pisos de concreto, dado à sua versatilidade, adequam-se a diferentes cargas e requisitos estruturais e funcionais. É essencial compreender as características dos diversos tipos de pisos, incluindo tecnologia, comportamento dos materiais, métodos de dimensionamento, logística de execução, envolvimento dos profissionais e considerando-se os princípios das engenharias: segurança, economia e durabilidade. Quanto à sua classificação, os pisos podem ser divididos em quatro aspectos, conforme Quadro 1.

2.2 ETAPAS EXECUTIVAS DO PISO INDUSTRIAL

Os pisos de concreto, dado à sua versatilidade, adequam-se a diferentes cargas e requisitos estruturais e funcionais. É essencial compreender as características dos diversos tipos de pisos, incluindo tecnologia, comportamento dos materiais, métodos de dimensionamento, logística de execução,

envolvimento dos profissionais e considerando-se os princípios das engenharias: segurança, economia e durabilidade. Quanto à sua classificação, os pisos podem ser divididos conforme os aspectos, apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação do sistema de pisos de concreto segundo as escolas americanas e europeia. (Anapre, 2009).

	Escola Americana	**Escola Europeia**
Referências para dimensionamento	PCA, AASHTO, Westergaard, Pickett e Ray, Packard	Lösberg e Meyerhof
Sistema construtivo	Concreto simples	Concreto armado com telas soldadas, fibras de alto módulo e protensão
Tamanho das placas	Pequenas dimensões	Grandes dimensões
Consumo de concreto	Elevado	Baixo
Custo inicial e manutenção	Elevado	Baixo
Quantidade de juntas	Elevado	Baixo
Custo e complexidade de execução	Baixo	Elevado

3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DOS PISOS DE CONCRETO

A patologia em pisos de concreto, que trata dos desvios ou anomalias nas estruturas, conforme definido por Cánovas, 1988, muitas vezes resulta de falhas na execução ou no projeto, trazendo prejuízos significativos às operações industriais. Isso inclui aumento nos custos de manutenção, redução na durabilidade dos equipamentos, perda de produção, problemas logísticos, falhas em dispositivos eletrônicos e prejuízo estético. Para prevenir essas questões, é essencial controlar rigorosamente todas as etapas de execução do pavimento, realizar classificação adequada das manifestações patológicas identificadas e efetuar testes para verificar material, equipamento e mão de obra.

3.1 TIPOS, CAUSAS DE TRINCAS E DESLOCAMENTOS (FISSURAS) DO PAVIMENTO DE CONCRETO

Das diversas manifestações patológicas comuns em pisos industriais de concreto, destacam-se a fissuração por retração, o esborcinamento de juntas, o desgaste por abrasão, problemas associados à umidade ascendente, o empenamento das bordas (*curling*), a delaminação (*delamination*) e o fenômeno conhecido como 'borrachudo' (*crusting*), conforme Chodounsky, 2010.

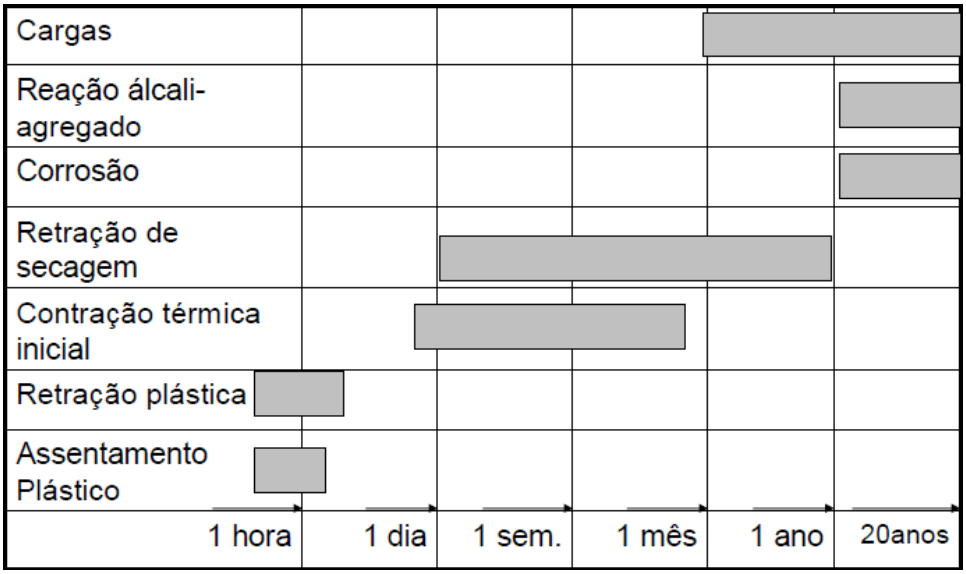
Dentre esses, a fissuração excessiva se destaca como o dano mais prevalente, sendo influenciada tanto por alterações internas no comportamento do material ao longo do tempo (efeitos reológicos), quanto pela sua composição e pelos esforços aplicados. As fissuras podem variar em tamanho, desde microfissuras de aproximadamente 0,05 mm até aberturas consideravelmente maiores, de acordo com Filho e Carmona, 2013.

3.2 FISSURAÇÃO

As fissuras em estruturas de concreto podem surgir de tensões devido à restrição de movimento, retração durante a secagem, variações térmicas, deformações plásticas, expansão de materiais internos, como corrosão de armaduras, e condições externas. O 'concreto jovem' é mais propenso a fissuras nas primeiras horas após a concretagem, conforme mostra o Quadro 2. Portanto, é crucial

monitorar e gerenciar esses fatores para reduzir o risco de fissuração.

Quadro 2 – Causas de fissuração do concreto a partir da concretagem. (Granato, 2014).



A fissuração em pisos industriais de concreto, que geralmente se manifesta em pequenas aberturas longitudinais, representa um desafio significativo para a manutenção e preservação da integridade estrutural, uma vez que cria vias de infiltração para agentes nocivos. Mesmo com esforços para prevenção, a fissuração pode ser difícil de evitar completamente.

As causas das deformações que levam à fissuração podem ser intrínsecas, relacionadas a fatores internos do material; extrínsecas, devido a influências externas; ou uma combinação de ambas, aumentando a complexidade do problema. Existem cinco categorias principais de fissuras em concreto identificadas na literatura, cada uma com suas causas e impactos específicos na durabilidade e funcionalidade das estruturas: fissuração por retração, fissura estrutural, retração química, excesso de água na superfície e efeitos da temperatura. Identificar corretamente a causa é fundamental para adotar as medidas corretivas adequadas. Alguns tipos de fissuras nas estruturas são apresentados na Figura 1.

3.2.1 Fissuração por retração

As fissuras por retração, conforme modelo da Figura 2 em pisos de concreto, caracterizadas por aberturas regulares alinhadas às juntas serradas, são influenciadas por uma variedade de fatores (Figura 1). Estes incluem atrasos no corte das juntas, inadequação do reforço estrutural e restrições à movimentação das placas, por vezes devido à preparação insuficiente da base e resultando em espessuras irregulares. Para mitigar essas fissuras, é crucial considerar a geometria estrutural, a composição do concreto e as condições ambientais durante o planejamento e execução do projeto, visto que cada um desses fatores desempenha um papel essencial na prevenção e controle da fissuração por retração. Três características que, combinadas, levam o concreto a retrair: geometria da estrutura, traço do concreto e condições climáticas.

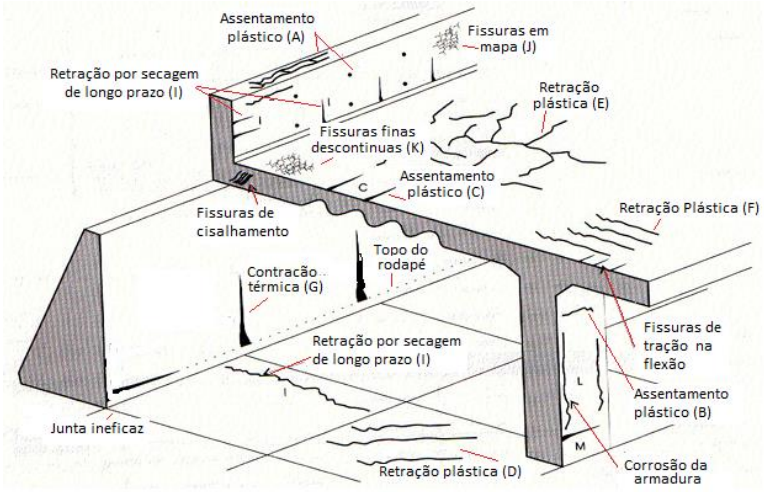


Figura 1 – Tipos de fissuras nas estruturas de concretos. (Granato, 2014).

Figura 2 – Fissura no concreto por retração. (Granato, 2014).

- <u>Geometria da estrutura</u>: a geometria estrutural influencia significativamente a retração do concreto, especialmente em peças com alta razão entre superfície exposta e volume, onde a perda de água é mais rápida. Essa condição é agravada pelo uso crescente de placas de concreto maiores e mais esbeltas, tornando pisos e pavimentos mais suscetíveis aos efeitos da retração, o que requer atenção e medidas preventivas para prevenir danos estruturais.

- **<u>Traço do concreto</u>**: a retração do concreto, em especial a causada por secagem, é fortemente influenciada pela composição e propriedades dos materiais utilizados. Fatores como tipo e características dos agregados, proporção água-cimento, e a inclusão de adições minerais e aditivos químicos são cruciais. Para reduzir a retração, é aconselhável usar agregados com alto módulo de deformação, limitar o uso de água, evitar agregados com excesso de material pulverulento e argila, e preferir uma distribuição granulométrica contínua.

- **<u>Condições climáticas</u>**: condições climáticas extremas, como altas temperaturas, baixa umidade e ventos fortes, potencializam a perda de água por evaporação no concreto, levando à retração e à formação de diversos tipos de fissuras. Estas fissuras, que incluem retração plástica, hidráulica, por

carbonatação, térmica e microfissuras "pé-de-galinha", ameaçam a durabilidade e a integridade do concreto. Em situações específicas, a taxa de evaporação pode chegar a 1 litro/m²/hora, intensificando a retração plástica. É crucial entender esses fenômenos e suas condições propulsoras para desenvolver e aplicar estratégias eficazes de mitigação e preservar a estrutura de concreto.

3.2.2 Tipos de fissura por retração

- **Fissuras de retração plástica**: fissuras de retração plástica no concreto, conforme Figura 3, são rasas, pequenas (menos de 0,5 mm) e formam-se em ângulos de 45° a 60° em relação ao eixo longitudinal durante o endurecimento do concreto. Ocorrendo antes da pega e representando 1% do volume de cimento, essas fissuras são influenciadas por condições ambientais e pela taxa de evaporação da água. É vital gerenciar a temperatura do concreto fresco e dos materiais para minimizar o risco dessas fissuras, dada a propriedade da água em reter calor.

Figura 3 – Fissura causada por retração plástica. (Abcp, 2003).

- **Fissuras de retração hidráulica ou por secagem**: a retração hidráulica, ou por secagem, conforme apresentado na Figura 4, ocorre devido à perda gradual de água de amassamento do concreto, sendo mais intensa em pastas e argamassas devido ao maior teor de água. Fatores como escolha inadequada de juntas, armadura insuficiente ou mal posicionada, e práticas construtivas que restrinjam o movimento da estrutura ou aumentem o atrito com a base, podem contribuir para fissuras associadas à retração por secagem. Portanto, é essencial atentar-se a esses elementos para assegurar a durabilidade e integridade estrutural do concreto.

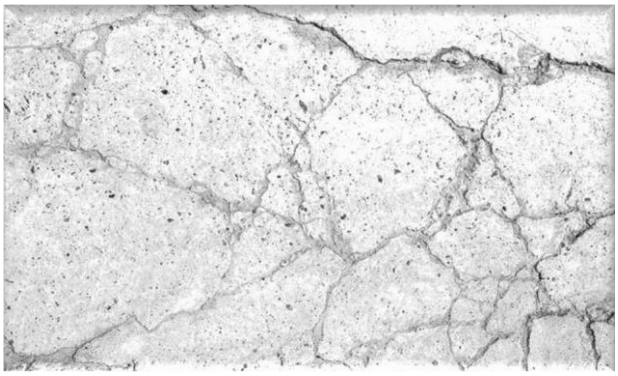


Figura 4 – Fissuras de retração por secagem. (Anapre, 2016).

- **Retração por carbonatação**: a retração por carbonatação, conforme Figura 5, ocorre quando os cristais de hidróxido de cálcio em tensão se dissolvem e formam carbonato de cálcio em áreas menos

tensionadas, um processo que pode levar à retração e microfissuras superficiais com aparência de craqueamento. Esse fenômeno geralmente se manifesta em períodos que variam de 5 a 20 anos e é intensificado pelo teor de cimento e pelo confinamento proporcionado pelas paredes adjacentes.

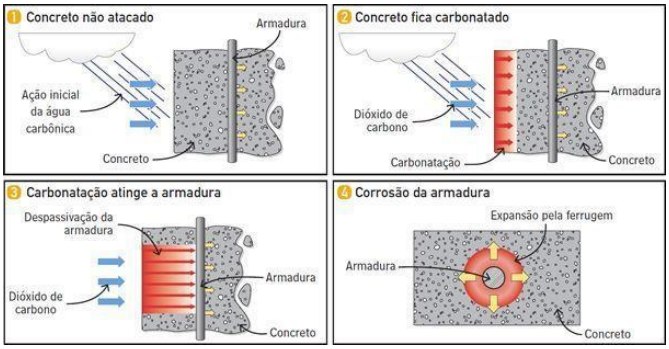


Figura 5 – Ação da ocorrência de carbonatação. (Anapre, 2016).

- **Retração térmica**: a retração térmica no concreto, apresentado na Figura 6, induzida por variações de temperatura durante e após a hidratação do cimento, é um fenômeno crítico, especialmente em estruturas de grande volume. Essas mudanças volumétricas requerem atenção especial para assegurar a durabilidade e integridade da construção.

Figura 6 – Fissuração por contração e retração térmica. (Granato, 2014).

- **Microfissuras tipo "pé-de-galinha"**: As microfissuras "pé-de-galinha", conforme Figura 7, são sutis e tendem a se tornar mais visíveis com ciclos de umidade, especialmente em pisos sujeitos à acumulação de sujeira. Mesmo evidentes, nem sempre indicam problemas estruturais. Sua formação está associada a condições ambientais desfavoráveis, técnicas incorretas de acabamento, uso de concreto rico em finos, impurezas nos agregados e cura inadequada. Prevenir e controlar esses fatores é essencial para manter a integridade e aparência do piso.

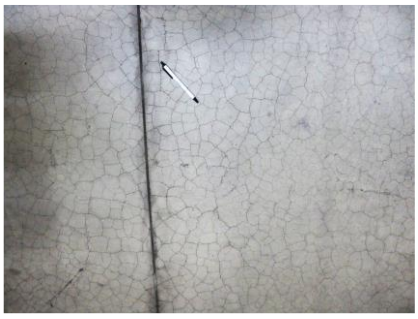


Figura 7 – Microfissuras tipo "pé de galinha" em piso de concreto. (LPE, 2017)

3.3 INFLUÊNCIAS NAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

3.3.1 Influência ambiental sobre a evaporação da água

A observação constante da taxa de evaporação da água é fundamental durante a concretagem para prevenir fissuras por retração plástica. Essa taxa é determinada pela temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura do concreto e velocidade do vento, exigindo medições específicas para cada parâmetro. Uma taxa de evaporação de 1 Kg/m²/h ou mais sinaliza um alto risco de fissuração, necessitando de ações imediatas para manter a integridade do concreto. Através do ábaco da Figura 8, pode-se avaliar o risco do desenvolvimento de fissuras no concreto.

Para utilizar o diagrama, é necessário medir as quatro variáveis envolvidas. Assim, entre primeiro com a temperatura do ar e encontre a umidade relativa; mova este ponto até encontrar a temperatura do concreto e em seguida mova até a velocidade do vento. Mova para a esquerda e leia a taxa de evaporação aproximada.

A taxa de evaporação também pode ser calculada por meio da seguinte expressão (ACI, 2007).

$$E = 5\,([Tc - 18]\,2 \times 5 - r\,[Ta + 18]\,2 \times 5\,(V + 4) \times 10 - 6$$

Onde:

E = taxa de evaporação (kg/m²/h);

Tc = temperatura do concreto (°C);

Ta = temperatura do ar (°C);

r = umidade relativa do ar (%);

V = velocidade do vento (km/h).

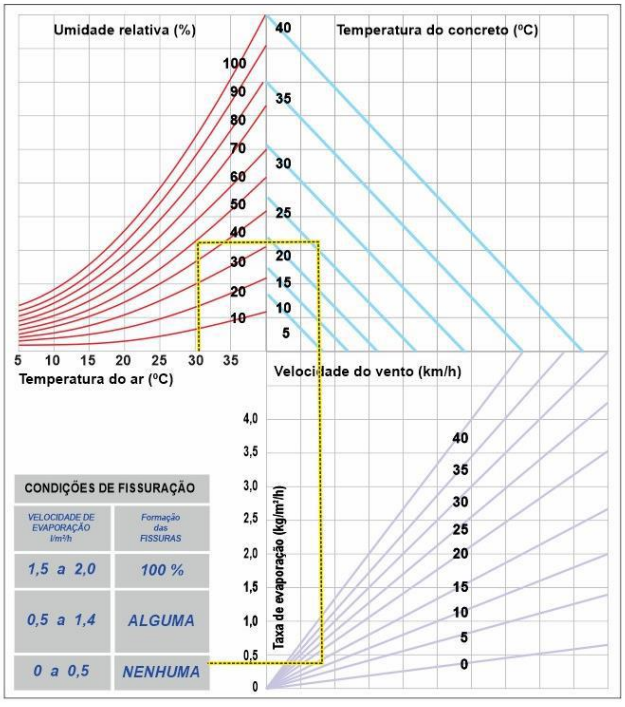


Figura 8 – Ábaco de influência ambiental sobre a evaporação da água do concreto. (Cánovas, 1988).

3.3.2 Influência da resistência inicial

Concretos com menores resistências mecânicas nas primeiras horas apresentam menos combate as tensões de tração que levam a fissuração. A recomendação do PCA para o caso de concretos elaborados com cimentos com adição de pozolona e outras adições de elevada área específica (sílica ativa ou metacaulium) é que a taxa de evaporação considerada crítica seja reduzida a 1,0Kg/m²/h para 0,5Kg/m²/h.

4 PROCESSOS CONSTRUTIVOS E MÉTODOS PREVENTIVOS

Conforme Romero e Pileggi, 2017, o processo construtivo de pavimentos de concreto deve ser acompanhado por métodos preventivos para minimizar fissuras, especialmente em pisos críticos devido à circulação de equipamentos pesados.

4.1 MEDIDAS PREVENTIVAS

Prevenir fissuras requer compreender e controlar todas as etapas da construção dos pisos. O processo de construção inclui a concepção do projeto, a execução das tarefas de acordo com o cronograma e a utilização coerente com o projeto. Custos de intervenção aumentam exponencialmente quanto mais tarde forem realizadas. Portanto, é mais econômico investir em medidas preventivas no estágio de projeto.

4.2 PROJETO

O projeto é essencial para definir a resistência necessária, suportar as condições ambientais e garantir a durabilidade do pavimento. É crucial contar com profissionais especializados, mão de obra qualificada e considerar medidas como aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação água/cimento do concreto e especificar tratamentos protetores de superfície.

4.3 ANÁLISE DO TERRENO DE FUNDAÇÃO, TERRAPLANAGEM E COMPACTAÇÃO

Como os solos são muito diferentes entre si, respondendo de maneira variável às solicitações aplicadas, torna-se necessário o estudo sistemático de suas propriedades e, principalmente, da observação do seu comportamento.

O estudo do solo é essencial para pavimentos industriais. A preparação do subleito é crítica para atingir a compactação exigida. Em alguns casos, é necessário reforçar o subleito com materiais granulares ou estabilizantes químicos para atender aos requisitos do projeto, conforme pode-se observar na Figura 9.

Figura 9 – Preparação do subleito. (Romero, 2016).

4.4 CONSTITUINTES DO CONCRETO

Determinar a espessura e as armaduras necessárias para resistir aos esforços é crucial. O dimensionamento das armaduras pode ser determinado com cálculos precisos, tanto para armaduras inferiores quanto superiores.

4.5 CONCRETAGEM DO PISO

A concretagem é uma etapa crítica, pois pode levar a diversas manifestações patológicas, incluindo fissuras. O desempenho final do piso está associado à concretagem adequada, que inclui resistência à abrasão.

4.6 MISTURA DO CONCRETO

O concreto usinado é amplamente utilizado em obras industriais. Caminhões betoneiras são comuns para a concretagem de pisos industriais.

4.7 LANÇAMENTO DO CONCRETO

O lançamento do concreto é uma operação importante que afeta o desempenho do piso. Equipamentos como caminhões betoneiras e bombas são usados para essa tarefa. Cuidado é necessário para evitar danos à armadura, como não permitir o trânsito de operários por sobre a armadura durante os trabalhos, conforme demonstra a Figura 10.

Figura 10 – Trânsito de operário sobre a armadura. (Granato, 2014).

4.8 ADENSAMENTO DO CONCRETO

O adensamento do concreto é essencial para remover vazios e aumentar a resistência. Réguas vibratórias e vibradores de imersão são comuns para essa operação, como por exemplo, o uso de equipamentos *Laser Screed*, que permitem grande produtividade variando entre 1.500 e 3.000 m² por dia, conforme demonstrado na Figura 11.

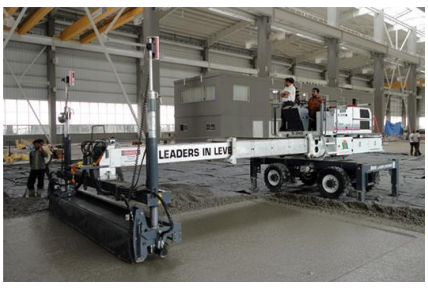


Figura 11 – Equipamento do tipo Laser Screed. (Aquarius Tech, 2017)

4.9 ACABAMENTO SUPERFICIAL

A superfície do pavimento é a principal fonte de medida do seu desempenho, pois é ela que estará em contato com todas as ações solicitantes. Podem-se dividir os pavimentos de concreto em dois grandes grupos: os de camada única, onde o próprio concreto da laje funciona como revestimento, e os com revestimento, muitas vezes impropriamente chamados de revestimentos de alta resistência, que podem ser executados por dois procedimentos distintos, denominados úmido-sobre-úmido e úmido-sobre-seco.

O acabamento superficial é crítico para a planicidade do piso. Deve ser feito com cuidado, usando equipamentos como as acabadoras de superfície. O desempeno mecânico e o alisamento são etapas importantes para obter uma superfície lisa e resistente.

4.10 CURA DO CONCRETO

A cura do concreto é um processo crucial que envolve tempo, temperatura e umidade para promover a hidratação do cimento. O grau de hidratação do cimento afeta a porosidade da pasta de cimento hidratada. Tempo e umidade são críticos, e a temperatura também acelera a hidratação. Cura úmida e temperatura controlada são ideais para manter a resistência do concreto.

Tempo: O período de cura afeta diretamente a resistência do concreto. Mais tempo de cura resulta em maior resistência, desde que a hidratação ainda esteja ocorrendo.

Umidade: A cura úmida contínua é mais eficaz do que a cura ao ar, e a perda de água por evaporação prejudica a resistência.

Temperatura: A temperatura afeta a hidratação do cimento. Temperaturas mais altas aceleram a hidratação, mas temperaturas extremamente baixas podem prejudicar a resistência final.

4.11 CORTE DAS JUNTAS

As juntas em pisos de concreto são essenciais para permitir a movimentação, mas também podem ser o elo mais fraco da estrutura. Diferentes tipos de juntas, como juntas longitudinais de construção, juntas serradas e juntas de expansão, são usados para garantir a transferência adequada de carga e manter a planicidade. As juntas podem ser de três tipos: **a) Juntas Longitudinais de Construção**: São necessárias em função de equipamentos, geometria e requisitos de planicidade. Podem ser do tipo macho-e-fêmea ou usar barras de transferência; **b) Juntas Serradas**: Deve-se cortá-las 10 horas após o lançamento do concreto, com uma profundidade de cerca de 1/3 da espessura da placa; e **c) Juntas de Expansão**: Usadas para isolar o piso de outras estruturas. Devem permitir a transferência de carga adequada entre placas contíguas.

4.12 BARRAS DE TRANSFERÊNCIA

As barras de transferência são cruciais para a resistência do piso de concreto. O espaçamento e o diâmetro das barras são essenciais, comummente a 30 cm. A norma ABNT NBR 6118:2003 define requisitos para o posicionamento e o recobrimento adequados

5 CONCLUSÕES

Em assim sendo, ressalta-se a crucial importância de empregar profissionais altamente qualificados e equipamentos específicos para a execução de pisos industriais, enfatizando a adesão a padrões de

qualidade rigorosos em todas as fases do processo construtivo. O artigo destaca o papel fundamental do projeto na prevenção de manifestações patológicas, sublinhando a necessidade de uma avaliação minuciosa do local e uma compreensão completa das exigências da atividade a ser desenvolvida. Essa abordagem preventiva é essencial para antecipar solicitações estruturais e fornecer dados para cálculos, logística e estratégias de mitigação de fissuras.

Enfatiza-se, ainda, a importância de seguir rigorosamente procedimentos e verificações específicas, desde a análise do solo e elaboração de projetos até a preparação do subleito, seleção de materiais e gestão de equipamentos. Além disso, práticas construtivas adequadas e uma atenção especial ao processo de cura são fundamentais para garantir a resistência e durabilidade do concreto. Reconhecemos que, apesar dos esforços para minimizar manifestações patológicas, é desafiador garantir a conformidade total com as melhores práticas em todas as etapas, sendo a identificação da fase mais crítica para prevenir fissuras um desafio contínuo. Concluímos que a coleta e análise extensiva de dados são ferramentas indispensáveis para entender e mitigar manifestações patológicas em pisos de concreto.

REFERÊNCIAS

Abnt – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118:2003: Projetos de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Abcp – Associação Brasileira de Cimento Portland. Inspeção e Diagnóstico do Concreto Aplicado em Lajes de Edifícios Residenciais. Relatório 25114. São Paulo, 2003.

Anapre – Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho. Mídia Institucional, 2009. http://www.anapre.org.br/cd2009/anapre_final.html

Anapre – Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho. Boletins Técnicos 1 a 24. Anapre, 2010. https://site.anapre.org.br/boletins-tecnicos

Aquarius Tech. Laser Screed. http://aquariustech.net/SCREEDSAVER-2.html

Cánovas, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. 1 Ed. São Paulo: Pini, 1988. 522p.

Chodounsky, M. A. Patologias em pisos industriais. São Paulo, 2010.

Filho, A. C., Carmona, T. G. Boletim Técnico 03: fissuração nas estruturas de concreto. México: Alconpat, 2013.

Granato, J. E. Patologia das construções. São Paulo, 2014.

LPE Engenharia. Fissuras tipo “couro de jacaré”: é de fato um problema? http://lpe.tempsite.ws/blog/index.php/fissuras-tipo-couro-de-jacare-e-de-fato-um-problema

Romero, J. R. H. Patologia do concreto: trincas e fissuras. Universidade Paulista - UNIP. Ribeirão Preto, 2016.

Romero, J. R. H., Pileggi, R. S. Determinação dos principais procedimentos que se devem ser adotados na execução de um piso/pavimento de concreto com o propósito de se prevenir a ocorrência das fissurações. TCC Pós-Graduação. São Paulo: Instituto IDD, 2017.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

COMPATIBILIDADE DE ARGAMASSAS DE FIXAÇÃO SUPERIOR E ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Henrique Sasso[a], Aline Zini[b], Emili Cappelari[c,] Angela Borges Masuero[d], João Ricardo Masuero[e]

[a] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE - Avenida Paulo Gama 110, 90046-902, Porto Alegre, Brasil, henrique_sasso@hotmail.com

[b] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE - Avenida Paulo Gama 110, 90046-902, Porto Alegre, Brasil, zini.aline93@gmail.com

[c] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE - Avenida Paulo Gama 110, 90046-902, Porto Alegre, Brasil, emili_cappelari@hotmail.com

[d] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE - Avenida Paulo Gama 110, 90046-902, Porto Alegre, Brasil, angela.masuero@ufrgs.br

[e] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI - Avenida Paulo Gama 110, 90046-902, Porto Alegre, Brasil, joao.masuero@ufrgs.br

RESUMO

A zona de fixação superior da alvenaria, também conhecida como encunhamento, é o elemento de ligação entre o topo da alvenaria e o fundo da viga ou da laje de concreto. É uma região onde frequentemente aparecem manifestações patológicas, tais como descolamentos, desplacamentos e fissuras. Entre os fatores que podem estar contribuindo para a ocorrência destes problemas, se destaca e incompatibilidade entre as argamassas utilizadas para a fixação superior e o revestimento, bem como a deformação excessiva dos elementos estruturais utilizados, que ocasionam a compressão da camada de fixação e do painel de alvenaria. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a compatibilidade das propriedades de argamassas utilizadas usualmente como fixação superior e revestimento. Para tanto, foram avaliadas 3 argamassas de fixação superior (baixo, intermediário e alto módulo de elasticidade) e 3 argamassas de revestimento (baixo, intermediário e alto módulo de elasticidade). Após a caracterização no estado fresco e endurecido, a compatibilidade entre elas foi avaliada por meio de ensaio de prismas, moldados para simular a região de fixação superior. Optou-se pelo ensaio de 3 distintas configurações, empregando a argamassa de fixação de baixo módulo e as 3 argamassas de revestimento. Os resultados mostram que a escolha dos mateiais empregados deve levar em conta a resistência do painel de alvenaria, pois materiais mais rígidos podem minimizar manifestações patológicas na região de fixação superior, mas geram cargas mais elevadas que podem comprometer outros elementos do sistema de vedação.

Palavras-chave: fixação superior de alvenaria, encunhamento, argamassas, manifestações patológicas.

1 INTRODUÇÃO

A fixação superior da alvenaria, também conhecida como encunhamento, consiste no elemento construtivo de transição entre a última fiada da alvenaria de vedação e o fundo da viga ou laje de concreto. A fixação superior se caracteriza pelo procedimento de preenchimento e de fixação da parede de alvenaria ao elemento estrutural, sendo responsável pela interação entre eles, incluindo a absorção de parte das deformações verticais da estrutura (Zini, 2021). Na Figura 1 é apresentada uma foto da fixação superior executada em um canteiro de obras.

Figura 1 – Fixação superior da alvenaria (Fonte: adaptado de Torga, 2020)

No Brasil, a fixação superior é realizada de diferentes formas, não havendo consenso na literatura indicando em que contexto devem ser utilizados materiais mais rígidos ou mais flexíveis. Normalmente, o espaço entre a última fiada da alvenaria e a estrutura é preenchido com argamassa ou material flexível, mas também podem ser empregados tijolos maciços inclinados a 45°.

A maior ocorrência de manifestações patológicas na região de fixação superior nos últimos anos tem recebido mais atenção por parte dos construtores e usuários, uma vez que causam prejuízo estético e perda de desempenho dos sistemas constituintes da edificação. Frequentemente ocorrem descolamentos, desplacamentos, fissuras, e inclusive esmagamento de blocos de alvenaria, tais como o observado na Figura 2 (Fortes, 2019).

Figura 2 – (a) Desplacamento de revestimento e (b) esmagamento de blocos cerâmicos na região de fixação superior (Fonte: acervo Marcus Daniel Friederich dos Santos)

Entre os muitos fatores que podem estar contribuindo para a ocorrência destes problemas, destacam-se a incompatibilidade entre as argamassas utilizadas para fixação superior e a argamassa de revestimento, bem como a deformação excessiva dos elementos estruturais utilizados, que ocasionam a compressão da camada de fixação e do painel de alvenaria. Segundo Muci, Netto e Silva (2014), a

ligação entre a estrutura de concreto e a alvenaria de vedação feita de maneira correta é fundamental para a prevenção de fissuras. Essa interface é um ponto suscetível ao surgimento de manifestações patológicas, uma vez que é constituída pela combinação de materiais diversos e está sujeita a deformações da estrutura.

Para a Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e de Cristalaria (APICER, 2009), a prevenção da fissuração das alvenarias devido à deformação dos elementos estruturais deve ser feita por meio da limitação das flechas, do aumento da deformabilidade da parede e pela adoção de medidas que mitiguem os efeitos do deslocamento vertical da estrutura. Além disso, recomenda a adoção de material resiliente na fixação superior, como uma argamassa com baixo módulo de elasticidade, de modo que as flechas sejam absorvidas e os esforços não sejam transmitidos à parede.

Montes et al. (2020) realizaram estudo que avaliou numericamente a interação entre a alvenaria de vedação e a estrutura, através do método dos elementos finitos (MEF), verificando os esforços nessa interface de transição quando empregados diferentes métodos e materiais. Os resultados mostraram que a execução da fixação superior, seja com argamassa rígida ou flexível, diminui as tensões sobre a alvenaria de vedação. Todavia, não foi avaliado o papel do revestimento na distribuição de tensões, nem o surgimento de manifestações patológicas.

Tendo em vista a lacuna de conhecimento existente, este estudo procura avaliar, através de método experimental, a compatibilidade entre diferentes argamassas de fixação superior e de revestimento através de ensaio de deformação vertical, desenvolvido pelo grupo de pesquisa sobre a fixação superior de alvenarias do laboratório do LAMTAC/NORIE da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), conforme descrito em Zini (2021).

2 METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A partir de ensaios realizados em estudos-pilotos, foram escolhidas 3 argamassas de fixação superior (FA, FI e FB) e 3 argamassas de revestimento (RA, RI e RB), tanto industrializadas quanto produzidas em laboratório, permitindo a avaliação de argamassas em diferentes faixas de módulos de elasticidade: alto (A), intermediário (I) e baixo (B). A denominação, característica e traço de cada argamassa avaliada são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Denominação, característica e traço de cada argamassa estudada

Denominação	Característica	Traço (massa)	Relação água/ materiais secos
FA	Alto módulo	Traço 1:5 (cimento: areia) c/ 1% de aditivo expansor	0,13
FI	Módulo intermediário	Industrializada	0,15
FB	Baixo módulo	1:1,19:9,71 (cimento: cal: areia)	0,18
RA	Alto módulo	Traço 1:1:4 (cimento: cal: areia)	0,19
RI	Módulo intermediário	Industrializada	0,18
RB	Baixo módulo	Industrializada	0,14

Para a caracterização das argamassas, foram realizados os ensaios indicados no Quadro 2. O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com a aplicação das argamassas a um substrato de concreto f_{ck} = 35 MPa. Foram utilizados 2 chapiscos distintos, um aplicado com rolo (CR), para as argamassas FA, FB, RA e RI; e outro aplicado com desempenadeira denteada (CD) para as argamassas

FI e RB, conforme recomendação do fabricante destas. O ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático foi desenvolvido conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017), adaptada para argamassas.

Quadro 2 – Ensaios realizados para a caracterização das argamassas

Ensaio	Norma
Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Densidade de massa no estado fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)
Retenção de água	NBR 13277 (ABNT, 2005)
Densidade de massa no estado endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2009)
Módulo de elasticidade estático	NBR 8522 (ABNT, 2017)
Resistência à compressão Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência de aderência à tração	NBR 13528 (ABNT, 2019)

2.2 ENSAIO DE PRISMAS

Para avaliar a compatibilidade entre as argamassas de encunhamento e de revestimento, foi empregado um ensaio de deslocamento vertical desenvolvido por Zini (2021). O ensaio consiste na aplicação de patamares de deslocamentos, com auxílio de prensa hidráulica de laboratório, sobre prismas de alvenaria moldados para simular a região de fixação superior. Durante o ensaio são registrados o deslocamento total imposto, a carga e as manifestações patológicas ocorridas.

2.2.1 Moldagem dos prismas

Os prismas são moldados para simular a região de fixação superior, sendo compostos por: bloco cerâmico, do tipo específico para fixação superior; maciço de concreto com f_{ck} = 35 MPa, para simular o elemento estrutural; camada de argamassa de encunhamento; e revestimento de argamassa de ambos os lados. Para este trabalho, foram moldados prismas com espessura de revestimento de 1,5 cm e altura da camada de fixação superior de 2 cm. Uma ilustração dos prismas moldados é apresentada na Figura 3. As armaduras presentes são apenas elementos utilizados na construção dos prismas e os limitadores de juntas são empregados para controle da largura da camada de encunhamento.

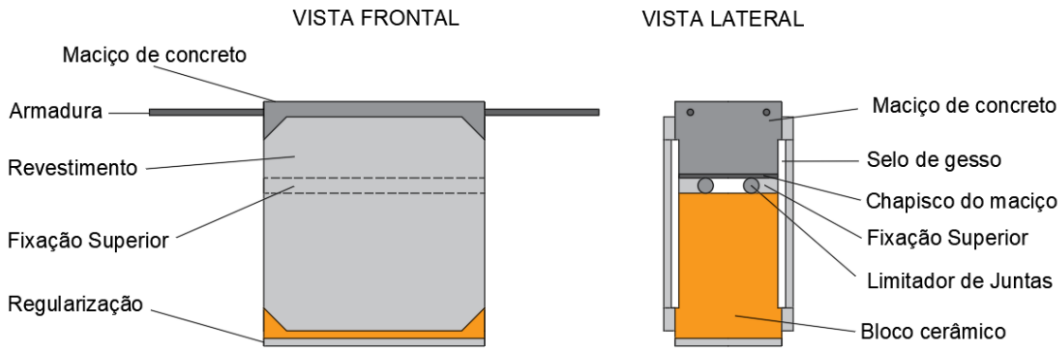


Figura 3 – Ilustração dos prismas utilizados no ensaio de deformação vertical
(Fonte: elaborado pelo autor)

2.2.2 Ensaio de deslocamento vertical

Depois de finalizados, os prismas são submetidos ao ensaio de deslocamento vertical, contados 28 dias após a execução do revestimento de argamassa. O prisma é posicionado na prensa hidráulica, conforme Figura 4, e então são aplicados acréscimos de 0,2 em 0,2 mm de deslocamento vertical na face superior do prisma no sentido de compressão. Cada passo de deslocamento é mantido durante um período de 120 s, durante o qual é realizada a avaliação do prisma, buscando-se por manifestações patológicas, por meio de inspeção visual e percussão do revestimento. O ensaio segue até o deslocamento total de 1,6 mm ou até que haja a ruptura do prisma, o que ocorrer antes.

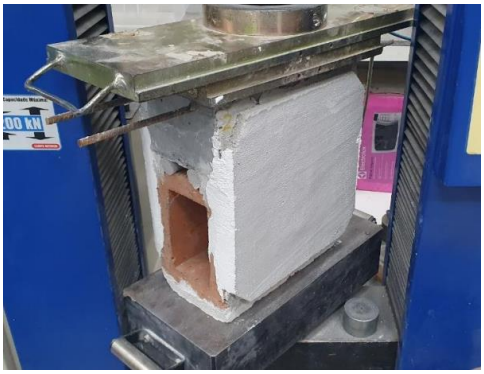


Figura 4 – Prisma posicionado na prensa hidráulica (Fonte: o autor)

Durante o ensaio, são registradas as cargas e as manifestações patológicas que surgem em cada nível de deslocamento. Caso ocorra o descolamento do revestimento, identificado pelo ensaio de percussão, é realizada a marcação da área de abrangência do dano para cada patamar de deslocamento, definindo assim uma porcentagem de área danificada para para cada face do prisma. Caso ocorra o aparecimento de fissuras e/ou a ruptura do bloco cerâmico, considera-se que o dano foi de 100%. Desse modo, é possível associar a cada nível de deslocamento vertical uma porcetagem de área danificada e uma carga, permitindo a comparação do comportamento da região de fixação superior quando subetida à deformação vertical, para cada combinação de argamassas de encunhamento e de revestimento.

Neste trabalho, foram submetidas ao ensaio de deformação vertical configurações de prismas compostas pela argamassa de fixação de baixo módulo de elasticidade (FB) em combinação com as 3 argamassas de revestimento de diferentes módulos (RA, RI e RB). A opção pela avaliação destas configurações se deu pela frequente recomendação, na literatura, pelo emprego de argamassas mais defomáveis na execução encunhamento, e para que fosse possível avaliar sua compatibildiade com revestimentos distintos. Para cada configuração estudada (FB-RB, FB-RI e FB-RA), foram ensaiados 6 prismas, de modo a reduzir a variabilidade dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

No Quadro 3 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência potencial média de aderência à tração para as configurações de chapisco x argamassa estabelecidas. Todas as argamassas de revestimento apresentam resultados satisfatórios, acima de 0,30 MPa, indicado como o mínimo para aderência com concreto. Já para as argamassas de fixação superior os valores são mais baixos, mas a

classificação desse tipo de argamassa não prevê resistência de aderência, apesar destas terem a função de fixação da alvenaria à estrutura.

Quadro 3 – Resistência de aderência à tração das argamassas estudadas

Argamassa	Configuração de Chapisco x Argamassa	Resistência potencial de aderência à tração (Mpa)
FA	CR x FA	0,32
FI	CD x FI	0,22
FB	CR x FB	0,27
RA	CR x RA	0,38
RI	CR x RI	0,3
RB	CD x RB	0,32

O Quadro 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização no estado fresco das argamassas estudadas: índice de consistência, densidade no estado fresco e retenção de água.

Quadro 4 – Caracterização no estado fresco das argamassas estudadas

Argamassa	Índice de Consistência (mm)	Densidade no estado fresco (kg/m^3)	Retenção de água (%)
FA	260	2043	75
FI	294	2126	84
FB	260	2074	84
RA	266	2046	86
RI	208	1896	89
RB	233	1821	82

Por sua vez, o Quadro 5 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização no estado endurecido das argamassas estudadas: densidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático. Por meio destes resultados é possível observar a distinção entre a capacidade de deformação de cada argamassa utilizada, com o módulo de elasticidade estático de FA sendo, aproximadamente, 4 vezes o de FB, por exemplo.

Quadro 5 – Caracterização no estado endurecido das argamassas estudadas

Argamassa	Densidade (kg/m^3)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Módulo dinâmico (GPa)	Módulo estático (GPa)
FA	1954	3,54	7,14	19,33	12,67
FI	1884	0,38	2,27	6,80	4,97
FB	1782	0,54	1,48	4,36	2,93
RA	1834	2,25	6,19	12,25	7,00
RI	1717	0,79	3,55	6,95	5,65
RB	1494	0,44	2,33	4,57	3,78

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESLOCAMENTO VERTICAL

A partir dos resultados dos ensaios de deslocamento vertical, foram desenvolvidos os gráficos apresentados nas Figuras 5 e 6. A Figura 5 apresenta os resultados de deslocamento x área danificada, onde é possível observar que os danos surgem em menores níveis de deslocamento vertical imposto, 0,6 mm, para a configuração FB-RB, ou seja, a que apresenta revestimento de baixo módulo de elasticidade. Por outro lado, na configuração FB-RA, com revestimento de alto módulo, os primeiros

danos surgem apenas ao final do ensaio, no patamar de 1,4 mm de deslocamento. A configuração FB-RI, por sua vez, fica no meio do caminho, com danos surgindo após o 1 mm de deslocamento.

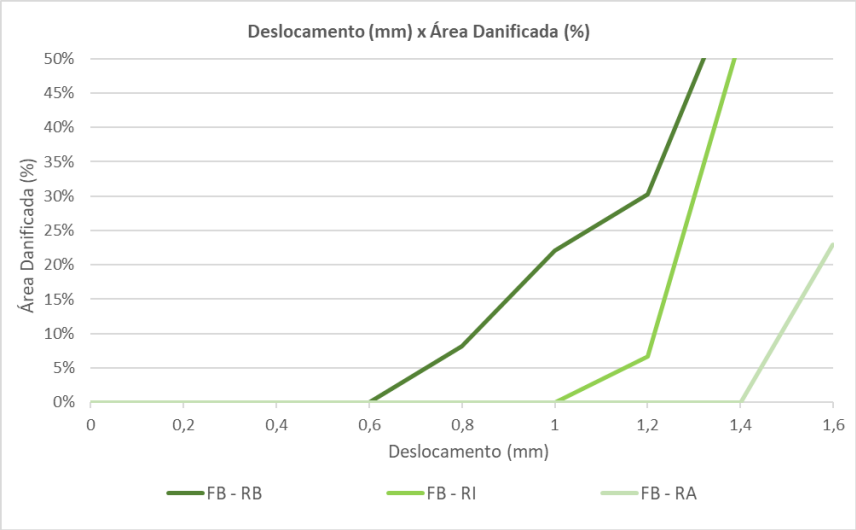


Figura 5 – Deslocamento x área danificada (Fonte: o autor)

Estes resultados, em um primeiro momento, apontam que a combinação de argamassas de fixação superior de baixo módulo com revestimentos mais deformáveis está mais suscetível ao surgimento de manifestações patológicas devido à deformação vertical. Todavia, é necessário avaliar também a carga imposta ao conjunto em cada patamar de desocamento. Isto pode ser observado na Figura 6, onde é possível verificar que a configuração FB-RA está subemetida a maiores níveis de carregamento para um mesmo nível de deslocamento vertical.

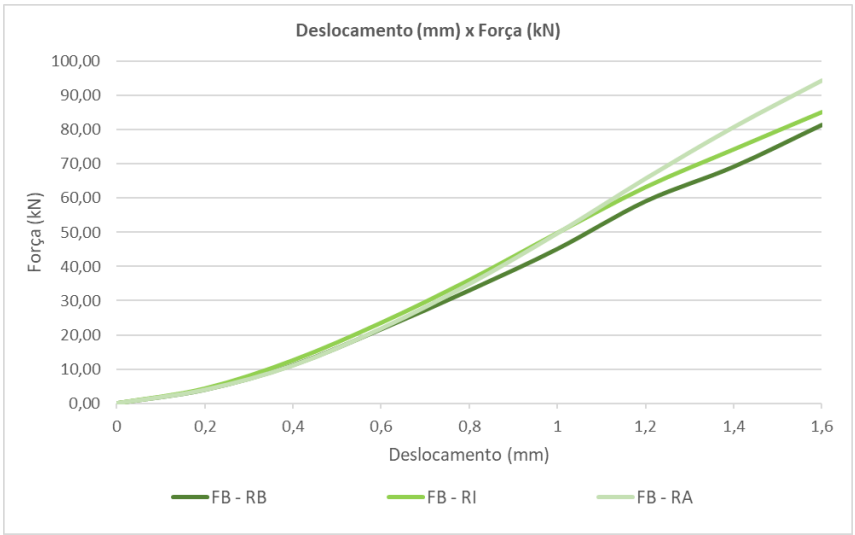


Figura 6 – Deslocamento x força (Fonte: o autor)

4 CONCLUSÕES

Não há consenso na literatura a respeito dos materiais e técnicas mais adequados para minimizar o surgimento de manifestações patológicas na região de fixação superior da alvenaria. No mercado são encontradas diferentes argamassas de encunhamento e revestimento, cujas propriedades devem ser cuidadosamente analisadas, a fim de que se obtenha um sistema compatível.

No ensaio de deformação empregado, a utilização de materiais menos deformáveis no revestimento promove a redução do surgimento de manifestações patológicas, entretanto, há elevação nos níveis de carregamento impostos à alvenaria. Neste contexto, deve-se atentar que a fixação superior é realizada em alvenarias de vedação, que não possuem função estrutural e não deveriam receber altos níveis de carga. Cargas elevadas sobre parede podem acarretar em problemas mais críticos do que fissuras e descolamento de revestimento, como a ruptura dos blocos cerâmicos constituintes do painel de alvenaria, por exemplo.

Assim, não é possível identificar uma única solução, pois há materiais mais adequados para cada situação. A escolha das argamassas de fixação superior e de revestimento deve minimizar a ocorrência de descolamentos e fissuras, mas não pode comprometer o restante do sistema de vedação, sendo necessário avaliar também a resistência do painel de alvenaria e o impacto gerado pelo carregamento deste.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 (2017). Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13276 (2016). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13277 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13278 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13279 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13280 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro.

_____. NBR 13528-3 (2019). Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração/ Parte 3: Aderência superficial. Rio de Janeiro.

_____. NBR 15630 (2009). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DAS INDÚSTRIAS DE CERÂMICA E DE CRISTALARIA – APICER (2009). Manual de Alvenaria de Tijolo - 2ª Edição. APICER, Coimbra.

Fortes, G. L. (2019). Encurtamento de pilares de concreto armado e a influência do processoconstrutivo. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação emEngenharia de Estruturas e Geotecnia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, SãoPaulo.

Montes, R. O. P.; Santos, A. R. P. Dos; Cavalcante, K. M. (2020). Análise numérica da interação alvenaria-estrutura. Revista Eletrônica de Educação da UniAraguaia Centro Universitário. v. 15. Goiânia.

Muci, D. W. S; Netto, J. R. B; Silva, R. de A. (2014). Sistemas de recuperação de fissuras da interface alvenaria de vedação estrutura de concreto: comparativo entre os processos executivos e análise de custo. 98 f. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Torga, M. (2020). O que é o encunhamento e qual a sua importância para a edificação? Engenharia 360. Disponível em: <https://engenharia360.com/o-que-e-o-encunhamento-e-qual-a-sua-importancia-para-edificacao-360-explica/> .

Zini A. (2021). Avaliação mecânica de argamassas de fixação superior em sistemas de vedação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS HISTÓRICAS COM RECURSO A SENSORES DE FIBRA ÓTICA – CASO DE ESTUDO DO MOSTEIRO DA BATALHA

Inês Bourgeois[a]; Luís Pereira[b], Paulo Antunes[b], Victor Ferreira[a]; Hugo Rodrigues[a]

[a]RISCO, Departamento de Engenharia Civil Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, (inescbourgeois@ua.pt; victorf@ua.pt; hrodrigues@ua.pt)

[b]I3N, Departamento de Física Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, (lmpereira@ua.pt; pantunes@ua.pt)

RESUMO

Os Monumentos classificados são de interesse social, pelo que a sua manutenção e monitorização é importante não só para garantir a sua preservação ao longo do tempo, mas também para garantir a segurança dos visitantes. Quando se trata deste tipo de construções, deve ser dada uma atenção acrescida para não interferir com a autenticidade e integridade do edifício, pelo que a intervenção só deve ser efetuada com um conhecimento aprofundado da geometria, do sistema construtivo, das propriedades dos materiais e do estado de conservação da estrutura a estudar. A monitorização é definida como um processo não invasivo no qual parâmetros relevantes, dependendo das condições e dos objetivos da monitorização, são registados continuamente ou em intervalos para avaliar as respostas estruturais e identificar a presença de danos na estrutura. O objetivo do presente artigo é apresentar a análise dos dados de um sistema de monitorização de sensores de fibra ótica que foi desenvolvido e instalado num claustro do Mosteiro da Batalha, que permitiu obter informação precisa sobre os deslocamentos e a temperatura em pontos críticos dos elementos utilizando apenas uma fibra transparente, garantindo um impacto visual mínimo e uma adaptação perfeita à geometria da estrutura.

Palavras-chave: Monitorização, Fibra ótica, Estruturas, Património edificado

1 INTRODUÇÃO

A monitorização é definida como um processo de levantamento não invasivo no qual os parâmetros relevantes são registados continuamente ou em intervalos para avaliar as respostas estruturais e identificar a presença de danos na estrutura. Um sistema ideal de monitorização estrutural (SHM) é constituído por subconjuntos que permitem fornecer informações a pedido sobre qualquer dano significativo que ocorra na estrutura (Mufti and ISIS Canada 2001): (i) aquisição de dados, que envolve a instalação de sensores e a recolha de dados; (ii) comunicação de dados, que envolve o processo de transferência de dados do sistema de aquisição para o local onde os dados são processados; (iii) processamento inteligente de dados, que inclui técnicas de processamento eficientes que tornam a interpretação mais fácil, mais rápida e mais exata - num caso em que uma estrutura é monitorizada utilizando uma combinação de sensores em que a única ligação comum entre os sistemas é um computador central que processa e armazena os dados, é importante que este computador seja capaz de processar os dados de todas as entradas e relacioná-los com uma referência comum, como um registo de tempo ou efeitos térmicos; (iv) armazenamento de dados processados; (v) diagnóstico, que é o processo de traduzir novos dados em respostas estruturais; e (vi) recuperação de dados.

A SHM pode ser utilizada para obter informações sobre formas alternativas de resposta estrutural, como a aceleração, a deformação e o deslocamento, dependendo das condições e objetivos da monitorização. As tendências atuais na aplicação de SHM a edifícios históricos incluem a monitorização a longo prazo para detetar comportamentos estruturais anómalos, a utilização de ferramentas de processamento de sinais no domínio do tempo e da frequência, a aplicação de redes de sensores sem fios, a calibração de modelos numéricos complexos a partir de dados de vibração ambiente, entre outros (Clementi et al. 2021). Com esta informação, é possível aumentar o conhecimento estrutural da estrutura, o que permite (i) avaliar as necessidades de reparação/reforço, assim como evitar intervenções desnecessárias, (ii) verificar a eficácia das intervenções através da monitorização da estrutura antes, durante e após uma intervenção, e (iii) controlar as estruturas danificadas após um evento extremo e monitorizar a evolução dos danos (A. De Stefano, Matta, and Clemente 2016).

O objetivo do presente trabalho é apresentar e analisar os dados de monitorização de um sistema de sensores de fibra ótica desenvolvido e instalado num claustro do Mosteiro da Batalha, de forma a perceber se existem movimentos ativos nos pontos críticos referenciados. A monitorização de edifícios patrimoniais é uma tarefa difícil, como é o caso do Mosteiro da Batalha com a estrutura principal em pedra, que é um material heterogéneo, com geometrias e irregularidades complexas. Este facto torna a SHM crucial para a previsão do comportamento estrutural e do estado de conservação de edifícios com importância histórica (Cigada et al. 2017; A. D. E. Stefano and Clemente 2009). Ao aplicar um sistema num edifício histórico, é importante não comprometer a integridade e autenticidade do edifício. A utilização de sensores que não causem danos irreversíveis quando instalados, assim como reduzido impacto visual, são, por isso, requisitos na seleção do tipo de sensor a utilizar.

2 MOSTEIRO DA BATALHA

2.1 DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDO

Foi em agosto de 1385 que D. João prometeu à Virgem Maria que, se ganhasse a batalha de Aljubarrota contra os espanhóis, mandaria construir um grande monumento em sua honra. Com a vitória

portuguesa, que garantiu a independência de Portugal, iniciou-se a construção do Mosteiro da Batalha. Embora não existam documentos que refiram a data exata do início da construção do mosteiro, sabe-se que foi um ou dois anos após a vitória da batalha.

A construção do Mosteiro da Batalha prolongou-se por muitos anos e passou por várias fases de construção. É no reinado de D. Afonso V que se inicia a construção do segundo claustro, na segunda metade do século XV, recebendo o seu nome. O Claustro de D. Afonso V é um dos primeiros claustros em Portugal a ter dois pisos (ver Figura 1). É constituído por quatro galerias, cada uma com sete vãos e mais quatro comuns aos ângulos, e é abobadado sobre um cruzeiro forte e simples que tem duas ogivas. No exterior, apresenta arcos quebrados e emparelhados que permitem a transferência dos elementos transversais. No piso superior, existe um telhado de uma só inclinação constituído por telha e madeira.

Figura 1 – Claustro de D. Afonso V

2.2 ESTUDO DAS ANOMALIAS

O estudo das anomalias foi realizado através de inspeção visual com documentação fotográfica, complementada pela análise de imagens captadas pela tecnologia laser scanner (LS). A inspeção visual do Claustro de D. Afonso V foi realizada após uma intervenção de conservação e restauro. Como resultado, a inspeção evidenciou sobretudo os danos estruturais, que se resumem nos parágrafos seguintes.

De um modo geral, com a inspeção foi possível identificar pontos críticos que revelam movimentos na estrutura. Verificou-se que o claustro apresenta problemas comuns resultando em movimento das juntas e fissuras nos blocos de alvenaria (Figura 2 a.). Em alguns casos, estes movimentos levaram ao desprendimento do material da junta. Outro problema observado foi a presença de fissuras entre diferentes elementos, particularmente na zona onde os arcos se encontram com os pilares (Figura 2 b.). Ao longo de toda a estrutura do claustro, foram encontradas várias fissuras em diversos elementos. No entanto, a mais crítica foi identificada na parede leste do claustro (Figura 2 c.). Esta fissura tem origem no primeiro piso e desce para o rés do chão, ficando gradualmente mais estreita.

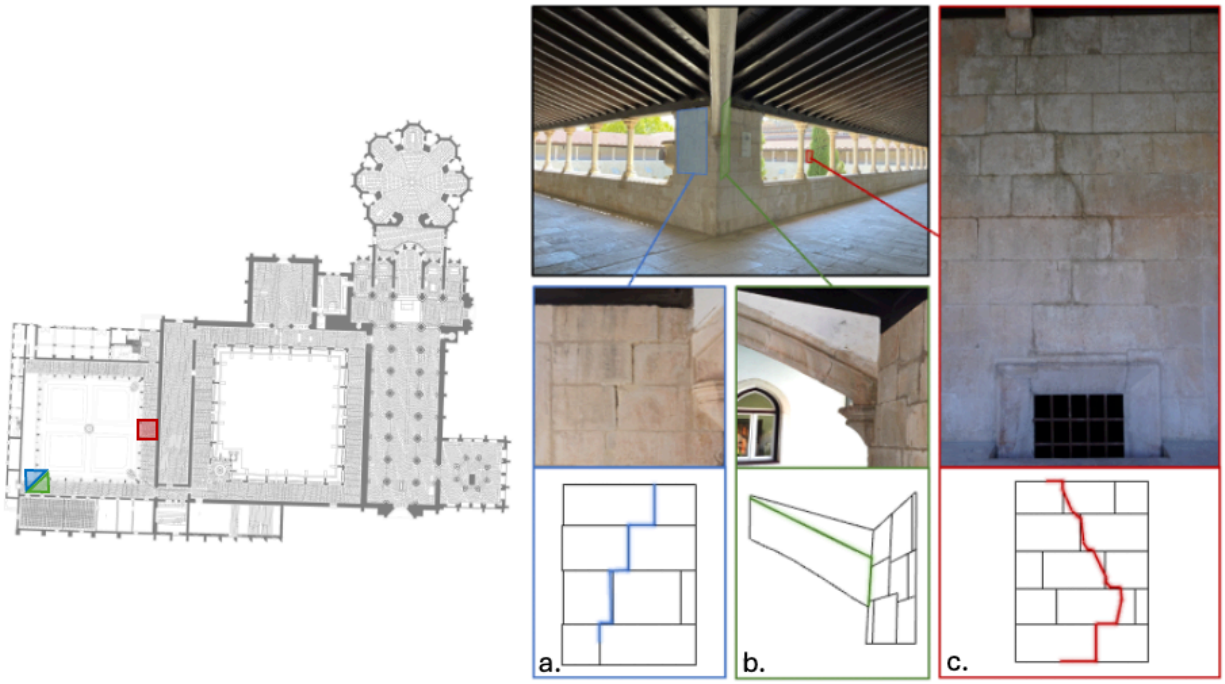


Figura 2 – Pontos críticos onde a estrutura sofreu: a. movimentos nas juntas; b. fissuras nas ligações entre elementos; e c. fissuras nos elementos

3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

3.1 SENSORES DE FIBRA ÓTICA

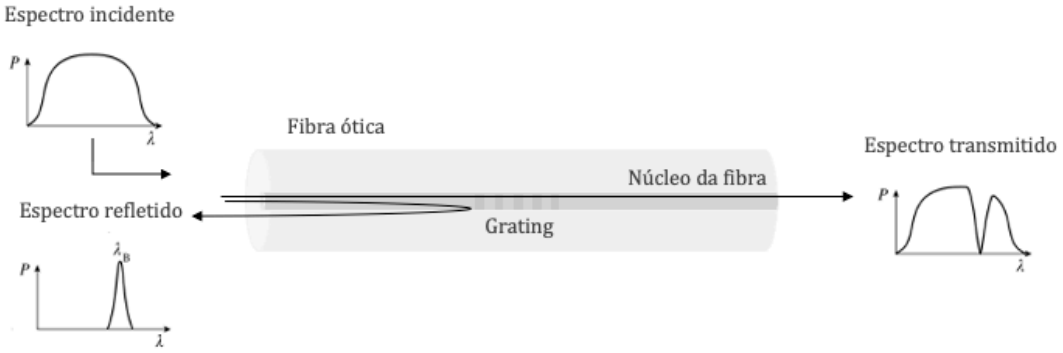
A utilização de sensores de fibra ótica tem-se revelado uma tecnologia que permite a monitorização de estruturas com elevada precisão e mínima intrusão física e visual. A utilização da fibra de sílica descarnada, que é transparente, facilita a sua utilização neste contexto (Rodrigues et al. 2012). Para além de serem imunes a interferências electromagnéticas, são flexíveis, muito leves, de pequeno diâmetro e sem sinais eléctricos no ponto de medição, reduzindo a probabilidade de riscos elétricos (Costa and Figueiras 2012; Tang et al. 2021).

Entre as diferentes soluções de fibra ótica disponíveis, a que tem maior potencial para esta aplicação, devido às suas capacidades de multiplexagem, são os sensores de redes de Bragg em fibra (FBG). O sinal de um sensor baseado em FBG é construído a partir da análise do desvio espectral do sinal ótico refletido pela estrutura da rede e tem uma resposta linear quando exposta a variações de deformação e/ou temperatura, com elevada sensibilidade e resolução (Lima et al. 2008). O método mais comum de inscrição de uma FBG na fibra consiste em aplicar radiação ultravioleta (UV) numa máscara de fase para criar um padrão de interferência, que produzirá uma modulação do índice de refração ao longo do núcleo da fibra (Kashyap 2009). A partir do sinal ótico injetado na fibra, é reflectida uma banda espetral específica centrada no comprimento de onda de Bragg (λ_B) (ver Figura 3 a.). O λ_B é determinado pelo índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) e pelo período da rede (Λ), obedecendo à condição de Bragg, conforme a Equação 1.

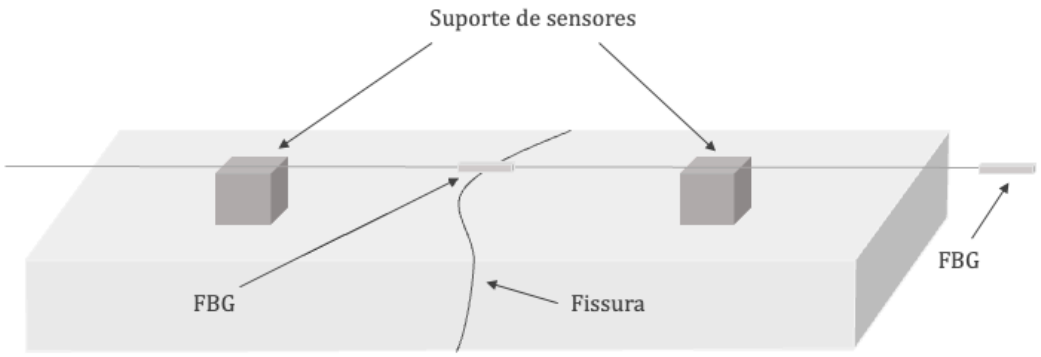
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \qquad \text{Equação 1}$$

Dependendo da configuração do sistema, os sensores FBG podem ser utilizados para fornecer informação sobre diferentes parâmetros num único cabo ótico, tais como deformação, temperatura,

humidade e/ou aceleração. Neste caso, o objetivo era monitorizar os movimentos das juntas e fissuras do claustro D. Afonso V, previamente identificados como pontos críticos. Para o efeito, foi criado um sistema de extensómetros (sensores de deformação) e sensores de temperatura, de acordo com o exemplo da Figura 3 b. Nesta configuração, dois pontos da fibra foram fixados em suportes, o que condicionou o sensor FBG aos movimentos da estrutura nesses pontos fixos. Para obter informação de temperatura, foi inscrito um sensor FBG na extremidade da fibra.



a.



b.

Figura 3 – Sensores FBG: a. Princípio de funcionamento de uma FBG; b. Configuração do extensómetro

Em termos de aplicação do método, isto significa que, à medida que o comprimento da fibra ou a temperatura muda, há uma mudança espetral proporcional no comprimento de onda de Bragg refletido ($\Delta\lambda_B$) (Han, Wu, and Lu 2021). A Equação 2Equação 2 mostra a relação entre o $\Delta\lambda_B$, o efeito da deformação ($\Delta\varepsilon$) e o efeito da temperatura (ΔT) sobre o λ_B, onde α, ρ e ξ são, respetivamente, os coeficientes de expansão térmica, fotoelástico e termo-ótico da fibra.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-\rho)\Delta\varepsilon + \lambda_B(\alpha+\xi)\Delta T \qquad \text{Equação 2}$$

Como os sensores são idênticos, inscritos na mesma fibra com a mesma configuração de inscrição e funcionando na mesma região espetral, as suas sensibilidades térmicas são semelhantes. Por conseguinte, os dados fornecidos pelo sensor de temperatura permitem não só obter leituras de

temperatura, mas também resolver os efeitos de sensibilidade cruzada nos sensores de deformação (Verstrynge et al. 2018). Os sensores de deformação implicam que a fibra esteja fixa em dois pontos, pelo que, se houver movimento no elemento, a fibra esticará ou encolherá e ocorrerá uma mudança no comprimento de onda de Bragg.

Antes de implementar os sensores, é necessário caraterizar os sensores para variações de temperatura, o que é feito medindo a resposta dos sensores (o λ_B) quando expostos a temperaturas controladas. A expressão de calibração da temperatura corresponde a um ajuste linear do λ_B para valores de temperatura conhecidos em dados laboratoriais, e os parâmetros a e b são os coeficientes de ajuste linear aos dados de caraterização experimental (ver Equação 3).

$$\text{Temperatura } (°C) = a * \lambda_B - b \qquad \text{Equação 3}$$

Sabendo que os sensores FBG são simultaneamente sensíveis à deformação e à temperatura, é necessário compensar a influência térmica das variações de temperatura ambiente para obter os valores reais de deslocamento. Aplicando a Equação 4, é possível calcular os valores de deslocamento, subtraindo a componente de deslocamento do comprimento de onda da variação de temperatura ($\Delta\lambda_{B_T}$), medida pelos sensores de temperatura FBG, do $\Delta\lambda_B$, dividindo depois pela sensibilidade à deformação e multiplicando o resultado pela distância entre os pontos de fixação (L).

$$\text{Deslocamento } (\mu m) = \frac{(\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_{B_T})}{\text{Sensibilidade à deformação}} * L \qquad \text{Equação 4}$$

A sensibilidade à deformação, geralmente apresentada em pm/με (picómetros por microstrain), é obtida impondo uma deformação relativa na fibra (com a FBG) e registando a sua resposta. Normalmente, a fibra é fixada entre um suporte fixo e um suporte móvel controlado por um parafuso micrométrico. Para cada passo de deformação controlado, com o parafuso micrométrico, regista-se o comprimento de onda de Bragg. A expressão de calibração corresponde ao ajuste linear dos dados do comprimento de onda de Bragg em função da deformação relativa da fibra ótica, sendo a sensibilidade à deformação o declive do ajuste linear.

3.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A fase inicial do sistema de monitorização foi implementada no claustro do Rei Afonso V, e conta com dois sistemas de FBG's: FBG_1 e FBG_2. A fibra utilizada para inscrever as FBGs é feita de vidro à base de sílica (GF1AA da Thorlabs), que é transparente, pelo que não causa impacto visual no monumento, e pode esticar-se até cerca de 1% da sua distância fixa. Os sensores FBG foram colocados em 2 áreas: O sistema FBG_1 está a monitorizar uma fissura na parede nordeste do claustro de D. Afonso V, no primeiro piso; o sistema FBG_2 está a monitorizar juntas no pilar sudoeste do claustro de D. Afonso V, no primeiro piso (ilustrado na Figura 4).

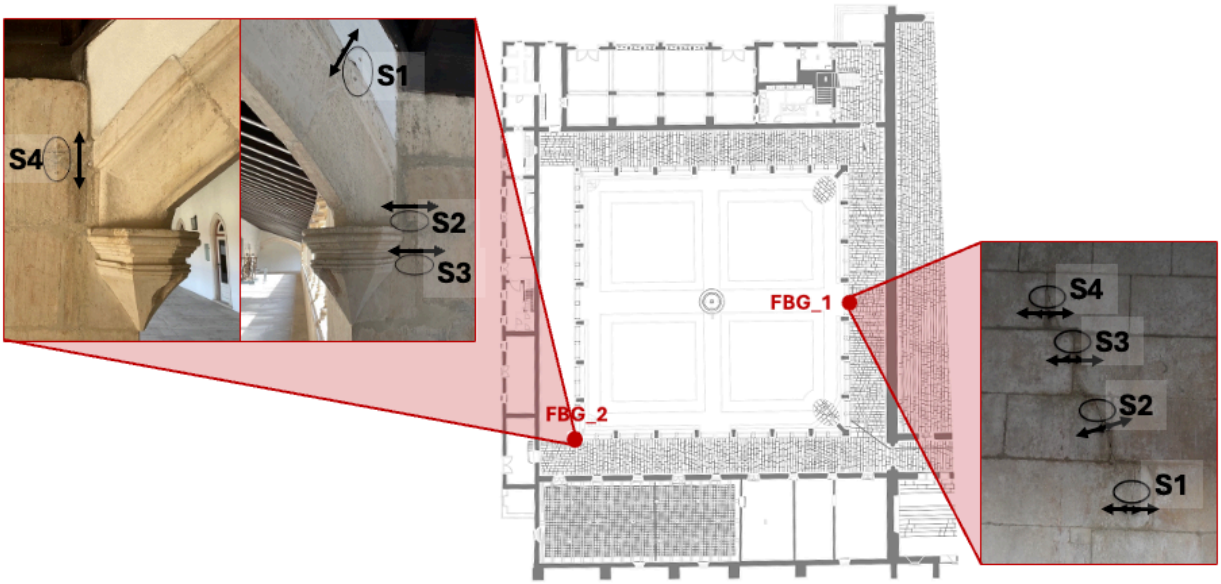


Figura 4 – Esquema do sistema SHM

O equipamento utilizado para recolher os dados e analisar as redes de sensores óticos é um interrogador de deteção ótica (Luna HYPERION s155) e um computador. O software utilizado para registar os espectros é o ENLIGHT Micron Optics Sensing Analysis Software, que fornece as funções básicas de configuração do interrogador e de aquisição, armazenamento e visualização dos dados relativos ao comprimento de onda. A informação dos sensores é recolhida regularmente e estes dados são reunidos numa folha de cálculo Excel para analisar a deslocação ao longo do tempo. Sempre que é possível deixar o interrogador no local, o sistema é monitorizado continuamente com uma frequência de 30 segundos para melhor compreender a evolução dos movimentos, e eventualmente a sua relação com ciclos de expansão diários por flutuações térmicas. Como este procedimento implica a recolha de uma grande quantidade de dados, estes são processados com recurso ao MATLAB.

4 RESULTADOS

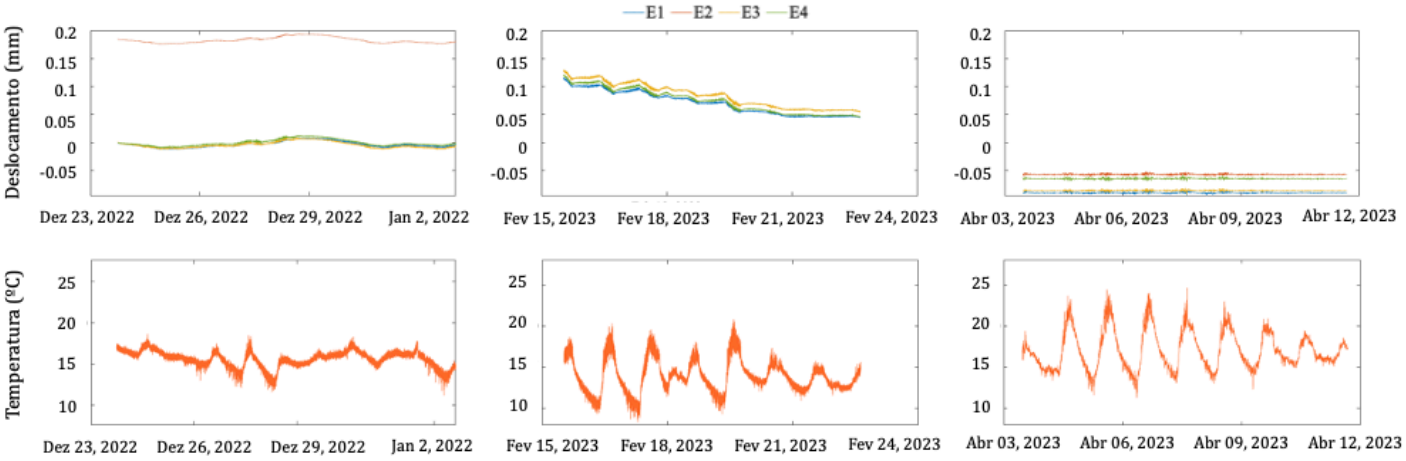
Para obter uma compreensão abrangente do comportamento da fissura (sistema FBG_1), o equipamento de monitorização foi configurado para registar dados com um intervalo de tempo de 30 segundos durante três semanas, uma semana em dezembro de 2022, outra em fevereiro de 2023 e uma ultima em abril de 2023. Os resultados desta monitorização são apresentados na Figura 5 a., mostrando que a fissura sofreu ligeiros deslocamentos. O comportamento da fissura pareceu consistente em todos os pontos monitorizados, com variações observadas apenas nos seus valores. De salientar que os sensores E1, E3 e E4 registaram valores significativamente menores em relação ao sensor E2, que atingiu um deslocamento máximo de 0,2 mm. Esta diferença deve-se ao facto de os sensores E1, E3 e E4 terem sido substituídos recentemente.

Analisando os dados da semana de fevereiro de 2023, tornou-se evidente que a fissura estava a sofrer movimentos convergentes, ou seja, estava a fechar. Em contraste com a campanha de monitorização contínua anterior, os sensores E1, E3 e E4 registaram movimentos maiores, mostrando que a fissura se expandiu ainda mais entre dezembro e fevereiro de 2023. Verificou-se também que o sensor E2 estava danificado, pelo que não havia informação sobre este ponto de monitorização durante este período. Na semana de abril de 2023, era evidente que a fissura tinha fechado, e os seus movimentos tinham estabilizado.

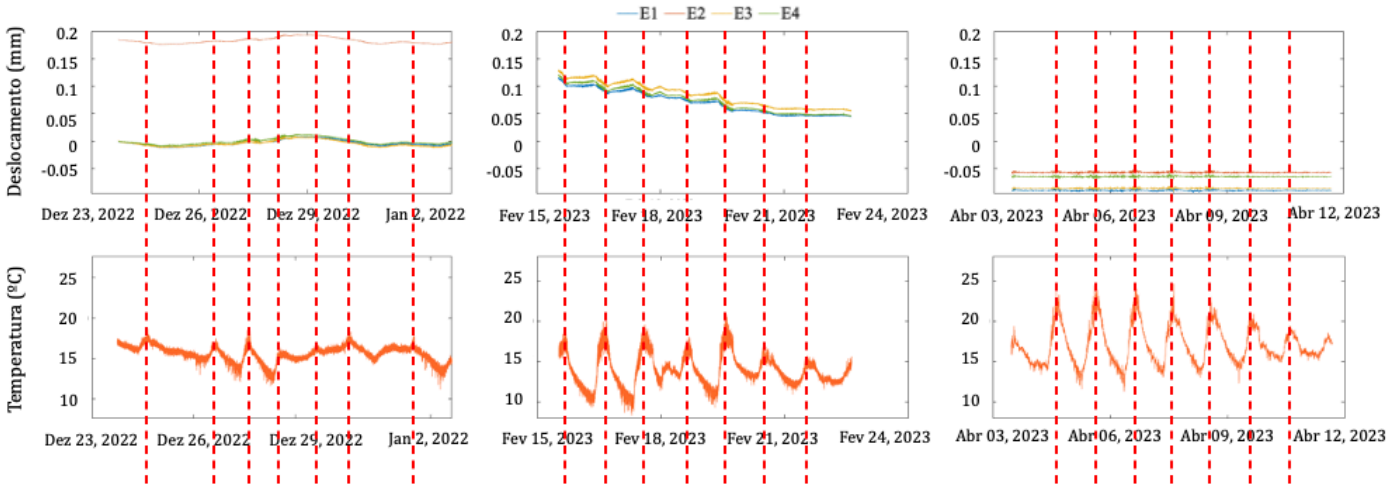
Analisando a correlação entre os deslocamentos e a temperatura (ver Figura 5 b.), observa-se que na semana de dezembro não houve correlação. Na semana de fevereiro, foi possível detetar uma pequena correlação entre a variação da temperatura e os deslocamentos observados. Embora esta correlação possa ser observada, o comportamento geral da fissura sugere que os movimentos são causados por algum movimento estrutural. É ainda possível observar que a fenda diverge nos meses frios e converge nos meses quentes (ver Figura 5 c.).

Os resultados desta campanha de monitorização, em relação ao sistema FBG_2, são apresentados na Figura 6a. e permitiram observar uma correlação entre as oscilações de temperatura e o deslocamento da junta, sugerindo que os movimentos têm uma causa não estrutural (ver Figura 6 b.). Analisando os dados do sensor E4, observa-se que este se comporta de forma diferente dos outros sensores: quando a temperatura aumenta, regista movimentos divergentes.

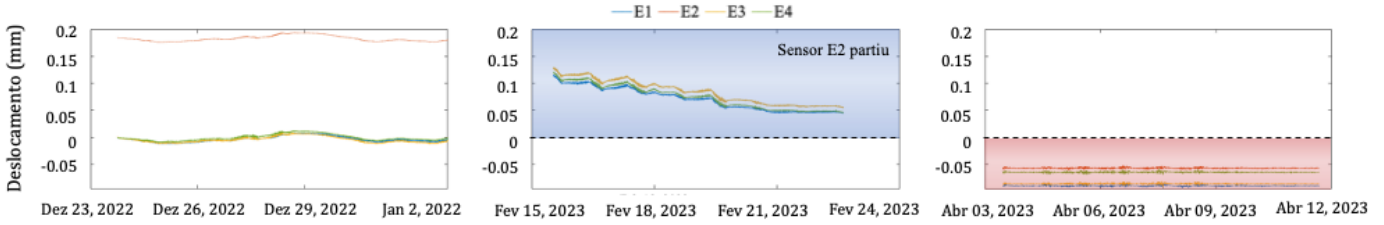
Analisando o tipo de movimento de cada ponto monitorizado (ver Figura 6 c.), pode concluir-se que os sensores E1 e E2 apresentam um comportamento e valores de deslocamento semelhantes. Os seus valores indicam que as juntas estão constantemente sujeitas a movimentos de compressão. Os valores de deslocamento do sensor E3 sugerem que os movimentos que actuam sobre a junta oscilam entre convergência e divergência, mas na maior parte do tempo experimentam movimentos de divergência. O sensor E4 regista sempre movimentos de divergência.



a.

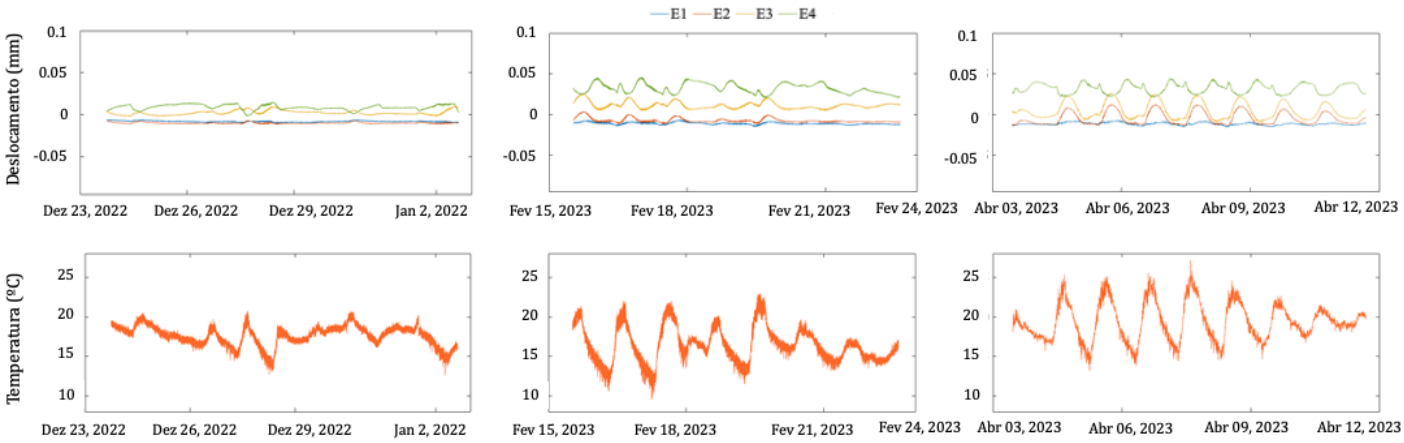


b.

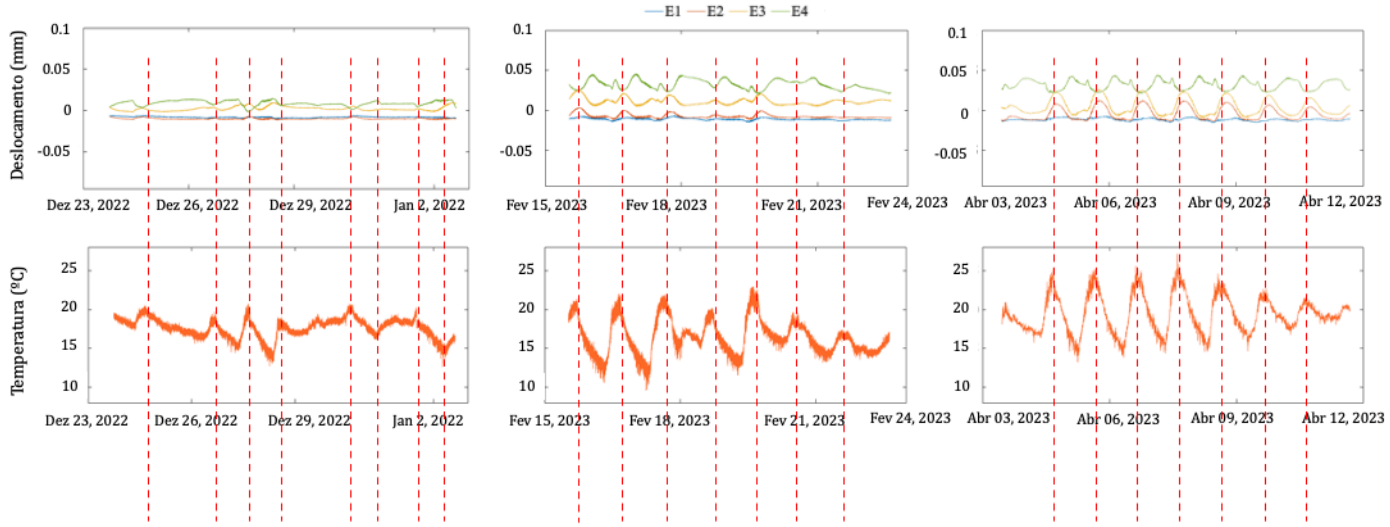


c.

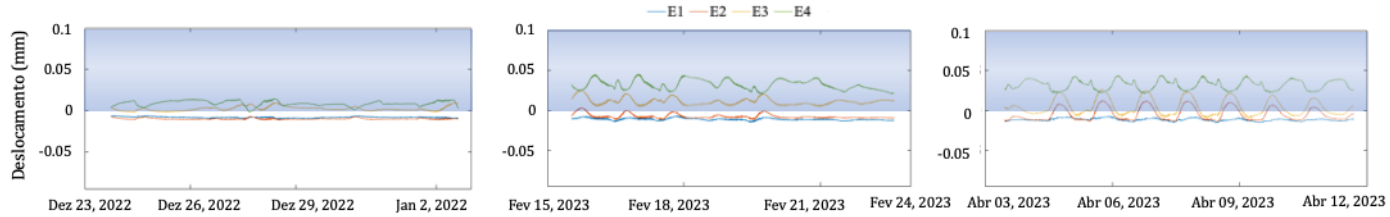
Figura 5 – a. Dados de monitorização contínua do FBG_1. b. Correlação entre os deslocamentos e a temperatura. c. Análise do comportamento da fissura nos diferentes meses



a.



b.



c.

Figura 6 – a. Dados de monitorização contínua do FBG_2. b. Correlação entre os deslocamentos e a temperatura. c. Análise do comportamento das juntas nos diferentes meses

5 COMENTÁRIOS FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O sistema de monitorização inicial instalado no Claustro D. Afonso V revelou-se muito eficaz, fornecendo informação precisa sobre os movimentos sofridos pelos diferentes elementos. A utilização de sensores de fibra ótica permitiu a monitorização dos deslocamentos e da temperatura em pontos críticos utilizando apenas uma fibra transparente, garantindo um impacto visual mínimo e uma adaptação perfeita à geometria da estrutura.

Através da análise dos dados recolhidos, foram extraídas várias conclusões importantes:

- A fissura monitorizada pelo sistema FBG_1 apresenta movimentos consideráveis, que parecem estar associados a deslocamentos estruturais. O próximo passo poderá passar pela realização de ensaios de georadar para compreender a constituição da parede, incluindo o número de painéis de alvenaria e possíveis ligações, bem como a composição do solo. Esta investigação tem como objetivo determinar se os movimentos do solo estão a contribuir para os deslocamentos estruturais. Analisando o comportamento detetado pelo FBG_1, é possível verificar que os movimentos sofridos pela estrutura são mais acentuados nos meses frios.

- As juntas monitorizadas pelo sistema FBG_2 apresentam pequenos movimentos que se correlacionam com as variações de temperatura e que, de momento, não provocam danos nos elementos.

A recolha e análise contínua de dados do sistema de monitorização desempenhará um papel crucial na compreensão do comportamento da estrutura e na identificação de eventuais anomalias que possam surgir. Este processo contínuo ajudará a garantir a preservação e a estabilidade a longo prazo do monumento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através dos projetos: Aveiro Research Center for Risks and Sustainability in Construction (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020] e i3N - Instituto de Nanoestruturas, Nanomodelação e Nanofabricação [UIDB/50025/2020-2023, UIDP/50025/2020-2023, LA/0037/2020]. A autora Inês Bourgeois agradece à FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela Bolsa de Doutoramento com a referência PRT/BD/152876/2021.

REFERÊNCIAS

Cigada, A., L. Corradi Dell'Acqua, B. Mörlin Visconti Castiglione, M. Scaccabarozzi, M. Vanali, and E. Zappa. 2017. Structural Health Monitoring of an Historical Building: The Main Spire of the Duomo Di Milano. *International Journal of Architectural Heritage* 11 (4). Taylor and Francis Inc.:501–518. doi:10.1080/15583058.2016.1263691.

Clementi, Francesco, Antonio Formisano, Gabriele Milani, and Filippo Ubertini. 2021. Structural Health Monitoring of Architectural Heritage: From the Past to the Future Advances. *International Journal of Architectural Heritage*. Bellwether Publishing, Ltd. doi:10.1080/15583058.2021.1879499.

Costa, Bruno J.Afonso, and Joaquim A. Figueiras. 2012. Fiber Optic Based Monitoring System Applied to a Centenary Metallic Arch Bridge: Design and Installation. *Engineering Structures* 44 (November):271–280. doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.005.

De Stefano, Alessandro, Emiliano Matta, and Paolo Clemente. 2016. Structural Health Monitoring of Historical Heritage in Italy: Some Relevant Experiences. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6 (1). Springer Verlag:83–106. doi:10.1007/s13349-016-0154-y.

Han, Tianran, Gang Wu, and Yong Lu. 2021. Crack Monitoring Using Short-Gauged Brillouin Fiber Optic Sensor. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 179 (July). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.measurement.2021.109461.

Kashyap, Raman. 2009. *Fiber Bragg Gratings*. Edited by Academics Express. 2nd ed. San Diego, CA, USA.

Lima, Hugo F., Romeu Da Silva Vicente, Rogério N. Nogueira, Ilda Abe, Paulo Sérgio De Brito André, Catarina Fernandes, Hugo Rodrigues, Humberto Varum, Hypolito José Kalinowski, Aníbal Costa, et al. 2008. Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa Da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors. *IEEE Sensors Journal* 8 (7):1236–1242. doi:10.1109/JSEN.2008.926177.

Mufti, Aftab A., and ISIS Canada (Organization). 2001. *Guidelines for Structural Health Monitoring*. ISIS Canada.

Rodrigues, Carlos, Filipe Cavadas, Carlos Félix, and Joaquim Figueiras. 2012. FBG Based Strain Monitoring in the Rehabilitation of a Centenary Metallic Bridge. *Engineering Structures* 44 (November):281–290. doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.040.

Stefano, A. D.E., and P. Clemente. 2009. Structural Health Monitoring of Historical Structures. In *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, 412–434. Elsevier Inc. doi:10.1533/9781845696825.2.412.

Tang, Fujian, Guoshuai Zhou, Hong Nan Li, and Els Verstrynge. 2021. A Review on Fiber Optic Sensors for Rebar Corrosion Monitoring in RC Structures. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125578.

Verstrynge, Els, Kristof De Wilder, Anastasios Drougkas, Eli Voet, Koen Van Balen, and Martine Wevers. 2018. Crack Monitoring in Historical Masonry with Distributed Strain and Acoustic Emission Sensing Techniques. *Construction and Building Materials* 162 (February). Elsevier Ltd:898–907. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.103.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PATOLOGIAS EM ESTRADAS MOÇAMBICANAS, AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

Anastácia da Graça Salvador Machaieie Chale[a]; Sultane Júlio Setimane[b]; Ruy Moreira Cravo[c]; José Rufino Diogo[d]

[a] (Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Arquitetura e Planeamento Fisico, Av. Julius Nyerere no 3453, Campus Principal +258828090410, +25821496011 Maputo, Moçambique), machaieiechale@gmail.com

[b] (Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Arquitetura e Planeamento Fisico, Av. Julius Nyerere no 3453, Campus Principal +258 878011130; +258 848011030, +25821496011, Maputo, Moçambique) ssetimane@ymail.com

[c] (Universidade Politécnica, Av. Paulo Samuel Kankhomba, no1011, +258823585250, +258823133700, Maputo, Moçambique), moreiracravoruy@gmail.com

[d] (Universidade Politécnica, Av. Paulo Samuel Kankhomba, no1011, +258823585250, +258823133700, Maputo, Moçambique), joeddiogo@gmail.com

RESUMO

A finalidade primária de um pavimento é criar uma superfície resistente, regular e aderente que facilite a circulação do tráfego de veículos de forma segura e com custos operacionais mínimos para os utentes. Para a manutenção da sua vida útil, os pavimentos exigem diagnósticos periódicos. Assim, a avaliação das condições de conservação de um pavimento encerra uma relevância para análise das causas de surgimento de patologias bem como uma melhor concepção de projectos de recuperação das rodovias. Esta pesquisa visa avaliar a condição funcional do pavimento flexível da Estrada Nacional Número Dois (N2), Boane – Namaacha, numa extensão de 2 km, através do método PCI que foi baseado no levantamento, na quantificação e definição das causas de patologias, acompanhadas de reportagem fotográfica com auxílio da roda métrica. As classificações situaram-se em baixa, média e alta consoante a sua gravidade. Os resultados revelaram que as patologias do tipo pele de crocodilo e depressão apresentaram-se com o nível de gravidade alto e as patologias de tipo buraco, apresentaram-se em três níveis de gravidade (baixo, médio e alto). Por fim, conclui-se que existe predominância da patologia do tipo buraco no pavimento flexível da estrada N2.

Palavras - Chave: Pavimento Flexível; Patologias; PCI; Estrada Nacional N2

1 INTRODUÇÂO

O pavimento é uma estrutura composta por diversas camadas com a função de receber e resistir às solicitações do tráfego, e, ao mesmo tempo, assegurar o conforto, a segurança e a economia aos seus utentes. Com o passar do tempo, os pavimentos encetam problemas de degradação ou falhas no seu funcionamento decorrentes de diversos factores, tais como, ambientais, climáticos e o tráfego pesado. A falta de seguimento dos planos de manutenção tendo em conta a necessidade de preservar a vida das rodovias face a ocorrência, com o passar do tempo, de deterioração do pavimento asfáltico têm sido apontados como sendo as principais causas da degradação das estradas (Velásquez, 2009). De acordo com Joia (2001), a degradação das estradas resulta do peso excessivo dos camiões que nelas circulam. JICA (2021) acrescenta que a falta de manutenção apropriada do sistema de drenagem e a pobre performance da reabilitação de pavimento contribuem para a degradação das estradas. Velásquez (2009) menciona que a solução ideal para evitar degradações é preciso detectar e avaliar os pavimentos atempadamente por forma que as reparações daí resultantes correspondam às obras de conservação ou pequenas reparações, e não necessariamente de construção, visto que assim poupa-se dinheiro e recursos.

O comprimento total da rede de estradas de Moçambique é de 34332 Km, sendo 5324 Km de estradas pavimentadas, 6878 Km de estradas de cascalhos e as demais estradas são de terra. (Diogo, 2007 citando o relatório de classificação de estradas ANE, 2003). Grande parte dessas estradas apresenta-se actualmente em más condições de conservação, apesar de muitos esforços que o sector de estradas moçambicano tem envidado com vista a mitigar a problemática das patologias, que tem afectado a circulação de pessoas e bens. Constata-se ainda, a falta de informação sistematizada da condição dos pavimentos asfálticos das estradas moçambicanas. Estes problemas, justificam o propósito académico da necessidade de desenvolver o presente trabalho que visa investigar as condições do pavimento flexível da Estrada Nacional Número Dois (N2), troço Boane-Namaacha, numa extensão de 2 km, com o recurso ao método PCI.

2 DADOS E METODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

A estrada nacional número dois (N2) foi construída na década 70, antes da independência de Moçambique havida em 1975, e se desenvolve nos territórios dos Distritos de Matola, Boane e Namaacha na Província de Maputo e é um corredor internacional que estabelece a ligação entre Moçambique e o Reino de Eswatine. A estrada N2 apresenta-se pavimentada com o revestimento asfáltico superficial duplo. Trata-se de uma estrada classificada, de categoria secundária, designada por nacional número 2, e com uma extensão de 39 km. Ao longo do seu traçado, existem várias comunidades e se desenvolvem actividades na área agrícola, pecuária, e de processamento e comercialização de inertes (pedra e areia) de construção o que torna a via de extrema importância sócio-económica. Geograficamente a estrada localiza-se ao sul da província de Maputo, de acordo com a Figura 1 observa-se.

Figura 1 - Localização do troço Rotunda do Boane - Namaacha (Fonte: Mapa do Google)

2.2 PROCEDIMENTO DE RECOLHA DE DADOS

O presente trabalho consistiu da pesquisa bibliográfica cujos conteúdos são semelhantes ao tema, que permitiram compreender melhor as patologias na estrada em estudo. Para o estudo, foi efectuada a colecta de dados das condições da estrada N2, que incluíram a reportagem fotográfica e medição de patologias com auxílio da roda métrica. O levantamento foi realizado nos dois sentidos da via, Boane-Namaacha e vice-versa, numa extensão de 2 km. Para o efeito, o troço da estrada foi subdividido em 4 secções, sendo cada com uma área de 210 m2. Com base nos dados indicados e com auxílio do método PCI, foi possível avaliar o nível de gravidade das patologias. Na definição de prioridades de intervenção foram considerados 3 níveis de gravidade: baixo (L), médio (M) e alto (H). Para a patologia do tipo pele do crocodilo foram considerados os níveis de gravidade baixo (L), várias fissuras finas longitudinais, paralelas entre si, sem nenhuma ou pouca interligação; Médio (M), fissuras bem definidas como "pele de crocodilo", com interligação uma da outra, sem desagregação de material; Alto (H), padrão bem definido, com fendas interligadas e com elevado potencial de desagregação de material. Patologia do tipo depressão, considera-se do nível baixo (L) quando afecta ligeiramente a circulação de veículos (3 a13mm); Médio (M), quando a depressão é facilmente visível e afeta seriamente a circulação do tráfego (> 25 mm); Alto (H) correspondem a depressão bem visível, afecta seriamente a circulação do tráfego e é de maior risco (> 25 mm). Se o buraco tiver um diâmetro maior a 750mm, a área deve ser determinada em metros quadrados e dividida entre 0,5 m2 para avaliar o número equivalente de buracos. A profundidade menor ou igual a 13 mm considera-se o nível baixo (L); o intervalo de 13mm a 25mm corresponde a nível médio e; >25 mm alto (H) nível de degradação.

2.3 PATOLOGIAS E CAUSAS AO LONGO DO TROÇO BOANE – NAMAACHA

Durante a visita de inspecção da estrada em estudo, foi constatada a existência de distintas patologias, nomeadamente, do tipo pele de crocodilo, pelada, buracos e base não revestida conforme ilustrado na figura 2. Durante a pesquisa foi constatado como causas das degradações na N2 a má preparação da superfície de pavimento, a intensidade do tráfego, e a falta de controlo de carga dos veículos pesados que transportam inertes. A estrada N2 anualmente tem beneficiado de manutenção de rotina que consiste em actividades de manutenção localizada de tapamento de buracos, entretanto, nota-se que devido a exiguidade de recursos não tem sido possível realizar uma completa manutenção ou reabilitação que se julga ser opção indicada para este caso.

A figura 2 ilustra as patologias encontradas ao longo do troço Boane – Namaacha.

a) Pelada

b) Buracos

c) Buracos e pele de crocodilo

d) Base não revestida

Figura 2 - Defeitos na estradas

2.4 MÉTODO PCI (ÍNDICE DE CONDIÇÃO DO PAVIMENTO)

O método PCI fornece informações sobre as condições das estradas nas condições presentes do pavimento, mas não pode fornecer previsões para o futuro. As escalas de classificação de PCI conformem Rosyidi citando a norma ASTM D 6433, são, Excelente (86-100), Muito bom (71-85), Bom (56-70), Regular (41-55), Mau (26-40), Muito Mau (11-25), e Péssimo (0-10). Segundo Rosyid citando ASTMD6433; Valésquez (2009) citando ASTMD6433-3 para a obtenção do valor de PCI de uma unidade de amostra é necessário seguir os passos abaixo:

a) Valor de dedução (DV) – é o valor que é obtido através da curva da relação entre densidade e nível de gravidade da patologia. Os valores de dedução (DV) são obtidos para cada tipo de degradação e nível de gravidade, em função dos valores das densidades obtidos, por interpretação das curvas de dedução. Se nenhum ou apenas um dos valores de dedução é superior a 5, o valor máximo de dedução corrigido (Max CDV) a usar no cálculo do PCI é igual a soma de todos os DV.
b) Densidade (D) - é a percentagem de incidência de uma degradação, calculada por nível de gravidade, numa determinada unidade de amostra, ou seja, é a divisão da quantidade total da área afetada pela degradação (m ou m2) pela área total da unidade de amostra, conforme a equação 1.

$$\mathrm{D}(\%) = \frac{Quantidade\ de\ degradação\ (m\ ou\ m2)}{\text{Área total de U.A.(m2}} x\ 100 \qquad \text{Equação 1}$$

c) Número máximo de defeitos admissíveis (m) - O cálculo do número máximo de defeitos admissíveis (m) é efetuado com recurso à equação 2.

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right)(100 - HDV) \leq 10 \qquad \text{Equação 2}$$

Onde: m - Número máximo de defeitos admissíveis a considerar no cálculo do PCI da unidade de amostra; HDV – O maior valor de dedução (DV) da unidade de amostra. Para cálculo o PCI, o valor máximo de dedução corrigido (Max CDV) é subtraído ao valor máximo do PCI para obtenção do valor do PCI da unidade de amostra, como ilustrado pela equação 3.

$$PCI = 100 - CDV \qquad \text{Equação 3}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A secção 1 (0+400 a 0+800) de 210 m2 apresentou patologias do tipo buraco, com severidade, de tipo baixo, médio e alto. Os valores de dedução obtidos são de 40.1, 46.3, 31.2, 32.1 e 27.1 e o valor máximo deduzido de 91, resultando num índice correspondente à um estado do pavimento péssimo, portanto, que requer uma reabilitação. O quadro 1 apresenta o registo de amostras da secção 1 e quadro 2 apresenta o cálculo de PCI.

Quadro 1: Registo de amostras na secção 1

METODO PCI INDICE DE CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS EM VÍAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL FICHA DE REGISTO	ESQUEMA
Nombre de la vía: N2-Rotunda de Boane/Namaacha Secção: 1 Unidad de muestra: U1 Executor_____ Data: 14/11/2023 Área: 210 m2	
Pele de cocodrilo 6. Depressão 11. Remendos e cortes 16. Fissura parabólica ou por deslizamiento Exudação 7. Fissura de borda 12. Agregado pulido 17. Inchamento Fissuras em bloco 8. Fissura de reflexião da junta 13. Buracos 18. Peladura por intemperismo e desprendimiento de agregados Abaulamento e afundamentos 9. Desnivel da faixa-berma 14. Assentamento Corrugação 10. Fissuras longitudinais e transversais 15. Deslizamento	

PATOLOGIA	QUANTIDADE						TOTAL	DENSIDADE (%)	VALOR DEDUZIDO
1H	6.84						6.84	3.3	40.1
6H	79.9						79.9	38.0	46.0
13L	0.528	0.564	0.97	1			3.062	1,4	31.2
13M	1.2	1.54	2.40	5.13	5.60		15.87	7.6	32.1
13H	11.22						11.22	5.3	27.1

Densidade = Total Quantidade/Total Área

Densidade = 6.84/210 = 3.3%

Quadro 2: Cálculo de PCI da amostra da secção 1

#	Valor Deducido							Total	Q	CDV
1	46	40.1	32.1	31.2	27.1			176.5	5	91.0
2	46	40.1	32.1	31.2	2			151.4	4	88.0
3	46	40.1	32.1	2	2			122.2	3	74.0
4	46	40.1	2	2	2			92.1	2	66.0
5	46	2	2	2	2			54	1	52.0

Max CDV = 91.0

PCI=100-Max CDV = 100-91 = 9 (Péssimo)

A secção 2 (Km 1+100), apresentou patologias do tipo buraco, ocupando 2 níveis de severidade, baixo e médio, com os valores deduzidos de 25 e 31.1, respectivamente. Obteve - se o máximo valor deduzido de 41, dando como resultado um índice correspondente a um pavimento bom. De acordo com o quadro 3 apresenta o registo de amostras da secção 2 e o quadro 5 apresenta o cálculo de PCI.

Quadro 3: Registo de amostras na secção 2

PATOLOGIA	QUANTIDADE						TOTAL	DENSIDADE (%)	VALOR DEDUZIDO
13L	0,264	0.7	0.81	0.945	0.96	0.96	92,129	4,4	25
13M	1.045	1.89	2.34	2.55			7,825	3.7	31.1

Densidade = Total Quantidade/Total Área

Densidade = 92.129/210 = 25%

Quadro 4: Cálculo de PCI da amostra da secção 2

#	Valor Deducido							Total	q	CDV
1	31.1	25						56.1	2	41
2	31.1	2						33.1	1	31

Max CDV = 41.0

PCI=100-Max CDV =100-41 = 59 (Bom)

A secção 3 (Km 1+600), 210 m2, expõem patologias do tipo buracos com grau de severidade baixo e médio. Os valores deduzidos encontrados são 20.1 e 35 e o máximo valor deduzido de 35.1, que conduz a um resultado de um pavimento bom. De acordo com o quadro 5 apresenta o registo de amostras da secção 2 e o quadro 6 apresenta o cálculo de PCI.

Quadro 5: Registo de amostras na secção 3

PATOLOGIA	QUANTIDADE						TOTAL	DENSIDADE (%)	VALOR DEDUZIDO (VD)
13L	2x0.46	3x0.63	0.6	2x0.8	0.88	0.96	5.62	2.7	20.1
13M	1.05	1,5	2.21	2.5			7.26	3.5	35.1

Densidade = Total Quantidade/Total Área

Densidade = 7,26/210 = 3.5%

Quadro 6: Cálculo de PCI da amostra da secção 3

#	Valor Deducido							Total	q	CDV
1	35.1	20.1						55.2	2	40.0
2	35.1	2						37.1	1	34.0

Max CDV = 40.0

PCI=100-Max CDV =100-40 = 60 (Bom)

A secção 4 (Km 1+900) com 210 m2, apresentou patologias do tipo buracos com a gravidade, baixo, médio e alto e de tipo pele de crocodilo e pelada com o nível de severidade alto. Os valores deduzidos são de 40.1, 22.1 e 5.2. e o máximo valor deduzido e corrigido de 48, que conduziu a um resultado de um pavimento regular. De acordo com o quadro 7, apresenta o registo de amostras da secção 4 e o quadro 8, apresenta o cálculo de PCI.

Quadro 7: Registo de amostras na secção 4

PATOLOGIA	QUANTIDADE						TOTAL	DENSIDADE (%)	VALOR DEDUZIDO (VD)
7L	0,75						0,75	0,38	5,2
7M	1,25	2.08	2.25				3,33	1,6	22.1
7H	4,44						4,44	2,1	40,1

Densidade = Total Quantidade/Total Área

Densidade = 6.83/210 = 3.0%

Quadro 8: Cálculo de PCI da amostra da secção 4

#	Valor Deducido							Total	q	CDV
1	40.1	22.1	5.2					67.4	3	41.0
2	40.1	22.1	2					64.2	2	48.0
3	40.1	2	2					44.1	1	44.0

Max CDV = 48.0

PCI=100-Max CDV=100-48 = 52 (Regular)

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1 CONCLUSÕES

O objectivo deste artigo visa avaliar as condições funcionais do pavimento flexível da Estrada Nacional Número Dois (N2), Boane – Namaacha, numa extensão de 2 km, através do método PCI. Assim, neste trabalho ficou concluído o seguinte:

O método PCI foi importante na identificação, definição e determinação de medidas a tomar para mitigação de patologias;

O método de PCI mostrou ser um método barato por requerer só roda métrica e fita métrica e reportagem fotográfica feita celular na falta de máquina fotográfica;

Os valores de PCI obtidos foram distintos para diversas secções estudadas, sendo secção 1, o PCI = 9 (Péssimo), secção 2, o PCI = 59 (Bom), secção 3, o PCI = 60 (Bom), secção 4, o PCI = 52 (Regular);

Os resultados revelaram a existência de patologias predominantes do tipo pele de crocodilo, pelada e buracos, sendo do tipo crocodilo e pelada de nível de gravidade alto e buracos apresentando-se nos três níveis de gravidade (alto, médio e baixo);

4.2. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se o seguinte:

O uso do método PCI na pesquisa da condição de pavimento;

Desenvolvimento de estudos experimentais que inclua mais secções de estradas com outros tipos de defeitos não abordados no presente estudo;

O uso dos resultados de PCI para decisão qual o tipo de actividades de manutenção a realizar;

A consideração dos resultados de PCI para dimensionamento de pavimentos;

Nas secções onde o PCI é baixo, realizar reabilitação e onde o PCI é alto, nada fazer.

REFERÊNCIAS

Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA), 2021. Estudo Sobre Plano Director e Estudo de Viabilidade para o Desenvolvimento de Estradas da Cidade de Maputo, Moçambique, 2021

Diogo, J. F. R. (2007). Asphalt Pavement Design Methodologies used in Mozambique and in China, Southwest Jiaotong University, China

Joia, P. R. (2021). Sistema Rodoviário e Mobilidade Rural; Um Estudo de Caso do Município de Corumbataí.

Rosyidi, S. A. P. (S/data). Measurement of Pavement Condition Index – PCI Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Velásquez, E. D. R. (2009). Cálculo Del Índice de Condición del Pavimento Flexible en la Av. Luís Montero, Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidade de Piura.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

EFICIÊNCIA DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND E REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO COMO EFEITO COLATERAL

Felipe Hartman Polli [a]; Taynah Almeida de Jesus [b]; Eduardo Pereira [c]

[a] (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil), felipehartman95@gmail.com

[b] (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil), eng.taynahalmeida@gmail.com

c (Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Campus Uvaranas, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Uvaranas Ponta Grossa, Brasil), eduardopereira@uepg.br

RESUMO

A corrosão de armaduras é uma das principais manifestações patológicas identificadas nas estruturas e técnicas de recuperação como a realcalinização eletroquímica (RAE) têm sido utilizadas como medidas de prevenção ou recuperação. Ocorre que a reação álcali-sílica (RAA) como efeito colateral da realcalinização não foi amplamente compreendida. Com o objetivo de avaliar este possível efeito colateral, foram moldados corpos de provas de concreto com agregados potencialmente reativos e potencialmente inerte. Estes foram submetidos à carbonatação e realcalinização eletroquímica em soluções de KOH e Na_2CO_3. Para a coleta de evidências foram utilizados os ensaios de potencial de corrosão, microscopia eletrônica de varredura e ótica, DRX e FRX. Por meio de indicador de fenolftaleína e potencial de corrosão foi possível observar a eficiência da realcalinização e por análise visual notou-se a diminuição da corrosão das armaduras quando comparado com os concretos carbonatados que não foram tratados. Em relação a eficiência das soluções na realcalinização, percebe-se que o hidróxido de potássio é mais eficiente, conseguindo realcalinizar o concreto na metade do tempo do carbonato de sódio. As imagens indicam aparecimento de gel e degradação dos agregados, efeitos característicos da RAA, possivelmente devido a eletrólise da água nas proximidades da armadura, formando hidroxilas, as quais atacam os agregados silicosos.

Palavras-chave: Durabilidade do concreto; Carbonatação; Realcalinização; Reações álcali-agregado

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland destaca-se por suas propriedades mecâncias, pela resistência à água, versatilidade nas formas arquitetônicas e custo relativamente baixo. Apesar das vantagens do uso do material, a sua vida útil e durabilidade não dependem apenas da sua boa execução, conforme apontado por Valduga (2002), sendo aproximadamente 40% dos recursos da construção direcionados a reparos e manutenções (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A proteção do aço contra corrosão fornecida pelo concreto é devido à barreira física e formação de película de passivação, formada espontaneamente em meios alcalinos. A corrosão prejudica as propriedades mecânicas do aço além de gerar produtos expansivos oriundos do processo corrosivo (Fe_2O_3 hidratado, por exemplo) capaz de gerar um aumento de volume de até 600% (BROOMFIEL, 2007; RIBEIRO *et al*., 2014).

Métodos eletroquímicos e químicos não destrutivos foram desenvolvidos para tratar o aço e o concreto, promovendo repassivação das armaduras pelo aumento da alcalinidade da matriz cimentícia (ELSENER et al., 1997; MIETZ, 1998). A realcalinização eletroquímica consiste em aplicar uma corrente elétrica entre uma malha de aço inoxidável (ânodo) e a armadura do concreto (cátodo). Dessa forma ocorrerá a eletrólise da água na proximidade da armadura, sendo ela a principal responsável pelo aumento da alcalinidade nessa região. Além disso, é colocado uma solução eletrolítica (KOH e Na_2CO_3, por exemplo) em contato com o concreto e o ânodo, onde os íons alcalinos presentes nessa solução são positivos e consequentemente são atraídos pela armadura que está carregada negativamente. O princípio da realcalinização pode ser visto na Figura 1.

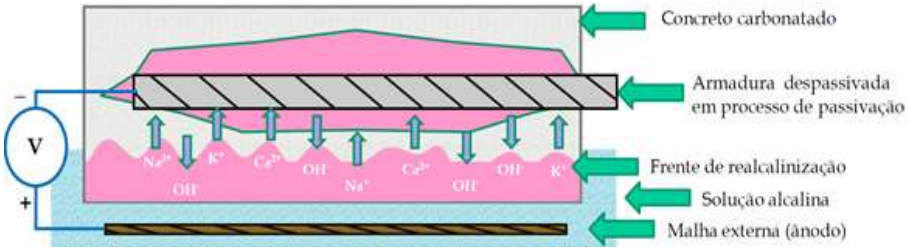


Figura 1 - Princípio da realcalinização eletroquímica. Adaptado de Araújo (2004).

Nomura *et al.* (2012) relatou, em trabalho sobre o tema, que o valor do pH do concreto se manteve em torno de 12,2 mesmo após 17 anos do tratamento eletroquímico com solução mista de carbonato de cálcio e carbonato de Lítio. No entanto, Zhu, Zhang e Qu (2020) relatam que após somente 7 anos, já havia ocorrido a despassivação de todas as armaduras novamente, inclusive com surgimento de novas fissuras, sendo esse resultado associado a intensidade de corrente utilizada na realcalinização.

Mietz (1998) sugere que a Realcalinização Eletroquímica (RAE) pode causar efeitos colaterais prejudiciais em concreto armado, como reação álcali-sílica e redução da aderência aço-concreto. As reações álcali-agregado, decorrentes de fases reativas nos agregados, são agressivas à durabilidade do concreto, diagnosticadas macroscopicamente por exsudações e fissuras (PEREIRA et al., 2023). Tais reações geram um gel higroscópico, viscoso, expandindo-se e causando tensões internas capazes de ocasionar exsudação na superfície e até fissuras em mapa. (TEYMOURI *et al.*, 2023).

Embora a realcalinização eletroquímica possa restabelecer o pH e interromper a corrosão ao reconstruir a película passivadora, existem preocupações sobre sua potencial indução de reações álcali-agregado (RAA), conforme documentado em estudos anteriores (MIETZ, 1998; GONÇALVES *et al*., 2003; SIMS, POOLE, 2017; MATSUMOTO *et al.*, 2003). Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar a eficácia de diferentes soluções eletrolíticas na realcalinização do concreto, na repassivação das armaduras e se o método potencializa o RAA.

2 DADOS E MÉTODOS

O programa experimental consistiu em verificar qual solução eletrolítica é capaz de realcalinizar o concreto, repassivar a armadura e causar o mínimo de interferência em sua microestrutura capaz de gerar reações álcali-agregado. Para isto corpos de prova de concreto foram moldados e então submetidos as condições de carbonatação acelerada (visando iniciar o processo de redução de alcalinidade e início do processo de corrosão das armaduras) e posterior realcalinização eletroquímica, a fim de verificar o comportamento dos concretos realcalinizados em relação à reação álcali-agregado, variando o agregado (potencialmente reativo e potencialmente inerte) e as soluções eletrolíticas utilizadas na realcalinização (KOH e Na_2CO_3).

O traço unitário adotado para o concreto foi de 1:2:3, com uma relação água/cimento de 0,65, escolhido pela boa trabalhabilidade e para facilitar o adensamento nos moldes. O valor de a/c foi definido de acordo com a NBR 6118 (2018), garantindo maior porosidade ao concreto, acelerando a carbonatação e a realcalinização. Foi utilizado o cimento CP-II-F (cimento contendo filer calcário, conforme NBR 16697:2018, equivalente ao CEM II/B-L 32N). Como agregado foram utilizados um agregado potencialmente reativo e um potencialmente inerte. A Figura 2 fornece uma representação visual da expansões nos agregados A e D, permitindo uma comparação direta e a verificação da conformidade com os limites estabelecidos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

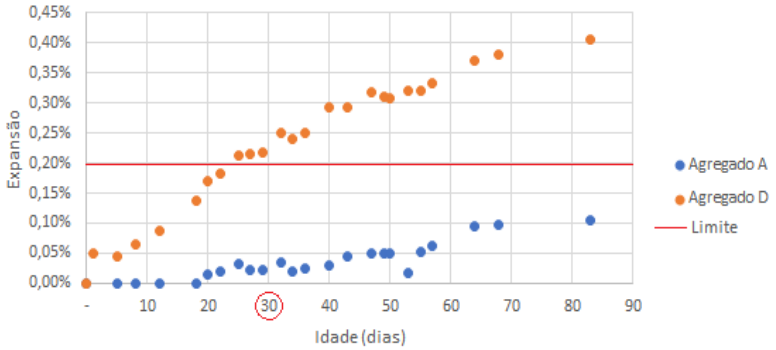


Figura 2 - Comparação de expansões entre as barras de argamassa dos agregados utilizados na pesquisa, de acordo com o limite da NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Foram fabricados 44 corpos de prova prismáticos com dimensões 12 x 12 x 4 cm de concreto, cada um contendo duas barras de aço carbono CA-50 com diâmetro de 8 mm e comprimento de 25 cm. As barras foram revestidas com fita isolante, deixando apenas dois centímetros nas pontas externas e três centímetros no interior do corpo de prova descobertos. Esses corpos de prova foram submetidos a um processo de carbonatação acelerada, seguido por realcalinização eletroquímica. Após moldagem, os corpos de prova foram curados por 28 dias, imersos em água, para promover o desenvolvimento adequado da microestrutura, especialmente do hidróxido de cálcio (portlandita), essencial para as análises subsequentes. A carbonatação foi conduzida em uma autoclave, preenchida diariamente com gás carbônico até 1,5 Kgf/cm² de pressão. Os corpos de prova não carbonatados permaneceram em condições ambientais de laboratório. Como solução eletrolítica, fonte dos íons alcalinos, foram utilizadas soluções de hidróxido de potássio P.A. (KOH) e carbonato de sódio P.A. (Na_2CO_3).

Como medidas de controle utilizou-se a técnica de potencial de corrosão e indicador colorimétrico com fenolfetaleina. A medição do potencial de corrosão seguiu a norma ASTM C876 (2015), utilizando um eletrodo de calomelanos saturado (ECS) em contato com a superfície do concreto através de uma esponja úmida de alta condutividade elétrica. Essa medida qualitativa indicou o estado superficial da

armadura, revelando se estava ativa ou passiva, possibilitando a identificação de regiões suscetíveis à corrosão. O sistema montado pode ser visualizado na Figura 3a.

Figura 3 – (a) Sistema montado para realcalinização eletroquímica; Exemplo de corpo de prova totalmente realcalinizado.

A solução de fenolftaleina foi utilizada como indicadora de pH, servindo para acompanhar a frente de carbonatação e de realcalinização. Ao ser aplicado no concreto, se o ph estiver no intervalo de 8,3 a 10, a solução ficará na cor carmim, ou seja, se o concreto estiver carbonatado, a solução permanecerá incolor (OLIVEIRA *et al*., 2021). Para verificar a frente de carbonatação, foram colocados corpos de prova adicionais na autoclave. Essas amostras foram desbastadas até que após a aspersão de fenolftaleína verificou-se que não ocorreu mudança de cor nas proximidades da seção transversal, podendo assim encerrar a carbonatação acelerada. Um exemplo de verificação da frente de realcalinização pode ser observado na Figura 3b.

Logo após a realcalinização eletroquímica, um corpo de prova de cada situação foi analisado quanto à presença de reação álcali-sílica. Para isso foram analisadas amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e ótica, procurando a presença do gel álcali-sílica e de possíveis fissuras que podem ser causadas pela expansão do gel. Posteriormente, as amostras de concreto foram preparadas para caracterização por DRX (Difração de Raios X) e FRX (Fluorescência de Raios X). Os corpos de prova foram pulverizados com o auxílio de um soquete metálico sendo utilizado para análises o material passante na peneira de abertura de 0,075 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM SOLUÇÃO DE Na_2CO_3

Após a moldagem, as armaduras atingiram a zona de passivação após 35 dias, indicando a formação da pelicula passivante (Figura 4). As leituras foram iniciadas um dia após a moldagem e foram realizadas até 450 dias. Os concretos de controle permaneceram na zona de passivação até o fim dos experimentos. Nos concretos após carbonatação, as armaduras atingiram potencial de corrosão entre -600 mV a -500 mV (ESC), indicando probabilidade de corrosão das armaduras.

A realcalinização durou 8 dias, resultando em potenciais negativos em torno de -1200 mV (ESC), mas posteriormente, em aproximadamente treze dias, os potenciais começaram a se tornar menos negativos, indicando eficácia no tratamento. Resultados semelhantes foram observados em estudos anteriores. Poursaee e Hansson (2007) identificaram passivação do aço 7 dias após a moldagem de

argamassas enquanto Araújo (2009) identificou valores de potenciais de corrosão acima de -200 mV (ESC) em até dois meses de idade dos corpos de prova.

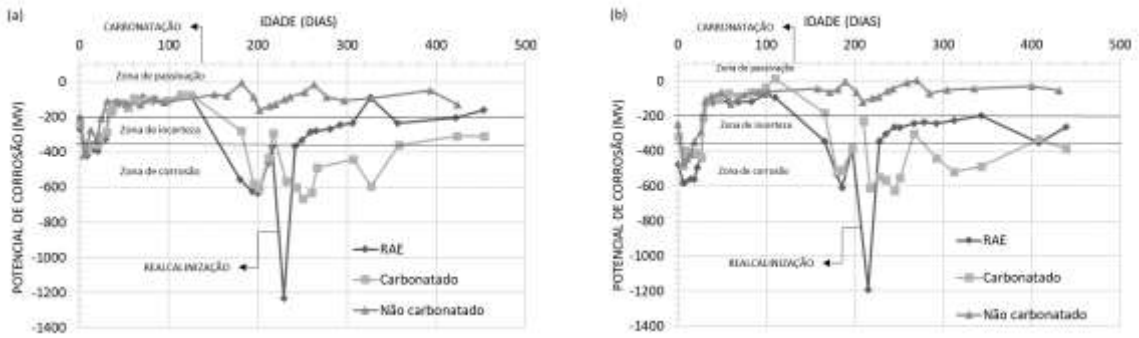


Figura 4 - Potencial de corrosão das barras de aço nos concretos realcalinizados eletroquimicamente em carbonato de sódio: (a) com agregado inerte; (b) com agregado potencialmente reativo.

Os resultados do ensaio com indicador colorimétrico usando fenolftaleína realizado após tratamento eletroquímico com Na_2CO_3 estão apresentados na Figura 5. A completa realcalinização do concreto após 8 dias é evidente, especialmente ao redor da área onde a armadura está exposta, indicando o término do tratamento. Após 329 dias do término do tratamento, observa-se uma redução significativa na alcalinidade do concreto realcalinizado em comparação com o fim do tratamento. Em comparação com o concreto não carbonatado, a alcalinidade após o tratamento também é menor, sugerindo que o tratamento, apesar de evidenciado pelo indicador colorimétrico, pode não ser tão duradouro quanto a alcalinidade natural do concreto.

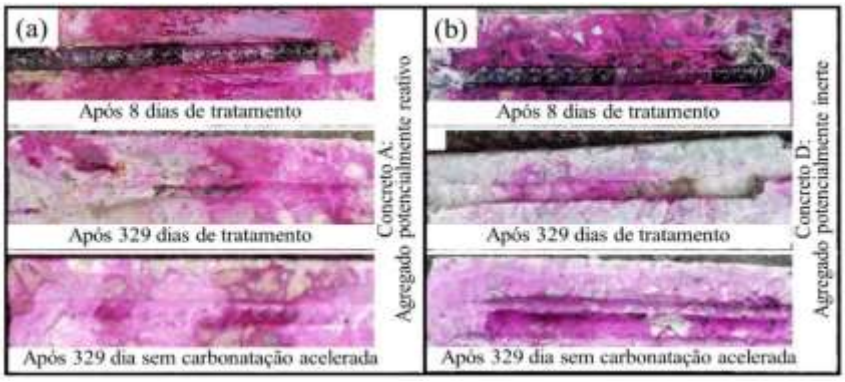


Figura 5 –Concretos após realcalinização eletroquímica em Na_2CO_3 e aplicação de indicador colorimetrico com fenolftaleína

As situações das armaduras, apresentadas na Figura 6, mostram o quanto a alcalinidade natural do concreto protege-a da corrosão, não sendo possível verificar qualquer sinal de degradação nas armaduras que estavam nos concretos não carbonatados. Analisando as armaduras que passaram por realcalinização, percebe-se redução significativa da oxidação quando comparada com o a armadura do concreto não tratado.

Os difratogramas de raios X (Figura 7) do concreto indicam a presença de quartzo e calcita em todas as amostras. Não foram identificados nos difratogramas compostos relacionados ao tratamento eletroquímico na microestrutura dos concretos. Após carbonatação acelerada e ao final do tratamento com Na_2CO_3 só foi possível identificar os cristais de quartzo e calcita, provavelmente por estarem em maior quantidade, devido a formação destes elementos na carbonatação e consequentemente ocultarem os picos de outros cristais que podem estar presentes na amostra.

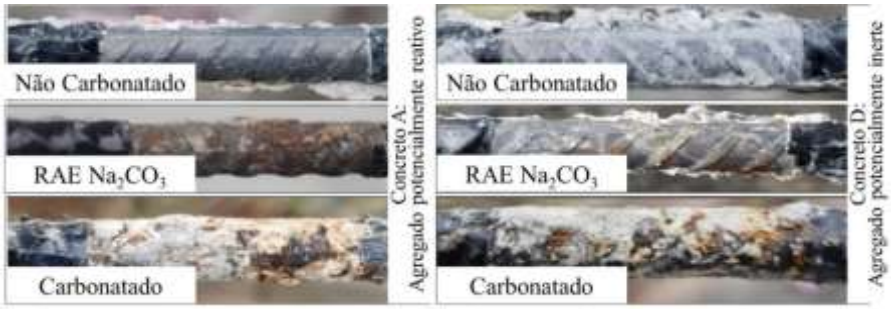


Figura 6 - Situação das armaduras 329 dias após o fim da RAE em Na_2CO_3.

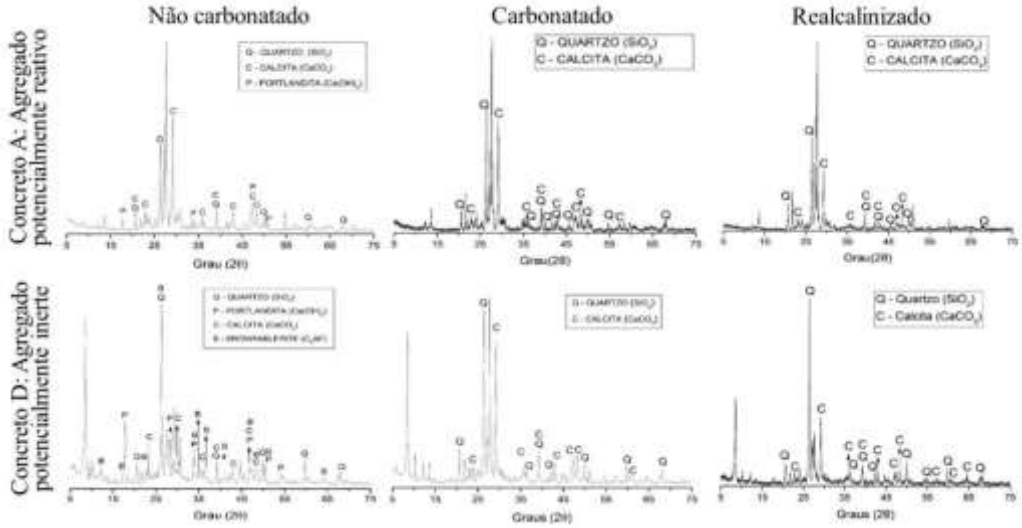


Figura 7 - Resultado do DRX dos concretos

Os resultados de FRX das amostras de concretos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**)indicaram o aumento na quantidade de Na_2O para ambos os concretos quando realcalinizados, intensificando o teor alcalino do concreto, um dos principais fatores para o aparecimento de reação álcali-sílica. Este composto é proveniente do sistema de tratamento eletroquímico utilizado com o Na_2CO_3. Como consequência do aumento de Na_2O, teve-se uma redução percentual proporcional de outros compostos presentes no concreto.

	Concreto D			**Concreto A**		
	Não carbonatado	**Carbonatado**	**RAE Na_2CO_3**	**Não carbonatado**	**Carbonatado**	**RAE Na_2CO_3**
Na_2O	1,83	2,29	4,53	2,64	2,91	5,61
MgO	4,78	4,33	4,09	1,95	1,93	1,92
Al_2O_3	10,40	10,10	10,80	9,18	10,10	10,30
SiO_2	38,90	40,20	41,80	43,00	45,10	47,10
SO_3	1,55	1,14	0,89	1,47	1,06	1,21
K_2O	2,59	2,67	2,72	3,12	2,95	3,42
CaO	31,50	32,10	27,40	34,90	32,30	27,00
Fe_2O_3	7,26	6,54	7,20	3,45	3,28	3,09

Quadro 1 – FRX dos concretos não carbonatados, carbonatados e realcalinizados eletroquimicamente em carbonato de sódio.

Para investigar possíveis reações álcali-agregado, amostras dos concretos foram examinadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/ EDS). As imagens do concreto A carbonatado e realcalinizado eletroquimicamente em carbonato de sódio são apresentadas na Figura 8. No concreto carbonatado não são observados sinais de gel ou degradação na superfície do agregado. Já no concreto realcalinizado há sinais de degradação na superfície do agregado, possivelmente devido à RAE, que fornece hidroxilas ao sistema, atacando a sílica amorfa do agregado e também fornecendo álcalis para balancear os monômeros de sílica formados, gerando gel álcali-sílica. Percebe-se que os principais compostos encontrados por EDS na superfície do agregado são: silício, sódio e cálcio, reforçando, portanto, a hipótese de início de formação de gel álcali-sílica.

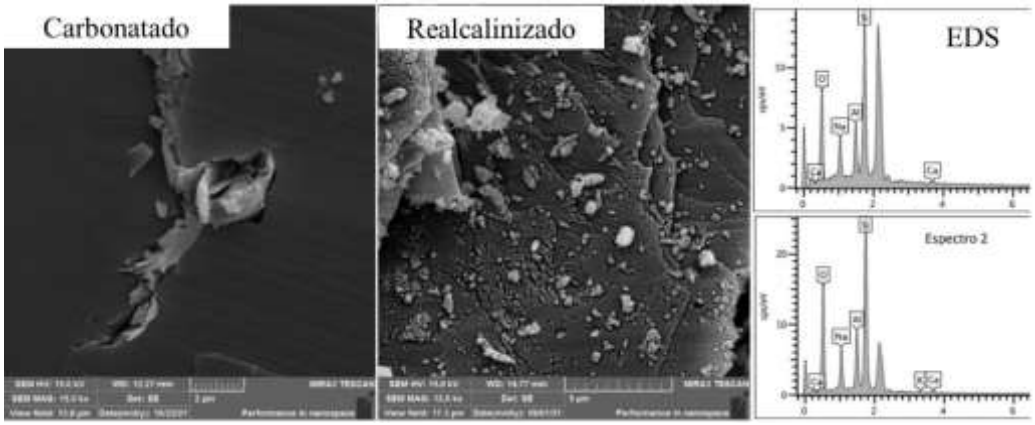


Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura e EDS das amostras de concreto

3.2 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM SOLUÇÃO DE KOH

Os concretos submetidos a RAE em solução de KOH foram avaliados quanto ao potencial de corrosão por aproximadamente 450 dias, sendo iniciada um dia após a moldagem. Os resultados estão apresentados na Figura 9, onde a Figura 9a é referente ao agregado A (inerte), e a Figura 9b é referente ao agregado D (potencialmente reativo).

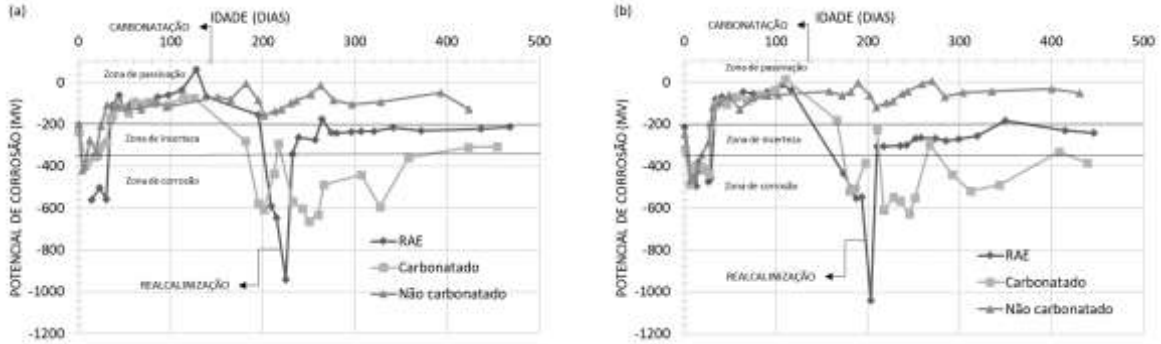


Figura 9 - Potencial de corrosão das barras de aço presentes nos concretos realcalinizados eletroquimicamente em hidróxido de potássio.

Como já havia sido identificado nos ensaios de potencial de corrosão dos concretos realcalinizados em carbonato de sódio, a passivação ocorre aproximadamente 35 dias após a moldagem. Após a carbonatação, as armaduras apresentaram potenciais abaixo de -350 mV, indicando que a armadura está na zona de corrosão. A primeira medida de potencial de corrosão após a Realcalinização Eletroquímica (RAE) mostrou potenciais próximos a -1000 mV, devido à aplicação de corrente elétrica, mas sete dias depois, já estavam acima de -350 mV, confirmando a eficácia do tratamento.

O ensaio de fenolftaleína que determinou o fim do tratamento de realcalinização eletroquímica em hidróxido de potássio está apresentado na Figura 10, onde percebe-se a total realcalinização da seção de concreto. É possível ainda verificar a condição de alcalinidade dos concretos após 348 dias do fim do tratamento, onde nota-se que o concreto ao redor da armadura se manteve alcalino e quando comparado com o concreto não carbonatado, não há uma diferença significativa.

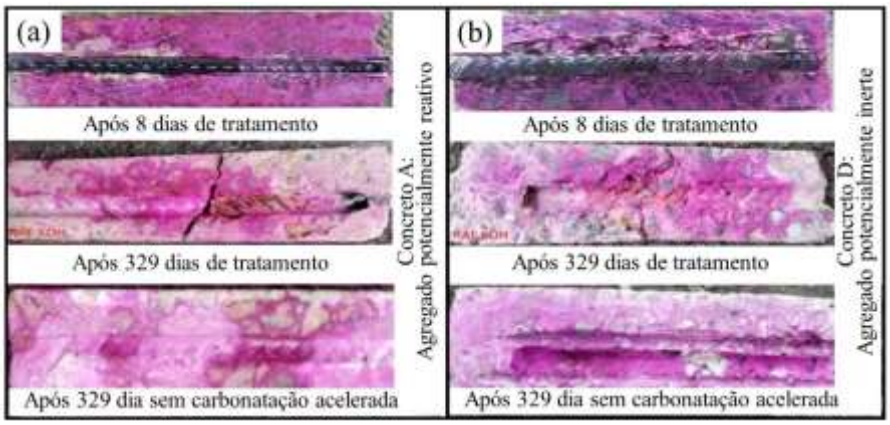


Figura 10 - Concretos após realcalinização eletroquímica em KOH e aplicação de indicador colorimetrico com fenolftaleína

Estão apresentadas na Figura 11 as condições das armaduras realcalinizadas quimicamente em carbonato de sódio. Visualmente percebe-se que a armadura sofreu menor degradação quando comparada com o concreto carbonatado, porém, ainda assim, significativamente superior ao concreto não carbonatado. Evidenciando-se, dessa forma, a importância de não permitir que o processo de corrosão se inicie.

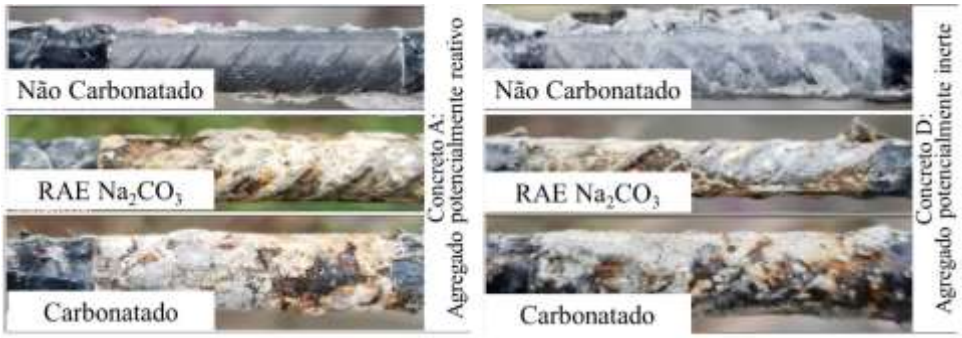


Figura 11 - Situação das armaduras 348 dias após o fim do tratamento eletroquímico em KOH

Os difratogramas de raios X do concreto A e D estão apresentados na Figura 12 Nota-se que, assim como na realcalinização eletroquímica em carbonato de sódio, os únicos cristais identificáveis após o tratamento são os cristais de quartzo e calcita, estes podem estar ocultando picos de outros cristais. Enquanto, no concreto D, pode-se notar o consumo de hidróxido de cálcio pela carbonatação, também foram encontrados produtos da hidratação do cimento, como: etringita e brownmilerite, além cristais anidros, como o aluminato de cálcio.

A partir dos resultados de FRX (Quadro 1) é possível perceber que após tratamento de realcalinização eletroquímica em hidróxido de potássio, a quantidade de K_2O identificada na amostra foi superior às amostras não realcalinizadas. Portanto, houve uma alteração significativa no teor alcalino do concreto, fator que potencializa a reação álcali-sílica, principalmente em caso de solubilização desse sal na presença de alta umidade.

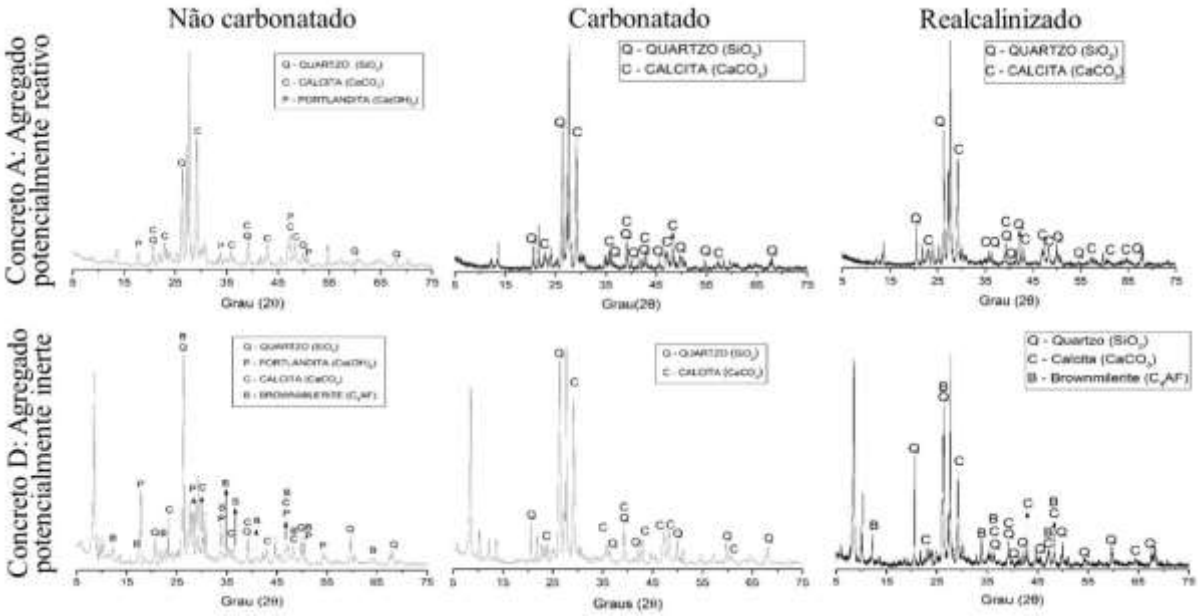


Figura 12 - DRX do concreto realcalinizado eletroquimicamente em KOH.

	Concreto A			Concreto D		
	Não carbonatado	**Carbonatado**	**RAE KOH**	**Não carbonatado**	**Carbonatado**	**RAE KOH**
Na_2O	2,64	2,91	2,94	1,83	2,29	2,60
MgO	1,95	1,93	2,13	4,78	4,33	4,00
Al_2O_3	9,18	10,10	9,55	10,40	10,10	11,40
SiO_2	43,00	45,10	42,90	38,90	40,20	45,00
SO_3	1,47	1,06	1,89	1,55	1,14	0,84
K_2O	3,12	2,95	8,08	2,59	2,67	5,29
CaO	34,90	32,30	29,10	31,50	32,10	20,80
Fe_2O_3	3,45	3,28	3,00	7,26	6,54	8,44

Quadro 1 - FRX dos concretos realcalinizados eletroquimicamente em KOH.

As imagens de microscopia eletrônica com EDS do concreto A carbonatado e realcalinizado com hidróxido de potássio, são apresentadas na Figura 13. O agregado do concreto carbonatado não mostra sinais de degradação ou gel em sua superfície. No entanto, no concreto realcalinizado, foram observadas formações diferentes das convencionais. Os resultados do EDS revelam a presença de silício, cálcio e potássio, elementos constituintes do gel álcali-sílica, sugerindo que essas formações podem ser gel álcali-sílica. Tem-se ainda na Figura 13 uma imagem de microscopia ótica, na qual é possível notar uma formação esbranquiçada, a qual pode estar relacionada à reação álcali-sílica ou ao depósito de sais do ensaio.

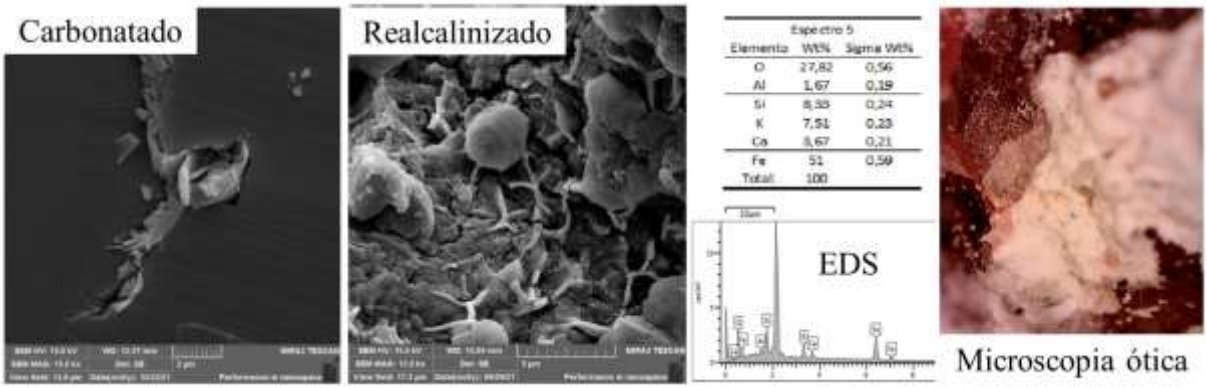


Figura 13- Concreto A realcalinizado eletroquimicamente em KOH.

Em relação a eficiência dos eletrólitos, ambos foram capazes de realcalinizar os concretos em um período de 8 dias. Comparando o potencial de corrosão não se percebe uma diferença significativa na eficiência do tratamento, pois ambos conseguiram elevar o potencial de corrosão das armaduras para potencias próximos ao -200 mV, região limite entre a zona de incerteza e de passivação.

Por microscopia ótica, as evidencias de RAA foram encontradas apenas nos concretos tratados com solução de hidróxido de potássio, sendo mais intensas nos concretos com agregado potencialmente reativos. Com os resultados, indica-se que há sinais de reação álcali-sílica em concretos tratados com solução de KOH e, portanto, essa solução se mostrou mais prejudicial ao concreto que a solução de Na_2CO_3 nesse aspecto, possivelmente por se tratar de um hidróxido.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo contribuiu com discussões de aspectos dos tratamentos de realcalinização eletroquímica e seus efeitos nas reações entre álcalis e agregados. Os resultados do ensaio de potencial de corrosão indicaram que os tratamentos reduziram a probabilidade de corrosão das armaduras, embora não tenham restaurado completamente o concreto, como mostraram os ensaios de alcalinidade e potencial de corrosão. Os concretos tratados eletroquimicamente apresentaram mais sinais de reação álcali-sílica, atribuídos à formação de hidroxilas durante a eletrólise da água na superfície da armadura, iniciando as reações álcali-sílica.

Em relação às soluções utilizadas, a solução de hidróxido de potássio resultou em mais sinais de reação álcali-sílica, possivelmente devido à sua capacidade de fornecer mais íons hidroxilas. Mesmo o concreto com agregado potencialmente inerte apresentou sinais de reação álcali-sílica após tratamento eletroquímico com hidróxido de potássio, destacando a agressividade desse tratamento aos agregados silicosos.

Os resultados ressaltam a influência dos tratamentos de realcalinização nas reações álcali-agregado, destacando a importância de considerar esse efeito colateral ao decidir pela aplicação do tratamento, bem como a relevância de escolher o tipo de solução, seja hidróxido de potássio ou carbonato de sódio.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Ponta Grossa por fornecer a infraestrutura para esta pesquisa, em particular ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU), e a Fundação Araucária, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Programa Nacional Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: agregados – reatividade álcali-agregado – parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete – C876. In: Annual Book of ASTM Standards. 2015. Philadelphia.

ARAÚJO, F. W. C.; Contribuição à Viabilização da Técnica de Realcalinização do Concreto Carbonatado Através da Absorção/Difusão de Soluções Alcalinas. Goiânia, 2004. 204 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás.

BROOMFIELD, J. Corrosion of Steel in Concrete Understanding, Investigation and Repair. 2nd edition, Taylor & Francis p. 18-19, 2007.

ELSENER, B.; ZIMMERMAN, L.; BURCHLER, D.; BOHNI, H., Repair of Reinforced Concrete Structures by Electrochemical Techniques—Field Experience, Corrosion of Reinforcement in Concrete—Monitoring, Prevention and Rehabilitation, Papers from Eurocorr 97, Publication No. 25, eds. J. Mietz, B. Elsener, R. Polder (London, UK: IoM Communications,(8) p. 125-140, 1997. https://doi.org/10.1201/9781003076957

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. Procedimientos de reparación de armaduras. In: Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: reparación, refuerzo y protección. CYTED – XV-F. 2003, Cap. 7, p. 338-376.

MATSUMOTO, K. I. et al. Study on Realkalization with Electrolyte Containing Lithium Ion. International Journal of Modern Physics B, v. 17, n. 08n09, p. 1446–1451, 10 abr. 2003. https://doi.org/10.1142/S0217979203019137

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3ª edição. São Paulo, Ed. IBRACON, 2014. 674p.

MIETZ, J. Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. European Federation of Corrosion Publications, n°. 24. 1st edition. England: Ed. IOM communications Ltd, 1998. 57p.

NOMURA, N.; ISHIBASHI, M.; NANASAWA, A. The effect of desalination and realkalisation at 17 years after treatment. Proceedings of the Japan Concrete Institute, v. 34, n. 1, p. 1672-1677, 2012.

OLIVEIRA, M. A. N. et al. Evolução do Processo de Carbonatação em Argamassas de Cal Aérea. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 3, p. e13016, 2021. https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13016

PEREIRA, E. et al. Combined effect of alkali-aggregate reaction (AAR) and internal sulfate attack (ISA): Microstructural and porous structure modifications of portland cement mortars. Construction and Building Materials, v. 362, p. 129676, jan. 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129676

POURSAEE, A.; HANSSON, C.M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. Cement and Concrete Research, vol. 37, 2007, p. 1127–1133. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.005

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R. A.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO M. Z.; HELENE, P. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado - Teoria, Controle e Métodos de Análise. Editora Campos, 2014

SIMS, I; POOLE, A. Alkali-aggregate reaction in concrete: A Word Review. 1. Ed. London: CRC Press, 2017. 804 p. https://doi.org/10.1201/9781315708959

TEYMOURI, A. R.; YOUSEFPOUR, H.; NAVAYI NEYA, B. Finite element simulation of expansion and damage in RC elements affected by alkali-aggregate reactions. Structural Concrete, p. suco.202300379, 23 nov. 2023. https://doi.org/10.1002/suco.202300379

VALDUGA, L. Reação alcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo. 2002. 213p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP.

ZHU, P.; ZHANG, J.; QU, W. Long-term effects of electrochemical realkalization on carbonated concrete. Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 14, n. 1, p. 127–137, 2020. https://doi.org/10.1007/s11709-019-0583-x

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO EM FACHADAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO EM BRASÍLIA

Wilamy Valadares de Castro[a]; Jessica Siqueira de Souza[b]; Ana Filipa Ferreira da Silva Cigarro Matos[c]

[a]Universidade de Brasília (Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Brazil), wilamycastro1@gmail.com

[b]Universidade de Brasília (Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Brazil), jessica.souza@unb.br

[c]Universidade de Lisboa (Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), ana.ferreira.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A preocupação com a durabilidade das edificações está em evidência. As fachadas, como parte integrante dos edifícios, têm a função de proteção e conforto ao usuário. Entre os materiais que ostentam maior prestígio, destacam-se os revestimentos cerâmicos, aclamados por sua inegável praticidade na limpeza, beleza atemporal, notável robustez, altíssima qualidade, bom desempenho no isolamento térmico e acústico, resistência ao fogo e impermeabilidade a gases e água. Entretanto, estes materiais não estão imunes aos danos causados, advindos de projetos mal concebidos e execução errônea ou material danificado, assim comprometendo o desempenho do sistema de vedação. Esta pesquisa mensura através do Método de Mensuração de Degradação, 310 trechos de fachadas localizadas em Brasília, Brasil, identificando as principais anomalias do sistema de revestimento cerâmico: descolamento cerâmico, fissura, falha de rejunte e eflorescência. Após a identificação, as anomalias foram quantificadas e classificadas, estabelecendo uma hierarquia que as ordena por grau de importância para as fachadas revestidas com cerâmica. A análise foi realizada tanto por zona da fachada quanto por tipo de anomalia, abrangendo as áreas de aberturas, cantos e extremidades, paredes contínuas, sacadas, topo e transição entre pavimentos. Os resultados apresentaram que 76% das amostras estavam sem degradação. Em contra partida 5% apresentaram degradação generalizada. A anomalia de destaque é o descolamento cerâmico para os níveis mais avançados de degradação, ocorrendo principalmente nas regiões de paredes contínuas e cantos e extremidades. Essa anomalia compromete a estética e a funcionalidade da fachada, exigindo medidas corretivas céleres e eficazes. Os dados recolhidos permitem a criação de um modelo que mapeia o padrão de degradação das fachadas revestidas com cerâmica, considerando as quatro principais anomalias observadas neste material. Essa ferramenta poderosa possibilita a avaliação do nível de severidade de cada anomalia e a comparação de sua importância relativa, fornecendo subsídios valiosos para a prevenção e o combate à degradação.

Palavras-chave: Fachada, Revestimento Cerâmico, Degradação, Anomalias.

1 INTRODUÇÃO

As fachadas são elementos importantes na concepção dos edifícios. Além da proteção física contra as intempéries, as fachadas bem concebidas trazem a sensação de conforto e bem estar ao usuário. Por ser parte intergrante da construção pode exercer e influenciar em funções como iluminação, suporte de cargas, vedação e ventilação. Todavia não há um consentimento da tecnologia utilizada na fachada, pois a escolha ideal é um resultado da concepção criativa para um local, situação ou arquitetura específica (Knaack *et al.* 2014).

Associado ao tema de fachadas se evidencia o de durabilidade ao qual se discute a necessidade de desenvolvimento sustentável e proteção ambiental. Dessa forma a fachada contribui impreterívelmente para o desempenho e durabilidade da edificação. O clima, os fatores biológicos, as tensões mecânicas, as incompatibilidades na utilização e até a manutenção inadequada são os agentes deletérios que podem atuar sobre a fachada, causando-lhe danos irreversíveis (Ferreira *et al.* 2020). O edifício, como obra de arte singular, apresenta características inconfundíveis, o que torna impossível reproduzi-lo com exatidão. Por conseguinte, a simultaneidade de diversos fatores dificulta a modelagem de um comportamento ou desempenho da fachada ao longo de um período temporal dilatado (Flores-colen *et al.* 2020).

Os revestimentos cerâmicos, alternativa de grande valia para o acabamento de ambientes, destacam-se por sua fácil higienização, valor estético, durabilidade, qualidade, isolamentos térmico e acústico, segurança ao fogo e estanqueidade aos gases e à água (Castro *et al.* 2023). No entanto, se especificados ou executados de forma imprecisa, podem comprometer o desempenho de vedação do sistema, ocasionando danos (Souza *et al.* 2018).

Os danos que acometem o revestimento cerâmico são frutos de anomalias que, por sua vez, são desconformidades ou irregularidades que o revestimento apresenta. Essas anomalias, por sua natureza anômala ou fora do comum, demandam estudo individualizado, pois estão sujeitas a fatores geométricos, geográficos, climáticos e executivos que as tornam únicas. Segundo Bauer *et al.* (2015), as fachadas de edifícios em Brasília apresentam, como principais anomalias, o descolamento da placa cerâmica, as fissuras, as falhas de rejunte, as eflorescências e as falhas de vedação, sendo o descolamento a que mais se destaca.

Estudos consolidados como de Souza *et al.* (2020) e Ferreira *et al.* (2021); dispõem a difilculdade do plano de manutenção em fachadas devido a variáveis inconstantes como execução inadequada e intempéries, mesmo com as ferramentas disponíveis a projetitas e a qualidade dos materias para execução dos revestimentos cerâmicos. À vista disso, pesquisas associadas a este material em fachadas para identificação e estimação das áreas de degradação estão sendo reproduzidas com o intuito de discutir causas e consequencias comuns aos cerâmicos. (Silvestre e De Brito, 2011; Bauer e Souza, 2022).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na américa do sul é muito comum o uso de cerâmicos, pois estão associados a fatores econômicos e culturais. O uso deste material é pretendido pela proteção dos edifícios tanto antigos, para preservação histórica, como em edifícios atuais devido a diversidade estética. As fachadas revestidas em cerâmica contam um sistema monolítico ao qual suas camadas subsequentes rígidas são aderentes entre si, culminando na camada final com o material cerâmico conectados pelo rejunte.

2.1 DURABILIDADE DOS EDIFÍCIOS

A durabilidade é a capacidade duradoura de um edifício ou dos seus componentes para desempenhar as suas funções originais, sem deterioração significativa, sob condições específicas de uso e conservação (ASTM E 632, 1996; ABNT NBR 15575-1, 2021). Com isso, se considera aspectos relacionados à vida útil do edifício e do revestimento, aos fenômenos de alterações estruturais e de componentes (físicos, químicos e mecânicos), às propriedades dos materiais aplicados na fachada e às condições de execução, aos efeitos das condições ambientais e de uso do edifício e à garantia da compatibilidade entre o sistema de revestimento e a estrutura (Souza *et al.* 2019).

2.2 FACHADAS COM REVESTMENTO CERÂMICO

Os revestimentos representam a pele do edifício, de forma a cumprir também com função estética. No caso dos sistemas cerâmicos são compostos pelo substrato padrão, preparo da base, o emboço (camada niveladora), argamassa colante e por fim a camada externa que pode variar o modelo de placas cerâmicas, como a geometria, marca e condições de fabricação (Ribeiro *et al.* 2019).

O sistema em questão pode manifestar um comportamento mecânico de natureza não linear e suscetível à fratura, tendo em vista a sua reduzida resistência à tração e a irregularidade da aderência entre os materiais que o compõem, pois estão expostos às forças corrosivas e erosivas da pluviosidade, da movimentação atmosférica, da irradiação solar, dos agentes vivos e dos resíduos tóxicos do ar (Flores-Colen, 2009).

2.3 ANOMALIAS COMUNS EM REVESTIMENTO CERÂMICO

O descolamento cerâmico ocorre quando há o desprendimento parcial ou total da peça cerâmica com a argamassa devido à descontinuidade do contato de ambos os materiais ou falta de aderência da cerâmica em relação ao substrato. O descolamento cerâmico costuma ser a anomalia de maior frequência ou incidência nas fachadas. Pressupõe-se que grande parte desse problema está associado a falhas de execução e falha de materiais (Feldfogel e Rabinovitch, 2021).

Uma fissura é definida como uma área da superfície de um componente ou uma área inteira que está sujeita à ação capilar e que produz tensões normais ou tangenciais. Ou seja, se estas oscilações criarem tensões que excedam as tensões admissíveis para os elementos que compõem o sistema, este é propenso a falhas (Santos, 2017).

O rejunte é um material que, com o tempo, sofre degradações que podem levar a falhas. Essas falhas podem ser causadas por agentes naturais, como a chuva e o sol, ou pela falta de manutenção. A infiltração de água, que pode ocorrer em decorrência dessas falhas, pode comprometer o revestimento cerâmico, reduzindo sua durabilidade e vida útil (Ferreira, 2016).

As eflorescências são manchas brancas que se formam pela cristalização de sais em soluções aquosas saturadas. Essas soluções são formadas na microestrutura dos materiais cerâmicos, seja pela presença de sais solúveis nos insumos, seja pela adição de água externa. Os sais são transportados pela rede capilar dos materiais até a superfície, onde cristalizam e se depositam, formando as manchas brancas. (Joffily e Oliveira, 2013).

2.4 ZONAS DE FACHADA

Freitas *et al.* (2013), defende que a análise da origem e das causas das anomalias permite identificar áreas onde elas são mais frequentes, ou seja, os fatores que contribuem para o surgimento das

anomalias podem ser atribuídos a cada zona da fachada. Silva (2014) determinou seis zonas de fachada que estão frequentemente expostas às anomalias e suas ocorrências. Souza (2019) aprimorara a subdivisão aderindo aos aspectos das edificações de Brasília, Distrito Federal. Castro *et al.* (2023) simplifica o modelo em duas dimensões para facilitar a compreensão das regiões de fachada (aberturas, cantos e extremidades, paredes contínuas, sacadas, topo e transição entre pavimentos), conforme Figura 1.

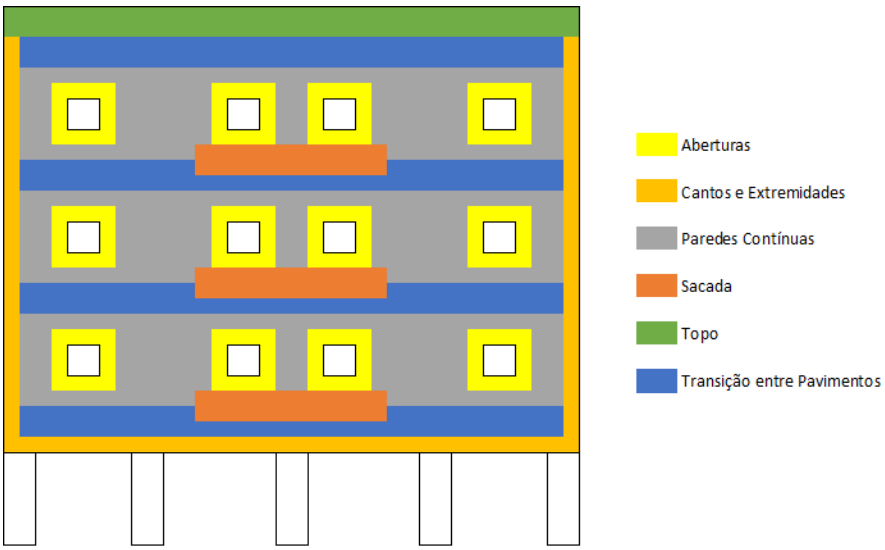


Figura 1 – Modelo de fachada padrão de Brasília, Brasil.

2.5 DEGRADAÇÃO: MENSURAÇÃO E MODELAÇÃO

O projeto $DMM_{project}$ criado por pesquisadores da Universidade de Brasília, tem como objetivo o estudo e compreensão do processo de degradação de fachadas de edifícios. O projeto desenvolveu o Método de Mensuração de Degradação (MMD), que uniformiza as diferentes etapas de inspeção e quantificação da degradação. A mensuração da degradação é realizada por meio de indicadores de degradação. Essa uniformização facilita a avaliação da condição de degradação, pois é um processo organizado, lógico e sistemático (de Souza *et al.* 2024).

O primeiro índice de degradação apresentado pelo MMD é o Fator de Danos (FD) que fornece um parâmetro inicial de degradação, permitindo identificar tendências de comportamento de deterioração da fachada. No entanto, esse índice não considera a importância de cada anomalia na degradação do sistema de revestimento. Dessa forma um segundo índice é formulado, o Fator Geral de Degradação (FGD), é obtido por meio da razão entre a área degradada ponderada por pesos referentes aos tipos de anomalias e a área de referência, acrescida da área total ponderada pela pior condição. Assim, o FGD, equação 1, é um índice mais preciso que o FD, pois considera a importância de cada anomalia na degradação do sistema de revestimento. Essa consideração permite uma avaliação mais detalhada do estado de conservação da fachada e auxilia na tomada de decisões sobre intervenções de manutenção.

$$FGD = \frac{\sum(A_{d(n)} \cdot k_n \cdot k_{c(n)})}{A \cdot \sum k_{máx}} \qquad \text{Equação 1}$$

Em que $A_{d(n)}$ é a área de fachada afetada por n tipos de anomalias em m², k_n é o coeficiente denominado nível de condição da anomalia n contido no intervalo de 1 a 4, $k_{c(n)}$ é o coeficiente denominado importância relativa da anomalia n, A é a área da amostra de fachada em m², $k_{máx}$ é a

constante equivalente ao nível da pior condição ($k_{máx}$= 14 = 4 + 4 + 3 + 3) e n é a referência do tipo de anomalia (n =1 descolamento cerâmico, n =2 fissuras e n =3 falha de rejunte, n = 4 eflorescência).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa é dividida em 3 fases, Figura 2. A primeira fase está na coleta de dados e catalogação de atributos dos revestimentos. A segunda fase está no tratamento de imagens coletadas para identificação das anomalias e representação em forma de croqui. E a terceira e última fase está na aplicação do método de Degradação: mensuração e modelação, ao qual classificará os níveis de degradação das anomalias.

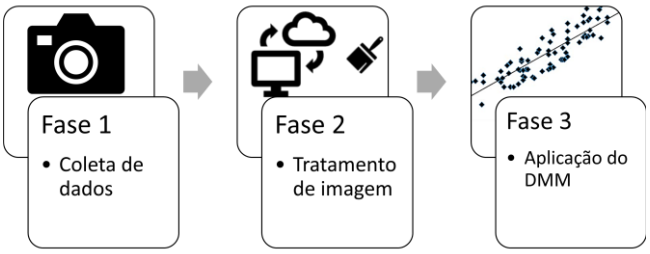


Figura 2 – Fases da metodologia aplicada.

3.1 BASE DE DADOS

A base de dados abrange 310 trechos de fachadas, localizadas no Plano Piloto, região central de Brasília, Brasil. Tais amostras são categorizadas de acordo com sua antiguidade, número de pavimentos, tonalidade e dimensão do revestimento cerâmico, características e localização do revestimento, orientação e, finalmente, zona bioclimática. Inicialmente foi realizada uma inspeção nas fachadas que contou com a combinação de alguns métodos como ensaio de percussão, uso de câmeras termográficas e o ensaio de *pull-off*.

O ensaio de percussão, alicerçado na norma ABNT NBR 13749 (2013), identifica deficiências adesivas entre o revestimento e a argamassa colante ou entre a argamassa colante e a base construtiva. A utilização de câmeras termográficas aperfeiçoa as atividades de inspeção, pois proporcionam maior detalhamento e possibilitam a identificação de anomalias não perceptíveis na inspeção visual inicial, a exemplo da presença ou ausência de umidade e da respectiva temperatura da superfície. Conforme preconizado pela norma ABNT NBR 13528 (2019), a tipologia de ruptura do ensaio *pull-off* é empregada para identificar e mensurar a aderência da peça. A resistência de aderência por tração é a tensão máxima suportada por uma área restrita de revestimento na interface de avaliação quando submetida a uma força normal de tração.

3.2 TRATAMENTO DE IMAGENS

A segunda fase do processo consiste na representação gráfica dos danos observados. Para tanto, são elaborados esquemas que registram as anomalias detectadas durante a vistoria inicial. Em seguida, procede-se à quantificação da deterioração, a fim de se obter o índice de degradação. Para tal, uma malha de 0,50 metro por 0,50 metro é sobreposta ao mapa dos danos, e cada unidade da malha é contada. Após a sobreposição da malha, as unidades são definidas para cada pavimento, e então as regiões da fachada são delimitadas (Bauer e Souza, 2022; de Souza *et al.* 2024).

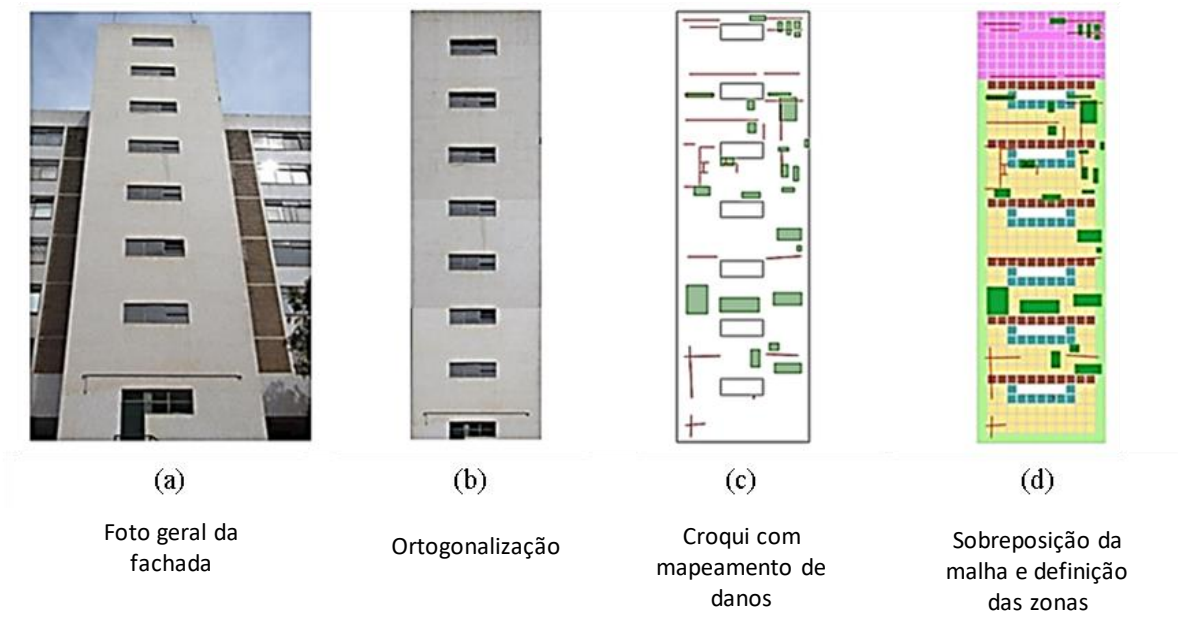


Figura 3 – Etapas do processo de coleta de dados à sobreposição de malha (adaptado de Bauer *et al.* 2020).

3.3 MÉTODO DE DEGRADAÇÃO E O NÍVEL DE CONDIÇÃO DA ANOMALIA

Para melhorar a acurácia nos estudos de degradação de edifícios no âmbito do Distrito Federal e auxiliar na determinação do grau de degradação, foi desenvolvido a probabilidade de ocorrência de uma anomalia que pode ser calculada pela multiplicação entre a frequência de ocorrência da anomalia (f_A) e o nível de condição da anomalia (dl_A), como expresso pela equação 2.

$$P_A = f_A \,.\, dl_A \qquad \text{Equação 2}$$

A frequência de ocorrência da anomalia (f_A), em cada amostra da base de dados, tal qual exposto na equação 3, consente a mensuração da intensidade do fenômeno em cada zona específica, através da razão entre a área afetada e a área total da referida zona.

$$f_A = \frac{A_{dz}}{A_z} \qquad \text{Equação 3}$$

Em que A_{dz} é a área degradada da zona "z"; A_z é a área da zona "z" em m² e z é zona de referência (paredes contínuas, aberturas, sacadas, cantos e extremidades, transição entre pavimentos e topo).

O nível de condição da anomalia (dl_A) define uma classificação hierárquica da degradação, com base na sua extensão e no grau de ocorrência de anomalias. A Tabela 1 detalha os critérios utilizados para essa classificação.

Tabela 1 – Coeficientes referentes ao nível de condições das anomalias (Souza, 2019).

Nível de condição		% de área degradada			
	dl_A	Descolamento cerâmico	Fissuração	Falha nas Juntas	Eflorescência
1	Condição boa (aceitável)	-	-	0,1	0,1
2	Condição de degradação pontual	0,05	0,2	0,3	0,3
3	Condição de estado limite de serviço	0,3	0,5	maior que 30%	maior que 30%
4	Condição de estado limite último	maior que 30%	maior que 50%	-	-

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos níveis de condição de degradação (dl_A) são analisados por zona e por anomalia. Os níveis adotados, que vão de sem degradação (nível 0) a degradação generalizada (nível 4), expressam a magnitude do comprometimento estrutural. A Figura 4 ilustra a frequência de ocorrência dos níveis de condição de degradação para cada zona.

A Figura 4 evidencia que, independentemente da zona, mais da metade das amostras (63%) não apresentam sinais de degradação. Ao se excluir as amostras em condição 0, observa-se que todas as zonas apresentam maior frequência de amostras no nível 2 (degradação leve), representando cerca de 10% do total. Tal comportamento é explicado pela influência do grau de gravidade das anomalias descolamento cerâmico e fissura. Ambas ocorrem com maior frequência no grupo amostral e, quando presentes, são classificadas no nível 2 em razão da sua relevância.

Em geral, as amostras das zonas analisadas apresentaram condições de conservação satisfatórias, com frequência inferior a 10% nas condições 3 e 4, que correspondem a níveis de degradação moderado e severo. Tal resultado é esperado, uma vez que as amostras foram coletadas em edifícios relativamente jovens, com idades inferiores a 60 anos. No entanto, a zona de paredes contínuas apresentou resultados discrepantes, com 11,1% das amostras na condição 3 (Figura 4c).

Por meio da análise dos níveis de deterioração, pode-se calcular esse índice por anomalia. A Figura 5 representa a frequência de ocorrência do nível de condição de degradação para cada anomalia. É importante ressaltar que o descolamento e a fissura não são classificados como boa condição (nível 1), pois a peça cerâmica em processo de descolamento ou fissura em estágio inicial já configuram uma deterioração leve, devido à gravidade dos danos potenciais que essas anomalias podem causar.

À primeira vista, a Figura 5a revela que, em estado de deterioração generalizada, a frequência de ocorrência de descolamento cerâmico é superior na zona de transição entre pavimentos (26%), enquanto as zonas de sacadas apresentam comportamento oposto, com 75% das amostras em condição aceitável de degradação.

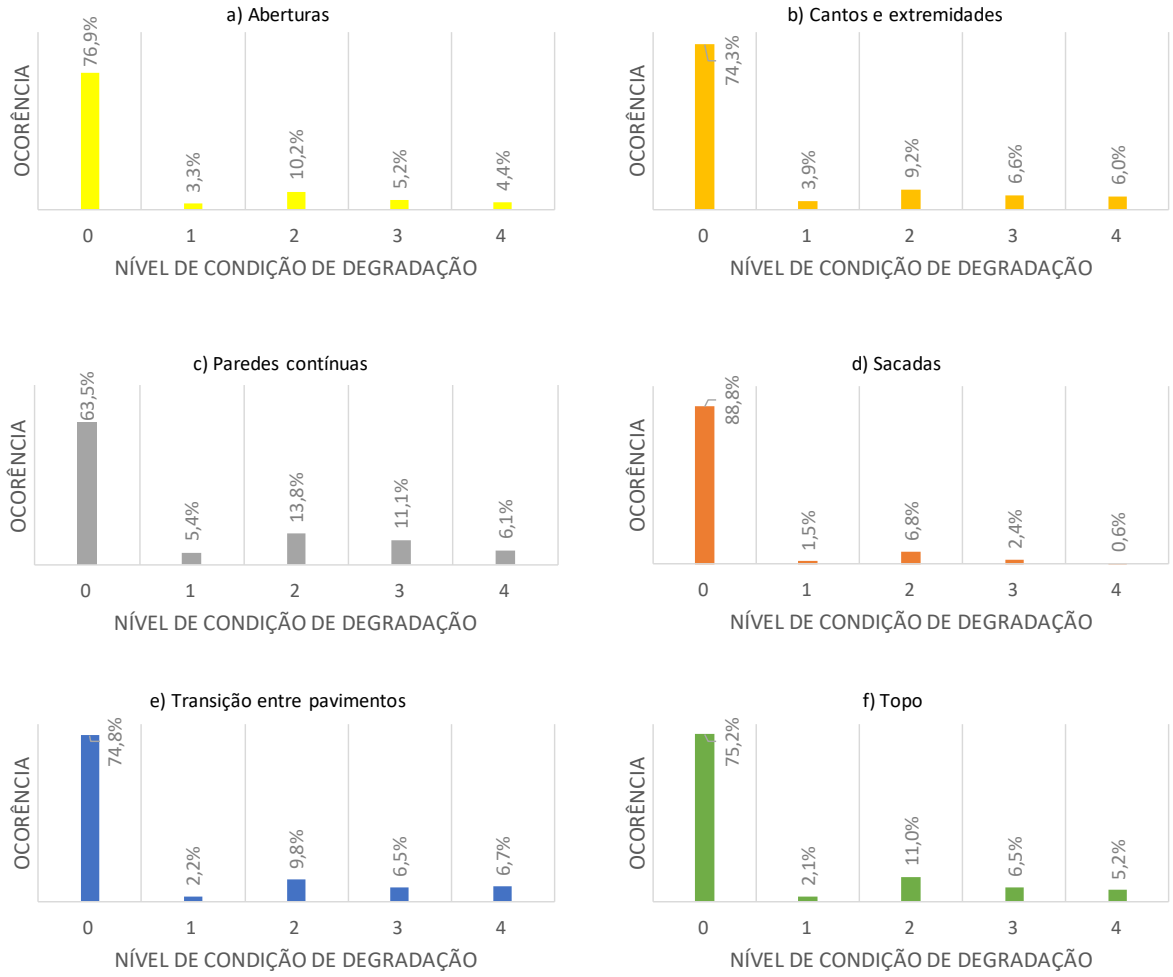


Figura 4 – Frequência de ocorrência em função do nível de condição por zona de fachada.

Em relação aos níveis de degradação para fissuras, destacam-se as zonas de cantos e extremidades, seguidas pela transição entre pavimentos e o topo, em ordem crescente de degradação. Isto se deve ao fato de que estas zonas apresentam as maiores quantidades de amostras quando relacionadas à classificação mais alta de degradação. Em contrapartida, as zonas de sacadas são as que apresentam os níveis de degradação mais baixos, com uma ocorrência de 88%, conforme se observa na Figura 5b.

À guisa de exemplificação, no que concerne à anomalia de falha de rejunte (Figura 5c), as zonas com maior ocorrência na classificação de condição de degradação generalizada foram a transição entre pavimentos (3%) e o topo, aberturas e cantos e extremidades (2%). Todavia, mais uma vez a zona de sacadas foi a que apresentou níveis de degradação mais baixos, com ocorrência notória de 94%.

A eflorescência, ao contrário das demais anomalias, apresentou uma incidência superior a 92% na condição sem degradação (nível 0), para todas as zonas. É importante ressaltar que, na condição de degradação generalizada (nível 4), a eflorescência foi observada apenas nas zonas de paredes contínuas, cantos e extremidades e transição entre pavimentos (Figura 5d).

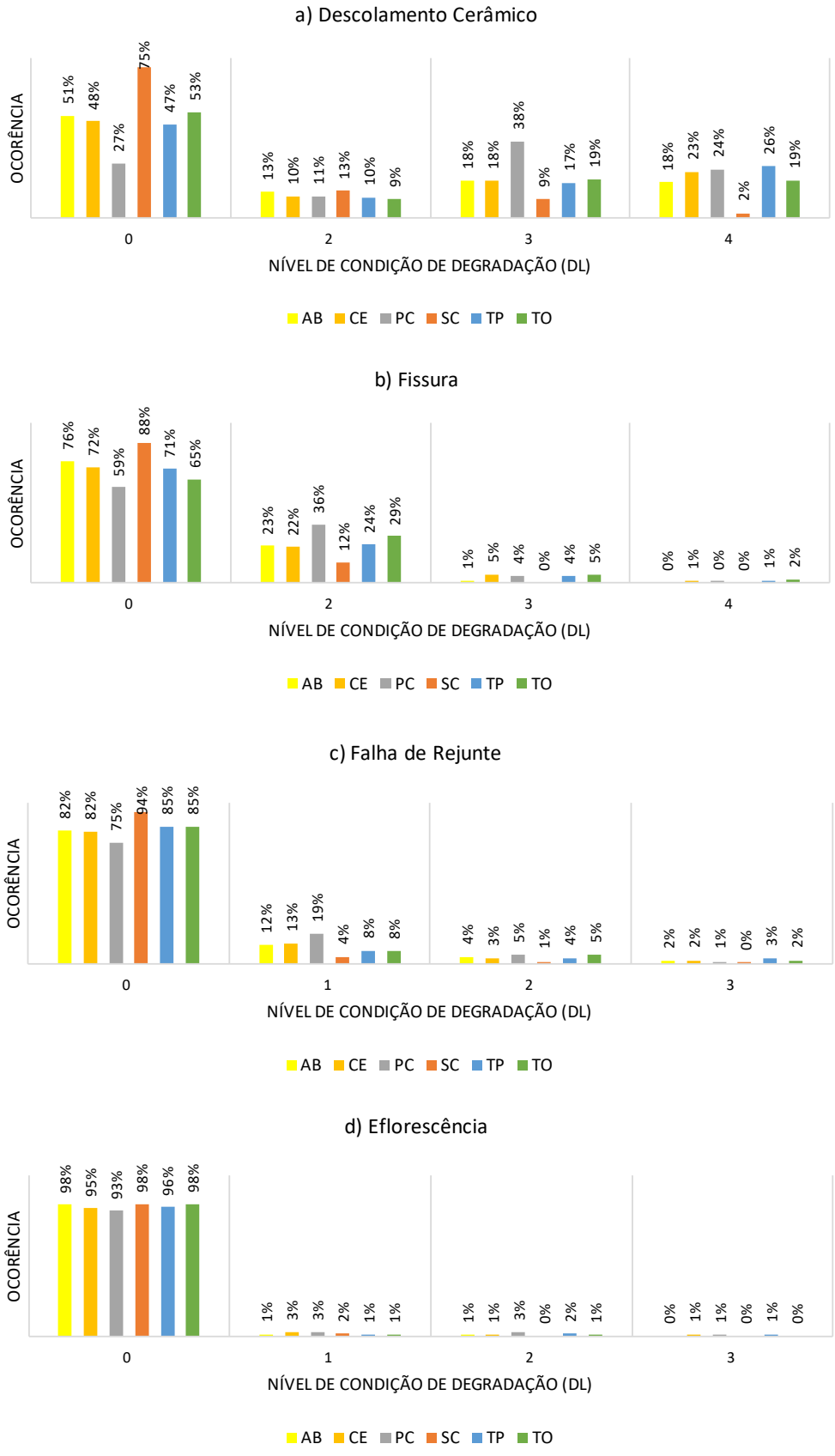


Figura 5 – Frequência de ocorrência em função do nível de condição por anomalia.

A análise dos níveis de condição de degradação para zonas e anomalias revelam pontos de convergência. De uma análise global, constata-se que a maioria das amostras se encontra na condição sem degradação, conforme ilustrado na Figura 6.

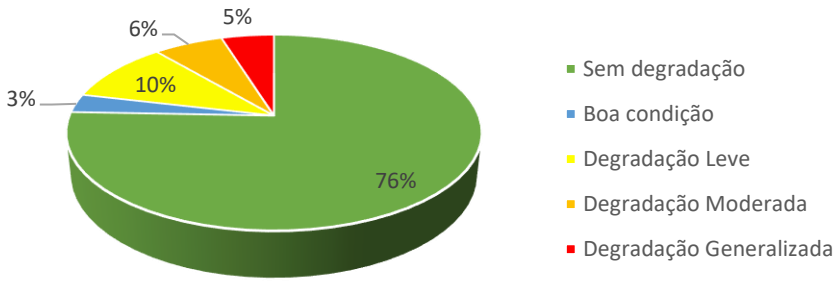


Figura 6 – Nível de degradação geral da amostra.

Em uma análise por zona, sacadas apresentaram a maior proporção de amostras sem degradação, enquanto as zonas de paredes contínuas apresentam uma tendência à distribuição mais uniforme dos níveis de degradação. Estas últimas, por sua extensão maior, são as regiões que apresentam a maior incidência de anomalias, confirmado por Castro *et al.* (2023).

A zona de transição entre pavimentos, de forma notável, detém o maior quantitativo de amostras em condições de degradação generalizada. Tal fato indica que esta zona é preponderante para a ocorrência de anomalias nos níveis de maior deterioração. Esta análise permite identificar que, frequentemente, a transição entre pavimentos encontra-se em condições críticas, corroborando com as pesquisas de Silva (2014), Souza (2019) e de Souza *et al.* (2024). Além de ser uma extensão de paredes contínuas, esta zona é também um local de acúmulo e movimentação estruturais.

A análise das anomalias revelou a ocorrência de descolamento cerâmico com distribuição uniforme. Tal fato se deve à multiplicidade de causas que podem provocar essa anomalia, o que a torna uma das mais relevantes para análise. Além disso, segundo Pacheco e Vieira (2017) e Bauer e Souza (2022), o descolamento cerâmico pode atuar de forma isolada ou em conjunto com outros mecanismos de degradação.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa traçou um minucioso mapeamento da degradação que assola os edifícios da capital federal brasileira. A pesquisa se valeu de uma vasta base de dados, meticulosamente compilada, que continha informações acerca do estado das fachadas de 310 trechos distintos. Tais fachadas ostentam revestimentos de placas cerâmicas, as quais foram previamente submetidas a inspeções visuais, a fim de se determinar com precisão sua condição atual.

Os dados coletados possibilitou a construção de um modelo preciso do padrão de degradação em fachadas revestidas com cerâmica. Tal modelo contempla as quatro principais anomalias observadas neste material: descolamento, fissura, falha de rejunte e eflorescência. As ocorrências destas anomalias foram mapeadas em seis zonas distintas da fachada: aberturas, cantos e extremidades, paredes contínuas, sacadas, topo e transição entre pavimentos. A fim de mensurar a degradação de forma precisa e criteriosa, foi empregado o Fator Geral de Degradação (FGD). Este instrumento de suma importância assume o papel fundamental de quantificar e qualificar as anomalias presentes,

ponderando-as e hierarquizando-as de acordo com sua severidade e impacto. Através da aplicação do FGD, é possível estabelecer o nível de criticidade de cada anomalia, bem como determinar o peso relativo entre elas, permitindo uma avaliação mais abrangente e eficaz da situação.

Dos diversos tipos de anomalias em revestimentos cerâmicos de fachadas, o descolamento se destaca como o mais prevalente e o de maior gravidade. Essa falha compromete a segurança dos usuários e demanda alto custo para reparo, tornando-a a mais preocupante entre as demais. Apesar da ocorrência de outras anomalias, como eflorescência e falha de rejunte, estas são menos frequentes e exercem menor impacto no processo de degradação da fachada.

A zona de paredes contínuas, desprovidas de aberturas, ostentam a maior incidência de anomalias. Essa primazia se deve à sua notável extensão, que supera consideravelmente as demais zonas da fachada. As zonas de transição entre pavimentos, topo do edifício e cantos e extremidades se revelam particularmente suscetíveis ao descolamento cerâmico, à fissuração e à falha de rejunte. Essa acentuada vulnerabilidade encontra explicação na concentração de tensões geradas por movimentos diferenciais, como aqueles que se manifestam na interface entre a alvenaria e as vigas estruturais em sistemas de construção rígidos.

Desta forma, esta pesquisa pode proporcionar contribuições significativas para a área de construção civil, otimizando práticas de projeto e manutenção de fachadas em uma perspectiva de construção sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

ASTM E 632. Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13528 (2019): Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13749 (2013): Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15575-1 (2021): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, Brasil.

Bauer, E., Castro, E. K., Silva, M. N. B. (2015). Estimate of the facades degradation with ceramic cladding: Study of Brasilia buildings. Cerâmica, 61, 151-159.

Bauer, E., De Souza, J.S., Piazzarollo, C.B. (2020). Application of the degradation measurement method in the study of facade service life. In Building Pathology, Durability and Service Life; Springer: Cham, Switzerland; pp. 105–119.

Bauer, E., Souza, A. L.R. (2022). Failure Patterns Associated with Facade Zones and Anomalies in the Initiation and Propagation of Degradation. Construction and Building Materials, v. 347, p. 128563

Castro, W., Souza, J., Gaspar, P., Silva, A. (2023). Mapping the Risk of Occurrence of Defects in Façades with Ceramic Claddings. Buildings, 13(5), 1209.

de Souza, A. L. R., Romeiro, T. R. D. L. M., Bauer, E. (2024). Influence of the Exposure Degree on the Degradation of Facades of Buildings in Brasília—Brazil. Buildings, 14(1), 133.

Feldfogel, S., Rabinovitch, O. (2021). Evolution and stability of tile detachment–Experiments and modeling. International Journal of Solids and Structures, v. 210, p. 145-161.

Ferreira, C. R. A. (2016). Análise de fissuras e trincas nas alvenarias de vedação: construção de casas em Minas Gerais. Especialização em Construção Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.

Ferreira, C., Silva, A., Brito, J. D., S. Dias, I., Flores-Colen, I. (2020). Maintenance modelling of ceramic claddings in pitched roofs based on the evaluation of their in situ degradation condition. Infrastructures, 5(9), 77.

Ferreira, C., Dias, I. S., Silva, A., de Brito, J., Flores-Colen, I. (2021). Criteria for selection of cladding systems based on their maintainability. Journal of Building Engineering, 39, 102260.

Flores-Colen, I. (2009). Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção preditiva. Tese de Doutoramento em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Flores-Colen, I., De Brito, J., Freitas, V., Hawreen, A. (2020). Reliability of in-situ diagnosis in external wall renders. Construction and Building Materials, v. 252, p. 119079.

Freitas, V. P., Vieira, M., Guimarães, A. S. (2013). The French, Norwegian and Danish experience. A State-of-the-Art Report on Building Pathology. CIB Publication 393. pp. 30-35.

Joffily, I. A. L., Oliveira, A. L. A. (2013). A ocorrência de eflorescência em locais impermeabilizados com mata asfáltica. 13° Simpósio Brasileiro de Impermeabilização. Brasil.

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., Auer, T. (2014). Façades: principles of construction. Birkhäuser.

Ribeiro, A., Mariot, H., Angioletto, E., Noni Junior, A. D. (2019). Fire exposure behavior of epoxy reinforced with jute fiber applied to ceramic tiles for a ventilated facade system. Materials Research, 22, e20180885.

Santos, M. J. B. O. (2017). Catalogação de patologias em fachadas de edifícios residenciais de Brasília. dissertação de mestrado em estruturas e construção civil, Publicação E.DM011A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 212p.

Silva, M. N. B. (2014). Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF. Tese de doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Silvestre, J. D., De Brito, J. (2011). Ceramic tiling in building facades: Inspection and pathological characterization using an expert system. Construction and Building Materials. v. 25, n. 4, pp. 1560-1571.

Souza, J. S. (2019). Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios. Tese de doutorado em estruturas e construção civil, Publicação E.DT-15A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. 139 p.

Souza, J., Silva, A., de Brito, J., Bauer, E. (2018). Application of a graphical method to predict the service life of adhesive ceramic external wall claddings in the city of Brasília, Brazil. Journal of Building Engineering, 19, 1-13.

Souza, J. S., Piazzarollo, C. B., Bauer, E. (2019). Aplicação do método de mensuração de degradação em revestimentos de fachadas. In: Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos. p. 1-6

Souza, J., Silva, A., De Brito, J.. Dias, J. L., Bauer, E. (2020). Evaluation of the deterioration of ceramic claddings by application of artificial neural networks. Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 34, n. 5, p. 04020084.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO EM FACHADAS – ESTUDO DE CASO

Laís Alves da Silva Pires[a]; Jéssica Siqueira de Souza [b]; Ana Silva [c]; Matheus Leoni Martins Nascimento [d]

[a] Universidade de Brasília (Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Brasil), enclaispires@gmail.com

[b] Universidade de Brasília (Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, Brasil), jessica.souza@unb.br

[c] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa (DECivil, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), ana.ferreira.silva@tecnico.ulisboa.pt

d ML Engenharia Diagnóstica, leoni.matheus@gmail.com

RESUMO

A aderência é a propriedade mais relevante ao desempenho estrutural dos sistemas de revestimento, sendo determinada pelo ensaio de resistência de aderência à tração (pul-off). A alta variabilidade dos resultados é considerada inerente ao ensaio, por isso muitos pesquisadores buscam encontrar os fatores que provocam esta variabilidade. A melhor interpretação dos resultados e a minimização da variabilidade tornam os ensaios mais credíveis. Neste cenário, este artigo apresenta um estudo de caso envolvendo 32 ensaios *pull-off* em um condomínio com 10 anos de idade, localizados no centro oeste do Brasil. Os ensaios são avaliados conforme determina a ABNT NBR 13749 (2013) e, de forma alternativa, é feita avaliação pela ferramenta estatística do intervalo de confiança. O coeficiente de variação médio encontrado é de 39% para os ensaios de aderência realizados em campo. Apenas 13% dos ensaios são considerados aprovados de acordo com o método de avaliação normativo, e pelo intervalo de confiança, o percentual de aprovação elevou para 47%. A avaliação normativa se mostra pouco flexível perante a alta variabilidade do ensaio, provocando uma taxa de reprovação elevada. A utilização do intervalo de confiança se mostra viável e mais flexível, além de possibilitar uma interpretação mais credível dos dados.

Palavras-chave: Argamassa, Fachada, Pull off.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os revestimentos de argamassa são os mais comuns, sendo utilizados tanto em áreas internas quanto em fachadas, principalmente no mercado de baixo custo, devido à sua acessibilidade e estética agradável (Silva *et al*., 2017; Torres *et al*., 2018). Dentre as caracteristicas que os revestimentos argamassados devem apresentar, Nogueira *et al.* (2018) enfatizam as seguintes: (i) resistência suficiente para garantir a coesão entre os componenetes da argamassa, (ii) aderência ao substrato, (ii) deformabilidade suficiente para dissipar as tensões por relaxamento e pelas deformações do substrato e (iv) comportamento adequado em termos de absorção de água.

Thamboo e Dhanasekar (2015) e Lima *et al.* (2023) afirmam que a aderência é a propriedade básica e de maior relevância dos revestimentos argamassados. A aderência é a propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato, portanto não é uma propriedade da argamassa, mas sim da interação entre as camadas do sistema de revestimento (ABNT NBR 13528-1, 2019). A EN 1015-12 (2016) define a resistência de aderência à tração como a máxima tensão aplicada por uma carga perpendicular a um revestimento de argamassa em um substrato. Esta é uma propriedade muito complexa, pois depende de vários fatores, tais como características e propriedades do substrato, características de argamassas, técnica de aplicação, condições climáticas e equipamento de medição (Ramos *et al*., 2012; Paes *et al*., 2014; Lashkari *et al*., 2021).

A falta de aderência origina situações de perigo para os usuários, uma vez que conduz a destacamentos que podem ser agravados pela ação dos agentes de degradação (Flores *et al.*, 2009). A falha na ligação adesiva tem consequências imediatas e, portanto, é uma preocupação comum para a indústria da construção e para os proprietários de edifícios (Ramos *et al*, 2012).

A aderência do revestimento pode ser quantificada por resistência com base na análise de tensão, que comumente é conhecido por resistência de aderência (Chen *et al.*, 2013). A norma europeia EN 1015-12 (2016) e a norma brasileira ABNT NBR 13528 (2019) são as principais normas que preconizam a avaliação da aderência, uma vez que o uso de revestimentos argamassados como vedação é abundante em países europeus e sul-americanos, tal como França, Portugal, Espanha, Alemanha e Brasil (Melo *et al.*, 2020; Vaz e Carasek, 2019).

A alta variabilidade dos resultados é uma das características intrínsecas deste ensaio (Ramos *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2009). Carasek *et al*. (2017) esclarecem que a alta variabilidade é compatível com o comportamento frágil dos materiais cerâmicos, pois estes são caracterizados pela alta dispersão dos resultados de ruptura e dependente da probabilidade da existência de defeitos que sejam capazes de iniciar fissuras. A variabilidade elevada gera dúvidas a respeito da confiabilidade dos resultados dos ensaios (Ramos *et al.*, 2012; Costa e Carasek, 2009).

No Brasil, o critério mínimo de resistência de aderência é estabelecido em 0,3MPa pela ABNT NBR 13749 (2013). A aprovação do revestimento não envolve o valor médio obtido com as amostras, mas da quantidade de valores individuais das rupturas que sejam superiores ao mínimo normativo. O revestimento é classificado como aprovado se a cada 12 amostras, oito forem iguais ou superiores a 0,3MPa.

Pesquisadores como Nakakura *et al.* (2009), Carasek *et al*. (2017) e Vaz e Carasek (2019) apontam a necessidade de revisão deste critério mínimo, pois são superdimensionados com as realidades de resultados de testes em laboratório e em campo. O estudo de Carasek *et al.* (2017) mostrou uma alta taxa de reprovação (88%) da resistência de aderência dos revestimentos argamassados de fachadas. Vaz e Carasek (2019), em uma ampla pesquisa de revisão, mostrou que 90% dos estudos não conseguiram atender ao critério normativo. Carasek *et al.* (2017) defendem a revisão destes critérios

com base na premissa de que a maioria dos revestimentos que foram reprovados nos ensaios de resistência de aderência à tração em seu estudo não apresentaram manifestações patológicas com o decorrer do tempo e se mostraram eficientes no desempenho de suas funções (proteção, estanqueidade, durabilidade, conforto aos usuários e adorno das edificações).

Ante o exposto, esta pesquisa apresenta um estudo de caso contemplando 32 ensaios de resistência a aderência à tração realizados em quatro edifícios em operação com dez anos de idade. Os ensaios são avaliados conforme a ABNT NBR 13749 (2013) e é realizada uma avaliação alternativa por intervalo de confiança. Esta forma de avaliação já foi proposta no estudo de Malagoni e Scartezini (2013) e de Ramos *et al.* (2012) mostrando que aplicação da estimativa do intervalo de confiança pode ser uma ferramenta útil para decidir sobre a confiabilidade dos resultados. O objetivo deste estudo é verificar a utilização de avaliação alternativa dos resultados de aderência à tração através de ferramentas estatísticas visando aumentar a confiança do investigador para tomada de decisão.

2 METODOLOGIA

2.1 ESTUDO DE CASO

Para esta pesquisa, foram realizados 32 ensaios distribuídos igualmente em quatro edifícios residenciais de um mesmo condomínio, localizado em Brasília, Brasil. Estes edifícios apresentam semelhanças, pois tem a mesma idade, tipologia construtiva e equipe executiva. Os edifícios têm 10 anos, possuem 23 pavimentos e as fachadas são de revestimentos argamassados com acabamento final em pintura.

O ensaio de resistência de aderência foi realizado nos edifícios conforme os procedimentos da ABNT NBR 13528-2 (2019). O método consiste na colagem de uma pastilha de 50 mm de diâmetro sobre uma seção de argamassa previamente cortada, isolando-a do restante do revestimento (Figura 1). O corpo de prova é então submetido a uma tensão de tração, através de um equipamento mecânico ou hidráulico, no qual mede a força necessária para proceder ao arrancamento do corpo de prova. A resistência é dada na relação entre a força registrada e a área da pastilha, correspondente à máxima tensão que é possível aplicar ao revestimento. Para cada determinação da resistência de aderência deve ser ensaiado 12 corpos de prova de mesmas características, dispostos aleatoriamente na área a ser testada.

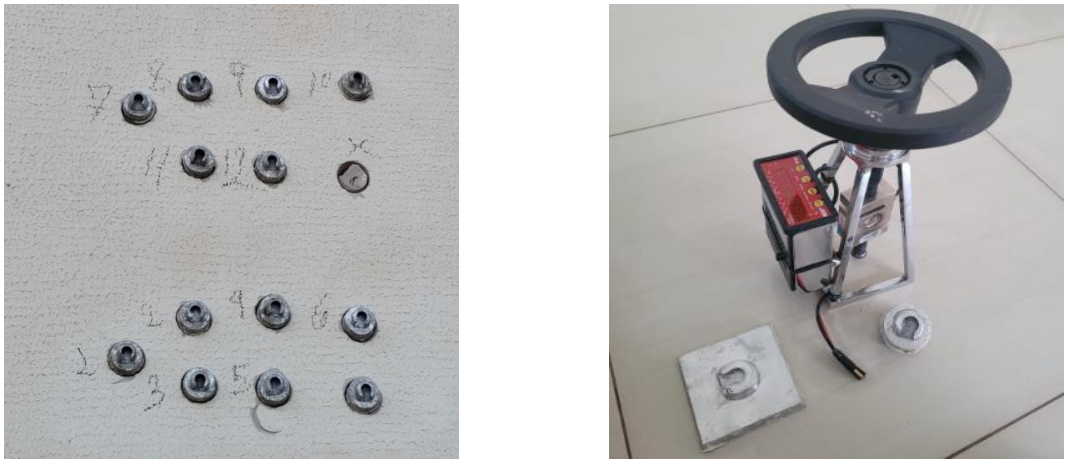


Figura 1 – Ensaio de aderência

2.2 AVALIAÇÃO PELO CRITÉRIO NORMATIVO

A aceitação do revestimento segue as diretrizes da ABNT NBR 13749 (2013). O revestimento externo é considerado aprovado se a cada grupo de 12 ensaios, pelo menos oito valores forem iguais ou superiores a 0,3MPa.

2.3 AVALIAÇÃO POR INTERVALO DE CONFIANÇA

A aplicação de estimativa do intervalo de confiança para média e variância pode ser uma ferramenta útil para decidir sobre a confiabilidade dos resultados (Ramos *et al.*, 2012; Malagoni e Scartezini, 2013). Assim, é aplicado de forma alternativa a análise estatística do intervalo de confiança para avaliar os resultados. Ao aplicar-se o conceito de intervalo de confiança para os resultados de resistência de aderência, avalia-se a confiança de que este intervalo contenha a resistência de aderência média da população, ou seja, a resistência real da aderência do revestimento (Ramos *et al*, 2012).

Para amostras com distribuição normal, o intervalo de confiança de amostras pequenas (n) é calculada a média (μ) e desvio padrão (σ) da amostra. Em seguida, determina-se a margem de erro (E) a partir equação 01. O *tc* corresponde ao valor crítico da distribuição T de *Student e* é determinado em função do grau de liberdade do conjunto e da confiança requerida. O intervalo de confiança (IC) é então determinado pela equação 02.

Eq. 01 $$E = tc.\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Eq. 02 $$IC = \mu +- E$$

Para a aplicação do intervalo de confiança pelo parâmetro da média, é verificado se os ensaios seguem uma distribuição gaussiana através do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS). O teste KS compara a distribuição acumulada empírica dos dados com a distribuição acumulada teórica de uma distribuição normal. Se a diferença entre essas distribuições for significativa, isso sugere que os dados podem não seguir uma distribuição normal.

Lopes *et al* (2013) afirmam que o teste K-S fornece o parâmetro *p*-value que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição Normal. Quanto menor for o valor-*p*, menor é a consistência entre os dados e a hipótese nula. Se valor-$p \leq \alpha$, rejeita-se H_0, ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição Normal. Caso contrário, a normalidade é possível para o conjunto de dados em questão. Neste estudo, é adotada uma confiança de 90%, ou uma significância (α) de 0,1. Os ensaios possuem 12 amostras (n), e para a signficancia adotada, o D limite tabelado é 0,338, ou seja, os ensaios cujo D crítico for menor que o D tabelado, indica que as amostras parecem apresentar distribuição normal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados individuais e a média de resistência de cada ensaio estão apresentados na Figura 2.

A maioria das amostras apresentam valores de resistência de aderência inferiores ao limite normativo e mais de 95% estão situadas entre a faixa de 0,1 MPa e 0,6MPa, como pode ser observado na Figura 2. Embora a maioria das amostras apresentem este comportamento, alguns ensaios apresentam comportamentos anomalos. Os ensaios 4, 5 e 23 apresentaram valores superiores a 0,6MPa. Nos ensaios 8 e 10 são verificados resultados de resistência de aderência iguais a 0. Em termos de aderência, não são esperados valores nulos, pois fisicamente significa a ausência de aderência. Uma

vez que este é um comportamento anómalo, pode-se afirmar que haja alguma inconformidade de execução e/ou de ensaio.

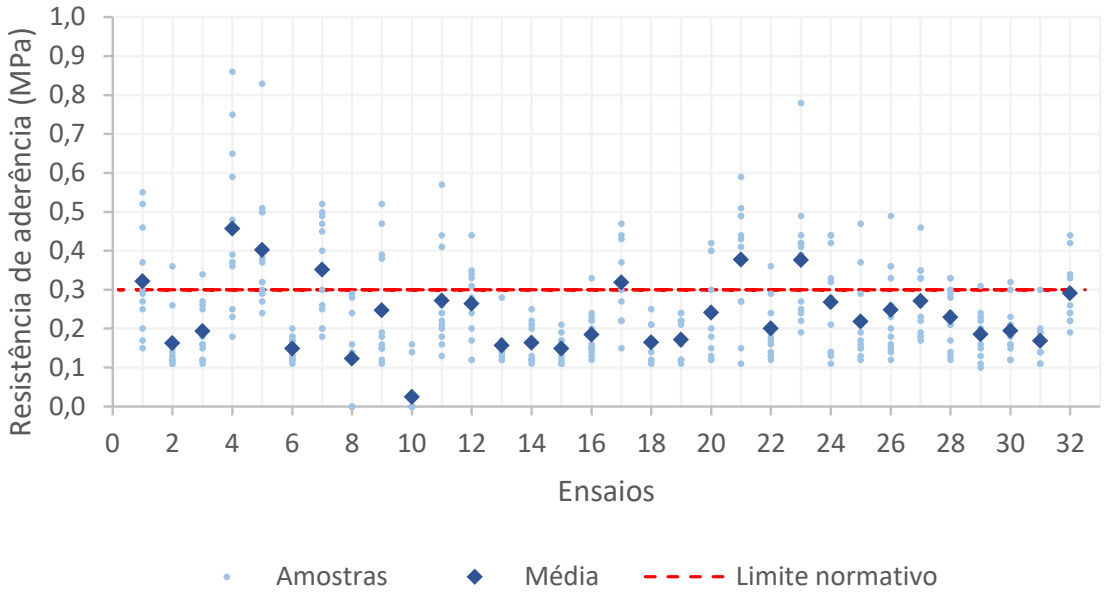


Figura 2 - Resistência de aderência por ensaio

Em relação à resistência média, as determinações encontradas estão na faixa entre 0,02 e 0,47 MPa, sendo verificado que sete ensaios apresentam a resistência média superior a 0,3 MPa. Todos os ensaios apresentam média superior a 0,1MPa, com exceção do ensaio 10 que possivelmente apresenta alguma inconformidade de execução e/ou de ensaio em relação a área escolhida para teste. Em termos de decisão, para este ensaio seria recomendada uma repetição.

O coeficiente de variação para cada ensaio está apresentado na Figura 3.

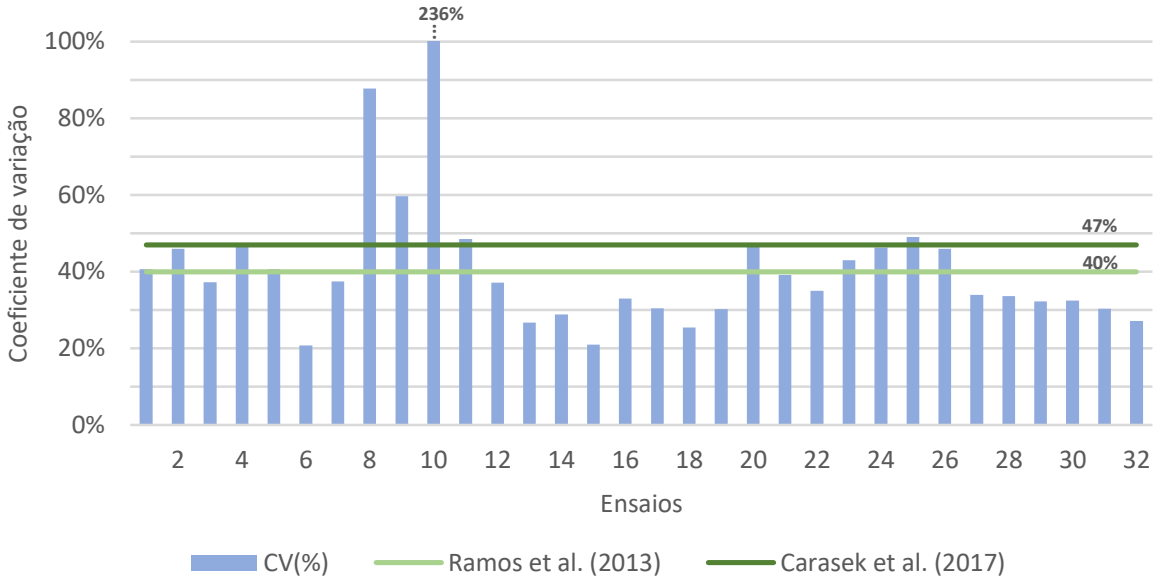


Figura 3 – Coeficiente de variação dos ensaios

Os ensaios apresentam coeficientes de variação de 21% a 236%. No entanto, o ensaio 10 que apresenta o coeficiente de variação de 236% é considerado como sendo espúrio, uma vez que além do coeficiente elevado, a resistência média é praticamente nula, não condizente com o comportamento físico. Dessa forma, os coeficientes de variação situam-se na faixa de 21% a 88%. Embora estatisticamente sejam considerados altos, este resultado é esperado para argamassas, uma vez são materiais frágeis, do ponto de vista da ciência dos materiais, cujas rupturas são altamente dependentes da quantidade de defeitos (Carasek *et al*, 2017). Além disso, são inúmeros os fatores que influenciam na aderência (Ramos *et al*., 2012; Dall Bello *et al.*, 2017; LashkarI *et al*., 2021). Retirando o espúrio, o coeficiente de variação médio encontrado é de 39% e é considerado aceitável para Ramos *et al.* (2012). Para estes pesquisadores, apesar de não existir consenso do limite aceitável para o coeficiente de variação, 40% é um típico valor baixo e aceitável para ensaios realizados em campo. Há concordância também no estudo de campo de Carasek *et al.* (2017), que encontrou um coeficiente de variação médio de 46%.

Segundo o método de aceitação da ABNT NBR 13749 (2013), apenas 13% dos ensaios foram considerados aprovados, ou seja, apenas as determinações 4, 5, 17 e 21 apresentam ao menos 8 ensaios iguais ou maiores que 0,3MPa. O percentual de aprovação é baixo, considerando que se tratam de edifícios relativamente novos. No entanto, é condizente com o percentual encontrado no estudo de Carasek *et al.* (2017) que obteve apenas 18% de aprovação.

A alta taxa de reprovação dos ensaios é preocupante e requer atenção do investigador no critério de decisão. A alta variabilidade dos resultados traz pouca confiabilidade para o tomador de decisão. Pela segurança, a decisão será aquela que abarque a condição mais crítica. Por outro lado, aumenta-se a probabilidade de avaliação para a condenação do revestimento com base apenas no critério de aprovação normativo. Nesta linha, Nakakura *et al.* (2009) e Carasek *et al.* (2017) defendem que a alta taxa de reprovação enfatiza a necessidade de se reavaliar os parâmetros estabelecidos pela norma vigente (ABNT NBR 13749, 2013), pois possivelmente exige valores mínimos altos.

Para o teste de normalidade K-S, utilizou-se o software estatístico R. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Teste de normalidade das amostras

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8
D crítico	0,14888	0,2933	0,17824	0,20562	0,22125	0,23454	0,1881	0,20645
p-value	0,9178	0,2532	0,8404	0,6907	0,5996	0,524	0,7895	0,6859
Ensaio	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
D crítico	0,31788	0,49866	0,28526	0,1075	0,30176	0,19519	0,18835	0,24206
p-value	0,1768	0,00512	0,2829	0,9991	0,2246	0,7505	0,7882	0,4829
Ensaio	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
D crítico	0,16324	0,20225	0,25475	0,17253	0,17001	0,19294	0,1816	0,18296
p-value	0,9065	0,7102	0,4174	0,8674	0,8786	0,7631	0,8236	0,8166
Ensaio	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**
D crítico	0,28116	0,16409	0,1716	0,16133	0,10147	0,1929	0,18384	0,15574
p-value	0,299	0,9031	0,8715	0,9136	0,9997	0,7633	0,8121	0,933

Para uma confiança de 90%, o teste apontou que todas as distribuições parecem normais, com exceção do ensaio 10. A distribuição normal dos resultados de resistência de aderência já foi verificada na pesquisa de Malagoni e Scartezini (2013) e Gonçalves (2005). É possível notar que há uma tendência de que os ensaios de aderência sigam uma distribuição gaussiana. Aquele no qual a normalidade foi rejeitada deve-se ao comportamento anômalo, tal como existência de diversos resultados nulos. A alta

variabilidade intrínseca do ensaio e o comportamento frágil influenciam nos resultados, pois estes também são altamente dependentes da existência de defeitos.

Uma vez tendo a normalidade verificada, a avaliação para aprovação do sistema de revestimento ensaiado é baseada no intervalo de confiança e o parâmetro mínimo normativo de 0,3MPa. O ensaio é considerado aprovado se (i) o critério mínimo estiver dentro do intervalo de confiança determinado ou (ii) o intervalo de confiança for superior ao critério mínimo. Se o intervalo de confiança é aquele que contem a média da população e o critério normativo mínimo está inserido dentro do intervalo, é possível dizer que a resistência média do revestimento equivale aproximadamente ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 13749 (2013). Devido à alta variabilidade inerente do ensaio, é adotado um intervalo de confiança de 90%, como realizado na pesquisa de Malagoni e Scartezini (2013). Os intervalos de confiança dos ensaios estão apresentados na Figura 4.

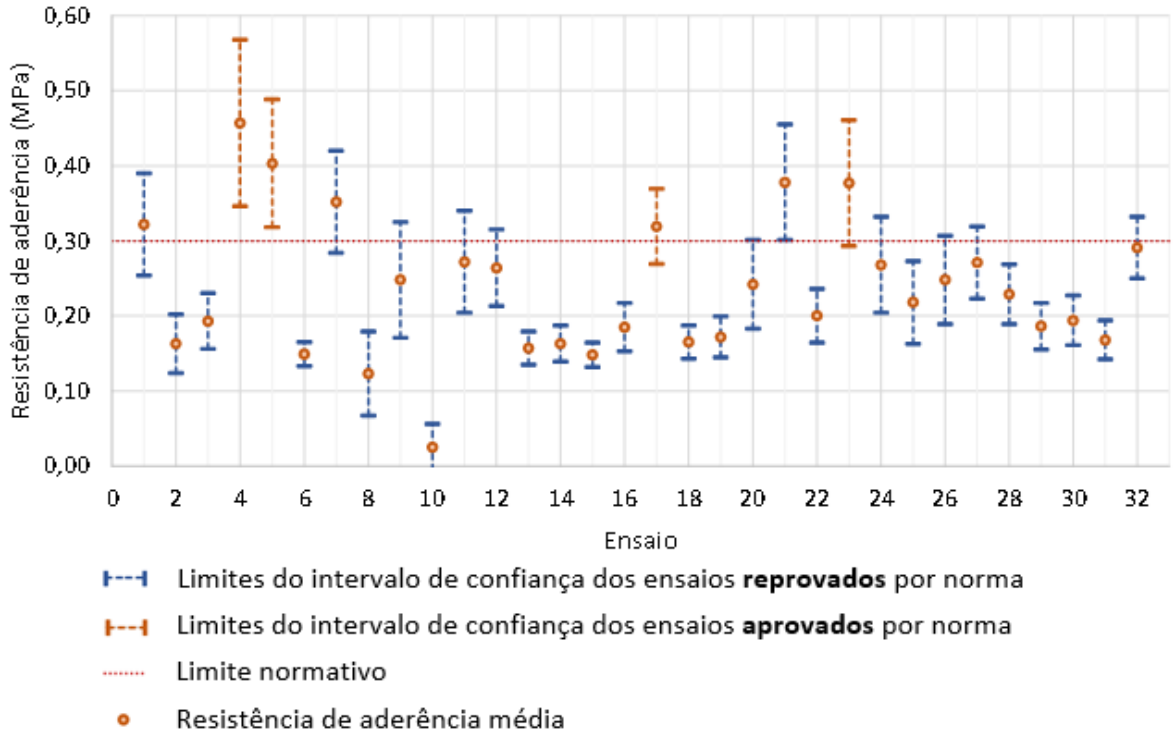


Figura 4 – Intervalo de confiança dos ensaios

Nota-se que os ensaios 4, 5, e 21 foram aprovados pelo parâmetro da norma e possuem o intervalo de confiança acima do mínimo normativo. Os ensaios 21 e 23 possuem o intervalo de confiança próximos, no entanto apenas do ensaio 21 foi aprovado pela norma. O intervalo de confiança do ensaio 7 é superior ao ensaio 17, porém apenas este último foi considerado aprovado pela norma. No ensaio 10, só é apresentado o limite superior do intervalo de confiança, pois o limite inferior é negativo. Não é possível fisicamente tal comportamento, evidenciando que este ensaio é um espúrio. Para tomada de decisão, é sugerido que este ensaio seja refeito.

Ao comparar estas duas formas de avalição da aderência do sistema de revestimento, verifica-se que a forma de avaliação normativa apresenta certa rigidez, uma vez que é unicamente baseada na verificação do atendimento do critério de 0,3MPa. Muitas vezes a média é considerada com parâmetro de avaliação para verificar ao atendimento mínimo normativo, entretanto este não deve ser o único parâmetro a ser considerado devido a elevada dispersão dos resultados de ensaio. A avaliação pela

análise do intervalo de confiança mostrou que há casos que pela avaliação estatística são similares (como exemplo os ensaios 21 e 23), porém não é detectada no método de aprovação padrão da norma. Além disso, existem ensaios que são considerados reprovados pela avaliação normativa, mas apresenta limite superior do intervalo de confiança superior ao critério normativo.

A avaliação pelo intervalo de confiança resulta em 15 (47%) dos ensaios aprovados e considerando apelas o critério da ABNT NBR 13479 (2013), apenas 4 (%) são considerados aprovados, ou seja, aproximadamente quatro vezes superior à quantidade aprovada apenas pelo critério normativo. Todos os ensaios considerados aprovados pela avaliação do intervalo de confiança apresentaram aproximadamente 0,2 MPa como limite inferior. A ABNT NBR 13749 (2013) determina 0,2MPa como critério mínimo para revestimentos argamassados internos, ou seja, 0,2 MPa ainda está dentro do que é aceitável e praticável na engenharia em termos de revestimento argamassado aderido para uso interno. Ressalta-se que o nível de confiança adotado equivale a 90%. Caso seja adotado um nível de confiança maior, é provável que os limites inferiores sejam superiores a 0,2MPa.

A avaliação dos resultados por intervalo de confiança se mostra viável e com maior flexibilidade quando comparados à norma. Ramos *et al* (2012) defendem que a adoção de limites para estimativas para intervalo de confiança possam ser úteis para o profissional decidir sobre a confiabilidade dos resultados. Com os resultados obtidos nesta pesquisa é possível afirmar que o valor de resistência igual a 0,2MPa pode ser um limite inferior aceitável para os ensaios de aderência avaliados pelo intervalo de confiança. Esta consideração permite maior segurança do investigador ao aplicar esta ferramenta para tomada de decisão. Entretanto cabe ainda ao investigador avaliar os resultados e a existência de alguma anormalidade no ensaio.

Embora a norma brasileira que preconiza o ensaio de aderência (ABNT NBR 13528, 2019) aborde sobre a forma de ruptura durante o ensaio de aderência a tração, o método de avaliação que é estabelecido pela ABNT NBR 13749 (2013) não aponta sobre a forma de ruptura. A falta de consideração quanto a forma de ruptura pode levar a interpretações equivocadas sobre a condição do sistema de revestimento. Gonçalves e Bauer (2005) e Silva *et al.* (2013) afirmam que os resultados obtidos para resistência de aderência à tração não devem ser analisados indiscriminadamente em relação ao tipo de ruptura ocorrido. A resistência de aderência é aquela que é apresentada pelas interfaces e não pelo sistema (Moura *et al.*, 2009). Quando a ruptura se dá nos materiais, os valores obtidos se referem à propriedade coesiva e não efetivamente da aderência (Campos *et al.*, 2015). Essa distinção das duas propriedades na análise dos resultados de resistência de aderência à tração é determinante, uma vez que a proposta do ensaio é avaliar a aderência do revestimento argamassado ao substrato, ou seja, da força de ligação entre as interfaces da argamassa e o substrato aplicado. Se os resultados se referem às propriedades coesivas, o problema observado não é sobre a aderência, mas sim de possível fragilidade da argamassa. Desta forma, é fundamental que haja uma revisão da forma de avaliação da norma para as resistências, especialmente considerando a forma de ruptura para o critério de aprovação do ensaio.

4 CONCLUSÕES

A avaliação do ensaio de resistência de aderência à tração é realizada nesta pesquisa através do requisito normativo e da ferramenta estatística intervalo de confiança. O intervalo de confiança é utilizado para a interpretação dos resultados devido a alta variabilidade inerente ao ensaio. Desta forma, a segurança do investigador na tomada de decisão é maior.

O coeficiente de variação médio para os ensaios de aderência realizados em campo foi de 39%. A maioria das resistências médias é inferior ao critério mínimo da ABNT NBR 13749 (2013), entretanto a

as médias são superiores a 0,1MPa. Apenas 13% dos ensaios são considerados aprovados de acordo com o método de avaliação normativo. Com a avaliação através do intervalo de confiança, o percentual de aprovação equivale a 47%.

Ao comparar as duas formas de análise, verifica-se que a forma de avaliação normativa é unicamente baseada na verificação do atendimento do critério de 0,3MPa. Apesar da resistência de aderência média não ser representativa devido a elevada dispersão dos resultados de ensaio, existem valores próximos ao critério mínimo e pela baixa flexibilidade da avaliação alguns resultados são considerados reprovados precocemente. A avaliação por intervalo de confiança apresentou resultados plausíveis e pode ser utilizado com uma ferramenta útil complementar para melhorar a avaliação dos resultados dos ensaios *pull-off*. Além disso, é possível considerar que 0,2MPa seja um limite inferior aceitável para os ensaios de aderência avaliados pelo intervalo de confiança. Este valor condiz com o estudo de Colen (2020) que apontou que 0,2MPa como um limite inferior para os resultados do ensaio de aderência. A ferramenta de avaliação apresentada pode ser utilizada de forma complementar na avaliação da aderência, assim proporcionando maior confiança do investigador na tomada de decisão. Além disso é importante ressaltar sobre a importância de na avaliação da aderência ser considerado a forma de ruptura, pois muitas vezes as rupturas não ocorrem na interface dos materiais e sim no material, o que indica propriedades coesivas do material e não adesiva do sistema. Quando não considerado a forma de ruptura, a interpretação dos resultados pode conduzir a decisões equivocadas e que não refletem a realidade da condição do sistema de revestimento.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13528-1 (2019). “Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração”. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT NBR 13749 (2013). “Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação”. Rio de Janeiro, Brasil.

Costa, E. B. C., & Carasek, H. (2009). Influência dos parâmetros de ensaio na determinação da resistência de aderência de revestimentos de argamassa. Ambiente Construído, 9(4), 17-35.

Dal Bello, A. C. (2017). Estudo comparativo da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa aplicados manualmente e com projeção mecânica contínua. XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo: SBTA.

Eur. Comm. Stand., EN 1015-12 (2016) “Methods of test for mortar for masonry - part 12: determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates”.

Flores-Colen, I., de Brito, J., & Branco, F. A. (2007). Avaliação in-situ da aderência de materiais de revestimento. In Montagem por APFAC. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa (Vol. 11).

Flores-Colen, I., de Brito, J., & Branco, F. (2009). Avaliação de adesão do revestimento materiais: técnicas experimentais. Journal of Building Appraisal, 2(2), 51-60.

Flores-Colen, I., de Brito, J., de Freitas, V. P., & Hawreen, A. (2020). Reliability of in-situ diagnosis in external wall renders. Construction and Building Materials, 252, 119079.

Lashkari, S., Yazdipanah, F., Shahri, M., & Sarker, P. (2021). Mechanical and durability assessment of cement-based and alkali-activated coating mortars in an aggressive marine environment. SN Applied Sciences, 3(6), 618.

Lima, N. B., Silva, D., Vilemen, P., Nascimento, H. C. B., Cruz, F., Santos, T. F. A., ... & Lima, N. B. D. (2023). A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates. Journal of Building Engineering, 65, 105643.

Lopes, M. D. M., Castelo Branco, V. T. F., & Soares, J. B. (2013). Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação.

Malagoni, M., & Scartezini, V. (2013). Análise dos resultados de resistência de aderência em revestimentos de argamassa.Trabalho de Conclusão de Curso, Goiânia: Universidade Federal de Goiás.

Melo, A. C., e Silva, A. C., Torres, S. M., Delgado, J. P. M. Q., & Azevedo, A. C. (2020). Influence of the contact area in the adherence of mortar–Ceramic tiles interface. Construction and Building Materials, 243, 118274.

Nakakura, E., MUNHOZ, F., & Battagin, A. (2008). Evolução da aderência em sistema de revestimento de argamassa. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8.

Paes, I. N., Bauer, E., Carasek, H., & Pavón, E. (2014). Influencia del transporte de agua en morteros de revestimiento, en la resistencia a la adherencia. Revista ingeniería de construcción, 29(2), 175-186

Ramos, N. M. M., Simões, M. L., Delgado, J. M. P. Q., & De Freitas, V. P. (2012). Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength. Construction and Building Materials, 31, 86-93.

Silva, A. C. M., Santos, C., Rosal, P., Correa, P., Silva, A. J. C. (2017). Análise em obra da resistência de aderência de revestimentos de argamassa preparadas com água e solução de cal sobre chapisco umedecido com água e solução de cal. XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo.

Thamboo, J. A., & Dhanasekar, M. (2015). Characterisation of thin layer Polymer cement mortared concrete masonry bond. Construction and Building Materials, 82, 71-80.

Torres, I., Veiga, R., & Freitas, V. (2018). Influence of substrate characteristics on behavior of applied mortar. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(10), 04018254

Vaz, F. H. B., & Carasek, H. (2019). Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. Cerâmica, 65(2019), 303-318.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO CONSTRUTIVA, ESTILÍSTICA E ICONOGRÁFICA DE UM MAUSOLÉU NEOGÓTICO DO CEMITÉRIO DE CONCHADA

Jorge Mascarenhas[a]; Maria de Lurdes Belgas[b]; Fernando G. Branco[c]

[a] Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal, jmascarenhas@ipt.pt

[b] Instituto Politécnico de Tomar, ISISE, ARISE, Tomar, Portugal, lbelgas@ipt.pt

[c] Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, fjbranco@dec.uc.pt

RESUMO

A profunda crença na Ressurreição pelos cristãos motivou os enterros em Portugal, desde a Idade Média, a serem realizados dentro ou junto a edifícios religiosos. Devido às práticas higiénicas precárias que facilitavam a propagação de epidemias, resultando no aumento da mortalidade da população, foi promulgada legislação em 1835 que proibia enterros em igrejas e dentro das localidades, dando origem aos primeiros cemitérios.

Em Coimbra, o processo definitivo de construção do cemitério da Conchada começou em 1856. Nas décadas de 70 e 80 do século XIX, foi construída uma grande parte dos monumentos mais interessantes deste cemitério, e foi durante esse período que surgiu uma clara especificidade da arte funerária de Coimbra. A tipologia do pequeno mausoléu em forma de capela constitui um dos aspetos mais específicos e interessantes da arquitetura funerária do cemitério da Conchada, neste período.

Como parte de um vasto estudo deste cemitério, selecionou-se a parte mais antiga do cemitério e submeteu-se a um levantamento fotogramétrico completo. Posteriormente, os mausoléus foram cuidadosamente identificados e datados, através de registos de sepulturas. Cada mausoléu tem vindo a ser estudado em profundidade, em termos de estilo arquitetónico, iconografia e processo de construção. O trabalho realizado até agora confirmou a presença de uma ampla variedade de estilos arquitetónicos, decorados com uma riqueza de elementos iconográficos complexos e diferentes formas construtivas.

Esta comunicação apresenta, a título de exemplo, o estudo de um mausoléu estreito em forma de capela, com uma arquitetura muito expressiva no estilo neogótico e uma rica iconografia de influência brasileira.

PALAVRAS-CHAVE

Arte funerária, cemitério, iconografia, mausoléu, neogótico, Conchada.

1 INTRODUÇÃO

Desde o século IV em todo o mundo cristão, a tradição do sepultamento dos corpos no interior das igrejas ou próximo delas, de acordo com o estatuto social do defunto, estava ligada à crença de que a proximidade do corpo com o espaço sagrado seria garantia da obtenção da proteção divina no momento da ressurreição final. Esta tradição perdurou por séculos, sendo que em Portugal chegou ao século XIX (Bessa, 2012). Neste período a morte não era vista como um fim, mas como um simples sono do qual se despertaria com a Ressurreição.

No final do século XVIII, em Paris, os locais de enterramento eram vistos como uma ameaça crescente para a saúde pública. A sobrepopulação provocava enterros inadequados, e o mau cheiro que emanava desses locais era visto como uma das principais causas de doenças. Na década de 1780, o governo francês reagiu emitindo uma série de novos regulamentos, incluindo, em 1786, a supressão dos sepultamentos nos cemitérios das igrejas e respetivos adros. Foi mandado erigir o cemitério de Mont-Louis, localizado a dois quilómetros da cidade de Paris, que foi inaugurado em 21 de maio de 1804, e rapidamente conhecido como o Cemitério do Père-Lachaise (Alexander, K., 2018).

Em Portugal, em finais do séc. XVII, devido à pressão demográfica e às questões higiénicas, num contexto ideológico Iluminista, que procurava também afrontar o enorme poder eclesiástico (Queiróz, 1999, surgiram as primeiras tentativas legislativas no sentido de acabar com os enterramentos no interior das igrejas e mesmo no interior das povoações (Almeida, 2019). A proibição do enterramento no interior das igrejas implicava a construção de novos recintos em terrenos das periferias das cidades, afastados da urbe, e levou a um confronto político-social que colocaria o governo e a Igreja em rota de colisão (Silva, 2023).

Devido à grande mortandade causada pela cólera em 1833-1835 e por razões de saúde pública e de higiene, em setembro de 1835, foi publicado um decreto que proibiu as inumações no interior dos templos. Os municípios foram forçados a criar locais próprios para o efeito - os cemitérios.

A evolução da mentalidade coletiva, no que diz respeito à questão cemiterial, delineava-se no confronto entre elites esclarecidas, que defendiam e reforçavam teoricamente esta alteração, e a aceitação popular. A população portuguesa, profundamente marcada por tradições de cariz fortemente religioso, considerou a medida ultrajante, não queria enterrar o seu povo fora das igrejas e, consequentemente, longe do sagrado, pois acreditavam que, enterrando os corpos em terrenos não sagrados, quebrava-se uma tradição secular e as almas se veriam impedidas de encontrar o caminho do céu. Sucederam-se inclusivamente violentas revoltas populares, iniciadas a norte mas que se alastraram a várias zonas do país, como a Revolta da Maria da Fonte, no concelho de Póvoa de Lanhoso.

Apesar de todos os tumultos e protestos, os cemitérios públicos em Portugal começaram a ser aceites e tornaram-se uma realidade em 1835, à semelhança do que já há vários anos acontecia em França (Queiróz e Rugg, 2003). No entanto só em 1855, devido a um novo surto de cólera, foi acelerado o processo de criação dos cemitérios por todo o país.

Nesta fase, a mentalidade e compreensão muda e a morte passa a ser vista mais como um fim. Contudo, não se separa da religião.

Para além de sua função primária, como locais de sepultamento dos mortos, os cemitérios são espaços dotados de significados intimamente ligados à sociedade que os criou, representando valores sociais e ideológicos. Os cemitérios oitocentistas possuem elevado valor patrimonial, devido ao património arquitetónico e à arte funerária ali existentes, mas também por serem espaços carregados de valores,

tradições, tensões, conflitos e modos de enraizamento que constituírem um conjunto de relações sociais, culturais, económicas e políticas (Kiss, 2010).

O cemitério da Conchada em Coimbra, construído em 1854 faz parte deste primeiro grupo de construção de cemitérios, sendo um admirável exemplo dos cemitérios oitocentistas em Portugal. Este cemitério distinguiu-se pelas individualidades que ali repousam, mas também se destacou no âmbito da arquitetura funerária pela quantidade, diversidade e originalidade dos jazidos ali presentes, considerados obras de arte da pedra e do ferro. Possui uma tipologia de caraterísticos jazigos estreitos (Mascarenhas *et al.*, 2022), de pedra de Ançã abundante na região (Sena e Pinto, 2022). Esses jazigos são representativos de vários estilos arquitetónicos, merecendo um estudo aprofundado no sentido da preservação e valorização deste importante património (Diogo, 2017; Carvalho, 2016)).

Nesse sentido, está em desenvolvimento um trabalho de investigação que pretende caraterizar o património aí existente, no que se refere à identificação do estilo arquitetónico, da iconografia, do processo construtivo e da relação entre o estilo arquitetónico e o processo construtivo (Mascarenhas *et al*., 2022). Como parte do referido trabalho de investigação, no presente artigo apresenta-se o estudo pormenorizado de um jazigo de estilo Neogótico, localizado no Cemitério da Conchada.

2 O CEMITÉRIO DA CONCHADA

Depois de bastantes hesitações sobre a escolha do terreno para o cemitério da cidade de Coimbra, a câmara adotou o alto da Conchada na quinta do Pio, na altura fora da cidade, por indicação de peritos nomeados em comissão pelo Governo Civil em 12 de agosto de 1851.

Os trabalhos da construção do Cemitério tiveram início em 1854, seguindo o traçado do médico e matemático Raymundo Venâncio Rodrigues (Loureiro, 1919) O traçado consistia num vasto hexágono com 11.750m^2, dividido por quatro sectores segundo uma cruz, cujos quadrantes eram por sua vez divididos em quatro leirões. O projeto previa a construção de 200 jazigos dispostos no perímetro dos leirões, no interior dos quais ficavam as sepulturas (Fig. 1), verificando-se uma clara hierarquização dos locais de enterramento.

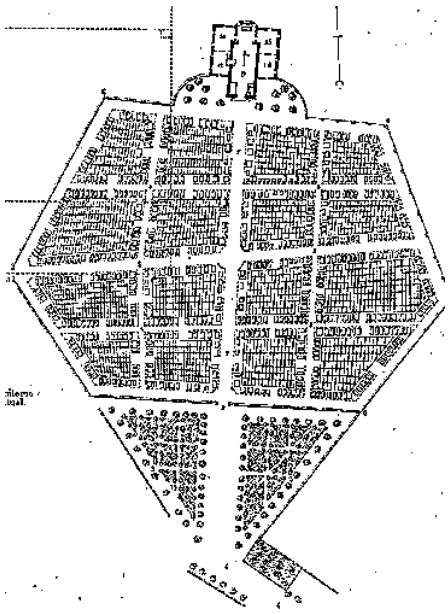


Figura 1 – Planta primitiva do Cemitério da Conchada (Simões, A.A.C, 1882).

O núcleo mais antigo do cemitério da Conchada, construído entre 1856 e 1918, possui um rico e expressivo conjunto de jazigos aéreos (mausoléus), tipo capela, quase todos construídos com pedra calcária da região - a pedra de Ançã que constitui uma clara especificidade na arte funerária coimbrã. (Queiróz, 2002). Nos novos cemitérios construídos houve a reprodução do sistema de hierarquização social existente nos espaços urbanos, onde as construções de destaque remetem às classes mais abastadas.

Os jazigos apresentam uma grande variedade e riqueza de estilos arquitetónicos, decorados com elementos iconográficos complexos, expostos através de cuidados trabalhos de cantaria e serralharia. A construção de jazigos neste cemitério foi maior, sobretudo no início do seculo XX, devido à proliferação de oficinas que trabalhavam o brando calcário da região.

O Cemitério da Conchada apesar de ter recebido influência do que se fazia nos cemitérios de Lisboa e do Porto, desenvolveu estéticas muito próprias, tanto na cantaria como nas serralharias (Queirós, 1999). É, por isso, considerado um dos mais importantes e interessantes cemitérios oitocentistas do país, cuja localização contribuiu também para a evolução urbana da cidade de Coimbra (Silva, 2012).

2.1 OS JAZIGOS ESTREITOS TIPO CAPELA

Na impossibilidade de sepultar os seus entes queridos no interior das igrejas, e inspiradas no cemitério pioneiro francês, Père-Lachaise (Pantano, 1998) por todo o país as famílias abastadas vão construir nos cemitérios estruturas em pedra, os jazigos, para aí depositar os seus familiares. Os jazigos apresentavam diversas tipologias como: capela, obelisco, templo, coluna, sarcófago, lápide, estatuária, ossário, pórtico, cruzeiro, mausoléu e *logia* (Fig. 2).

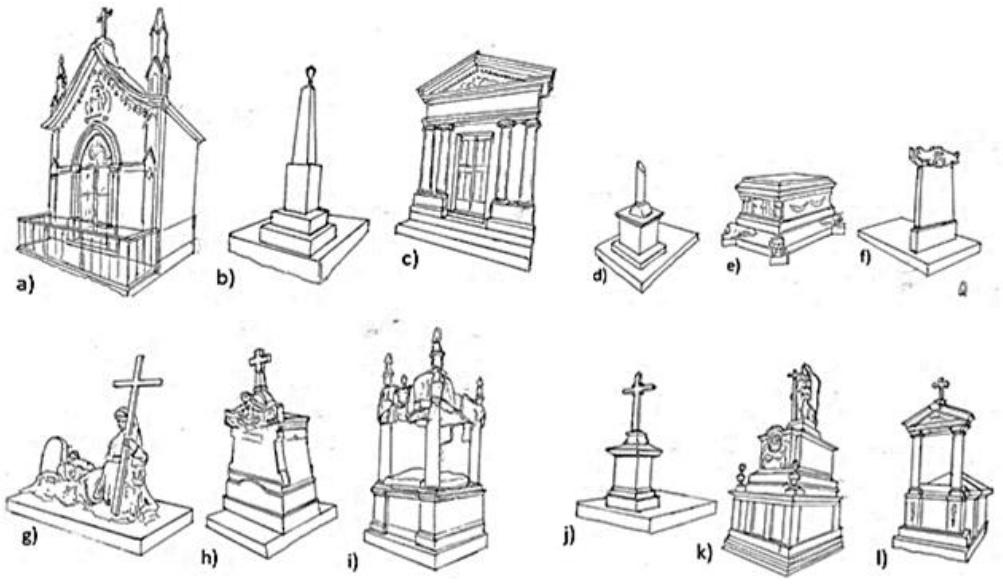
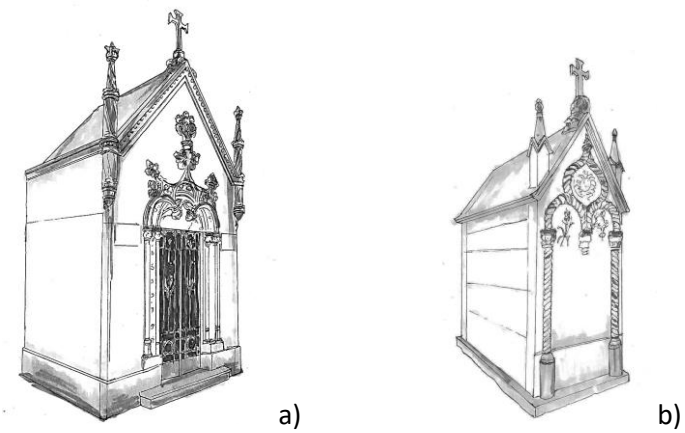


Figura 2 - Tipologias dos jazigos, a) Capela; b) Obelisco; c) Templo; d) Coluna; e) Sarcófago; f) Lápide; g) Jacente; h) Ossário i) Pórtico, j) Cruzeiro; k) Mausoléu; l) *Logia*.

A construção dos jazigos de capela era motivada, essencialmente, por várias razões: Religiosa - um jazigo construído sob forma de uma capela reforçava a crença do falecido na fé e na imortalidade da alma, o que parecia garantir um lugar no céu; Familiar - o jazigo seria uma "casa" para os mortos da família, constituindo num lugar de encontro com os falecidos - "os mortos param no cemitério"; Proteção - construído como um invólucro de pedra, o jazigo protegia o féretro das intempéries, resguardava a decomposição dos corpos, para além de evitar o enterro no submundo sombrio dos

mortos; Social - em termos sociais, através da diferenciação, procurava-se eternizar a recordação e a importância coletiva do falecido.

Conforme as suas possibilidades económicas, as famílias construíam, neste cemitério, dois tipos de jazigos capelas. Habitualmente em Portugal os jazigos do tipo capela, possuem um exíguo espaço de recolhimento no seu interior, onde os familiares podem ter alguma proximidade com os seus defuntos (Fig. 3a). No Cemitério da Conchada, a par de jazigos tradicionais, existem os "jazigos estreitos", mais modestos, sem possibilidade de permanência no seu interior. O exíguo espaço interior deste tipo de jazigos era completamente preenchido com prateleiras para acomodação dos caixões ou urnas (Fig. 3b), que eram introduzidos pelo portão de metal colocado na parte da frente, ou por pequenas portinholas existentes na parte posterior.



a) b)

Figura 3 – Jazigos Capela: a) Com espaço para acesso de visitantes no interior; b) Jazigo estreito sem possibilidade de acesso dos visitantes ao seu interior.

Os jazigos estreitos com a entrada pela frente são normalmente mais altos, podendo possuir um acesso condicionado pela parte posterior através de lajes de pedra removíveis, o que permite aproveitar a parte superior do jazigo. Os jazigos com acesso pelo tardoz são mais baixos, e a fachada principal, na zona onde estaria o portão de acesso, é preenchida com símbolos iconográficos. A entrada pelo tardoz tornava este tipo de jazigo mais económico, por não terem um portão em serralharia decorativa.

Os jazigos estreitos têm uma largura de apenas 1,2 a 1,5m e um comprimento de cerca de 2,5m. Jazigos com esta largura não são tão comuns nos cemitérios portugueses, especialmente os que têm entrada pelo tardoz, pelo que se julga se poderá tratar de uma forma de sepultamento regional. É de notar que estruturas funerárias com esta largura, nomeadamente com entradas traseiras, não são muito frequentes nos cemitérios portugueses. Os jazigos tipo capela têm um sistema construtivo único. Por razões higiénicas, eram totalmente construídos com placas de pedra interligadas por ferrolhos metálicos de latão. Foram quase todos construídos com pedra calcária da região - a pedra de Ançã (Fig. 4).

A pedra de Ançã é uma rocha sedimentar - um calcário micrítico, composto por uma matriz de grão muito fino homogéneo, de baixa dureza, de cor clara sem veios, conhecida pela sua boa trabalhabilidade (Sena, 2022). A homogeneidade, cor clara e a especial facilidade com que é possível esculpir esta rocha, bem como a sua abundância e qualidade, atraiu a Coimbra grandes escultores que ali produziram obras notáveis da estatuária religiosa e tumular portuguesa, promovendo uma clara especificidade na arte funerária coimbrã.

Como material para escultura, a Pedra de Ançã apresenta uma longa história de utilização em toda a região centro do país, tendo atingido o seu expoente máximo no século XVI com as escolas dos escultores João de Ruão e Nicolau Chanterenne.

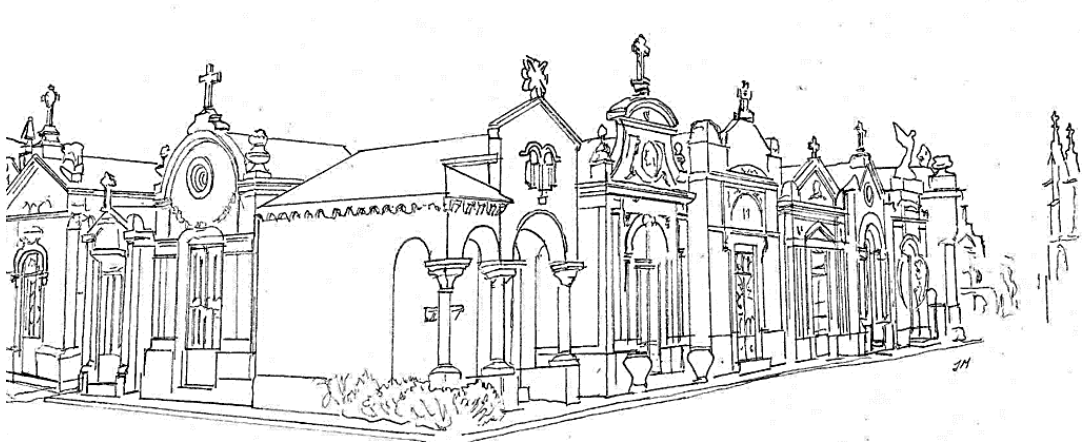


Figura 4 – Conjunto de jazigos estreitos do Cemitério da Conchada

2.2 ESTILOS ARQUITETÓNICOS DOS JAZIGOS

O auge da construção de mausoléus no país ocorreu nas décadas de 70 e 80 do século XIX. Este período é coincidente com o fim de dois conceitos importantes na arte do século XIX: o Romantismo, movimento caracterizado pela liberdade de criação, em que se valorizava o sentimentalismo, a fantasia e a nostalgia; e o período Vitoriano, em que se valorizavam os valores morais ou sentimentais (moral vitoriana) que acentuavam a expressão material dos sentimentos em relação à morte (Amadei, 2014; Marsden 2014). Foi também um período muito conturbado para a sociedade portuguesa em termos políticos, devido às constantes disputas entre monárquicos e republicanos. A materialização artística destes sentimentos e defesa de valores beneficiou do pleno desenvolvimento da máquina a vapor, que tornou mais fácil e acessível o trabalho com a pedra e o ferro.

A escolha dos estilos dos jazigos revelava, por vezes, as crenças políticas de uma família. Por exemplo, as famílias ligadas à nobreza preferiam o estilo neogótico, enquanto os maçons, por influência iluminista, preferiam o estilo neoclássico (palladiano). Após o Ultimato Inglês de 1890, o estilo neogótico é substituído por um gótico tardio mais português, o neomanuelino. Na viragem do século, como desafio à nobreza no poder, os republicanos mais convictos escolhem um estilo muito em voga na França Republicana, a Arte Nova.

Os estilos arquitetónicos são, portanto, excelentes marcadores socioculturais, assim como importantes marcadores cronológicos. No cemitério da Conchada foram identificados jazigos estreitos de vários estilos, nomeadamente: Neoegípcio, o Neorromânico, o Neogótico, o Neomanuelino, o Neoclássico, o Neobarroco, o Beaux-arts, a Arte Nova, a Arte Deco e ainda a Casa Portuguesa, representados na Figura 3, que coexistem de forma aleatória por todo o cemitério. Os diversos estilos arquitetónicos, que os jazigos exibem, estão bem identificados e são reconhecidos pelos símbolos artísticos e arquitetónicos, técnicas e materiais caraterísticos da época em que foram construídos (Fig. 5) (Berthel *et al*,.2020; Afonso, 2012).

Figura 5 - Exemplos de estilos arquitetónicos dos jazigos estreitos a) Neoegípcio; b) Neorromânico; c) Neogótico; d) Neomanuelino; e) Neoclássico; f) Neobarroco; g) Beaux-arts; h) Arte Nova; i) Arte Deco; j) Casa Portuguesa

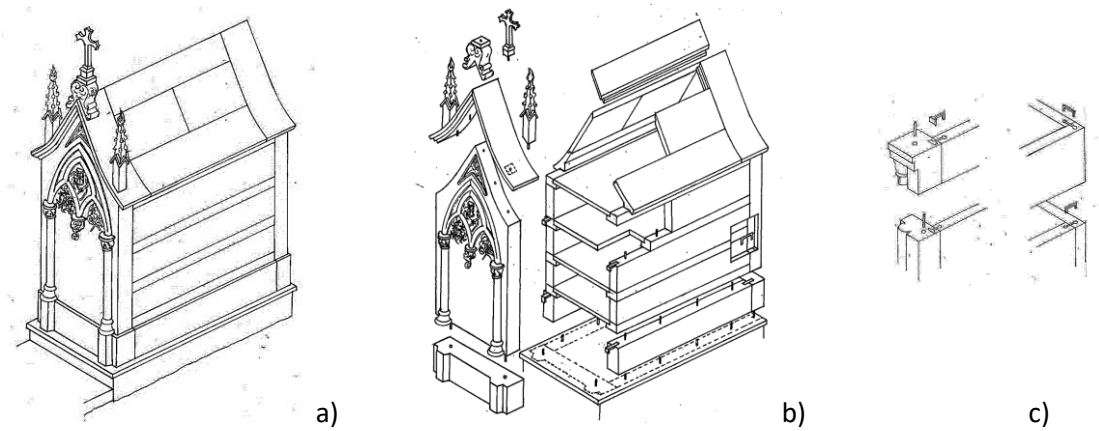
3 JAZIGO DE ESTILO NEOGÓTICO

O jazigo que seguidamente se carateriza situa-se no Leirão 10 e tem o número 40, enquadrando-se no estilo neogótico, que era o estilo normalmente escolhido por famílias nobres.

3.1 CARATERIZAÇÃO CONSTRUTIVA E ARQUITETÓNICA

Este jazigo, construído com blocos de pedra de Ançã, é caracterizado por possuir uma empena muito inclinada e um "pórtico" com vários arcos ogivais, bem como dois pináculos (Fig. 6a). O acesso ao interior é feito pelo tardoz e a frontaria é constituída por uma placa muito espessa de pedra, na qual foram esculpidos os arcos e as colunas, bem como diversos elementos decorativos. Para suportar as estantes colocadas no interior, foi concebido um engenhoso sistema de suporte de vigas laterais (Figure 6b). A ligação entre os blocos de pedra era feita através de ferrolhos de metálicos de latão, fixados com chumbo (Fig. 6c). Curiosamente, o gablete (pinhão) tem as suas partes inferiores laterais arredondadas, própria dos chalés românticos do século XIX (Fig. 7).

A composição arquitetónica foi estabelecida segundo dois quadrados, com o lado igual à raiz de cinco, e um retângulo. Um dos quadrados engloba as colunas com as respetivas bases e capiteis, enquanto o outro envolve as ogivas e os pináculos (Fig. 8). A altura do retângulo pequeno, onde se enquadram os plintos das colunas, foi estabelecida através do rebatimento da diagonal do quadrado.



a) b) c)

Figura 6. Jazigo Neogótico: a) Perspetiva; b) Sistema construtivo; c) Ligações

Figura 7 – Jazigo de estilos gótico

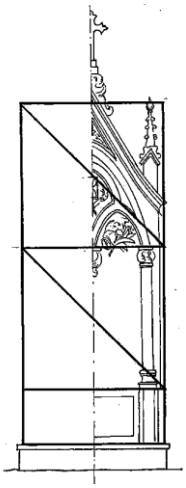


Figura 8 - Composição arquitetónica

3.2 DECORAÇÃO ICONOGRÁFICA

Na fachada, o arco trilobado contém três arcos de ogiva, constituindo uma referência à Trindade (Fig. 9). É encimado por um lírio estilizado, com a forma de uma flor de Liz, mostrando que se trata de um jazigo pertencente a uma família nobre (Fig.10).

O arco em ogiva mais elevado tem no seu interior três símbolos muito comuns nos jazigos portugueses: uma ampulheta com asas (Fig. 11): – que significa a inevitabilidade da passagem do tempo; uma gadanha - símbolo da morte e um facho (Xavier, 2001).

Figura 9 – Arco trilobado

Figura 10 – Flor de Liz

Figura 11 - Ampulheta

Normalmente os fachos surgem invertidos, significando com isso a morte. Neste caso específico, como o facho se encontra direito, pode atribuir-se o significado de ressurreição. As folhas de acanto dos capitéis, que nos acampamentos militares gregos indicavam o fiel depositário das armas, estão retorcidas e invertidas, indicando luto e pesar. Na ogiva do lado direito (Fig. 12), existem duas flores com as respetivas ramagens entrelaçadas: uma é a flor da saudade e outra a perpétua, o que revela uma "perpétua saudade" pelo falecido (Moody, 2020, Campos, 2018). Na ogiva do lado esquerdo (Fig. 13) encontra-se uma flor de passiflora (maracujá), rodeada por um ramo com folhas e gavinhas. A flor da passiflora é assim chamada, por possuir uma série de elementos morfológicos que se podem associar aos acontecimentos das últimas horas de Cristo (Chevalier e Gheerbrant 2018).

Figura 12 – Flores da saudade e perpétua

Figura 13 – Flor da passiflora

Foram os missionários europeus que, quando chegaram à América, se encantaram com a exuberância da flor, e associaram de imediato alguns dos seus elementos ao calvário de Cristo, atribuindo-lhe uma grande importância religiosa. A simbologia da flor da passiflora foi relacionada da seguinte forma: as dez pétalas representariam os dez apóstolos, com a exclusão de Judas, que traiu Jesus, e de Pedro, que O negou três vezes; os três estigmas correspondiam aos três cravos que prenderam Cristo na cruz; os cinco estames representavam as cinco chagas; as gavinhas eram os açoites usados para O martirizar; o formato da coroa floral, completamente cheia de filamentos, transformou-se na própria imagem da coroa de espinhos levada por Cristo, para o ato da crucificação; as folhas representariam a lança que transpassou seu corpo. Os tons de roxo que dão cor à flor simbolizam o sangue derramado por Jesus Cristo. A Figura 14 ilustra a simbologia da flor do maracujá (Azevedo, 2018). Sendo o maracujá uma fruta tipicamente brasileira, e como naquela época, alguns anos após a Independência do Brasil, muitos portugueses regressaram do Brasil - os designados "Brasileiros ricos", pode indiciar que este jazigo pertence a uma família retornada ou com interesses no Brasil (Motta, 2010).

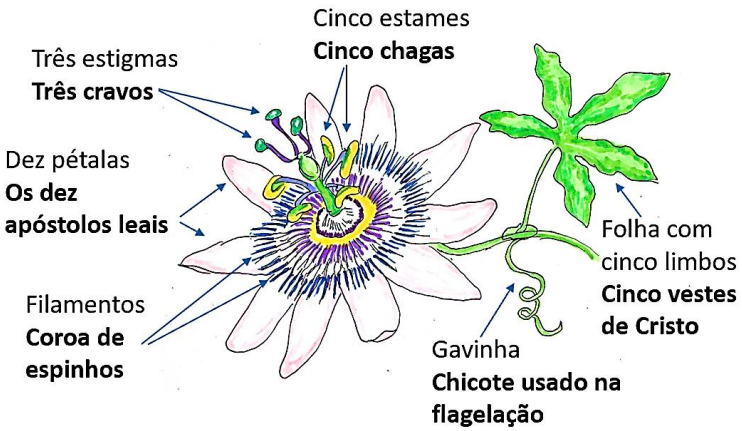


Figura 14 - Simbologia da flor da passiflora.

CONCLUSÕES

Devido ao crescimento demográfico, às elevadas taxas de mortalidade resultantes de epidemias e às preocupações com a higiene e a saúde pública, os enterramentos nas igrejas ou na sua proximidade foram proibidos em Portugal no início do século XIX. Tornou-se necessário criar espaços de enterramento fora das zonas urbanas, surgindo os primeiros cemitérios em Portugal.

O Cemitério da Conchada, cuja construção se iniciou em 1854, é um cemitério que ostenta uma relevante história da cidade de Coimbra, sendo importante referenciar e dar a conhecer a arte fúnebre coimbrã, muito peculiar, aí existente. São particularmente interessantes os jazigos estreitos.

Os cemitérios oitocentistas possuem elevado valor patrimonial, devido ao património arquitetónico e à arte funerária, mas também por serem espaços carregados de valores, tradições, sendo ainda reveladores, através dos estilos, símbolos arquitetónicos e decorativos dos túmulos, das características das respetivas épocas em que foram construídos.

O jazigo em estudo é um jazigo de capela estreito de estilo neogótico, que pertenceria a uma família nobre. Segue os padrões iconográficos em voga no final do século XIX, mas com influência do Brasil por possuir na sua decoração uma planta tropical - o maracujá.

Dada a importância do Cemitério da Conchada como referência de uma arte fúnebre muito própria, está a ser desenvolvido um amplo trabalho de investigação sobre os jazigos capela construídos em finais do século XX. Pretende estudar-se e dar a conhecer os estilos arquitetónicos presentes, a simbologia da iconografia com que estão ricamente decorados e associar o processo construtivo dos jazigos ao seu estilo arquitetónico.

Presentemente os cemitérios oitocentistas são autênticos museus ao ar livre, que se podem visitar para observar esculturas, manifestações de diferentes estilos arquitetónicos e história, dado que os cemitérios são testemunhos pétreos de eventos políticos, sociais e artísticos de outros tempos, sendo, portanto importante estudar e preservar este património fúnebre.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, sob a referência LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

Afonso, L. (2012). Imagens de aprendizagem e ensino na arte funerária gótica: a propósito de uma cena escolar no túmulo do rei D. Pedro I de Portugal. De Arte, 11:71-88. ISSN: 1696-0319

Alexander, K. (2018). Père-Lachaise in 1815: A New Method in the Study of Ephemeral Funerary. Monumental Troubles: Rethinking What Monuments Mean Today, p. 16-28), Midwest Art History Society and the Snite Museum of Art. DOI: 10.7274/r0-30e5-2840. https://www.researchgate.net/publication/339325711,

Almeida, M. (2019). As epidemias de cólera no Portugal Europeu (1833-1975). Atlas de História de Portugal. Uma perspectiva geopolítica, pp 232-233. https://www.researchgate.net/publication/357132259

Amadei, G. (2014). The Evolving Paradigm of the Victorian Cemeteries: Their emergence and contribution to London's urban growth since 1833. Doctor of Philosophy (PhD) thesis, University of Kent. Downloaded from https://kar.kent.ac.uk/47630/.

Azevedo, Michaele A. (2018) Histórico de passiflora L, com enfoque no subgénero decaloba (DC.) RCHB (Passifloraceae Senso Stricto) Diversidade e Gestão 2(1): 36-45. ISSN: 2527-0044 39

Barthel, G.A., Ramos, A.T., Castro, V.C. (2020). Estilos Arquitetónicos em Espaços Cemiteriais: Contribuição aos estudos da arqueologia. Revista Noctua – Arqueologia e Patrimônio, p107-141. https://doi.org/10.26892/noctua.v2i5.

Bessa, A., (2012). Memória e Saudade. Tese de Mestrado em História da Arte Portuguesa, Vol.I. Universidade do Porto.

Campos, F. P. (2028). A Simbologia Tumular do Século XIX - contributos para a sua interpretação. Revista CEPIHS (Centro de Estudos e Promoção da Investigação Histórica e Social: Trás-os-Montes e Alto Douro), Edições Húmus. Braga. 8: 227-242. ISSN 2182-0252

Carvalho, L. F. (2016). Os cemitérios artísticos como laboratórios de estudos MOUSEION, Canoas, 25:75-89. ISSN 1981-7207. http://dx.doi.org/10.18316/1981-7207.16.39

Chevalier, J., Gheerbrant, A. (2018). “Dicionário dos Símbolos”. ed. Teorema, Lisboa, Portugal.

Moody,D (2020). The Architecture of the Dead: Cemetery Symbolism in Colon Cemetery, Havana, Cuba. Journal of Global Initiatives: Policy, Pedagogy, Perspective Vol. 15, No. 1, 2020, pp. 27-62.

Diogo, A (2017). Reflexão sobre a valorização e gestão da morte enquanto património artístico, pertença e memória coletiva1 Revista MEMORIAMEDIA 2. Art. 4. 2017 ISSN 2183-3753.

Kiss, F. (2010). Cemetery and Heritage - The background of a case study. Proceedings of Heritage 2010, 2nd International Conference on Heritage and Sustainable Development. Green Lines Institute. ISBN:978-989-95671-3-9 pp. 733-735.

Loureiro, J.P., 1919. “Anais do Município de Coimbra, 1904–1919”, Revista de História da Arte 2, 289–300, ed.; Biblioteca Municipal de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Marsden, G. (2014). Victorian Values. ed. Routledge, London.

Mascarenhas, J.; Belgas, L.; Vinhas, E.; Branco, F.G. The Narrow Mausolea at Conchada Cemetery as Part of Portuguese and European Architectural Heritage. Heritage 2022, 5, 1852–1864. https://doi.org/10.3390/heritage5030096.

Motta, A. (2010) Estilos mortuários e modos de sociabilidade em cemitérios brasileiros oitocentistas, Horizontes Antropológicos, ano 16, n. 33, p. 55-80.

Pantano, N. (1998). Sculpture in the City and the Cemetery: The Formation of Political Identities in Paris and Père Lachaise 1804-1853. PhD Thesis, History of Art, University College of London.

Queiróz, F., Rugg, J. (2003). The development of cemeteries in Portugal c.1755 – c.1870, Mortality, 8(2):113-127. DOI: 10.1080/1357627031000087370

Queiróz, J. (1999). A influência dos cemitérios de Lisboa na arte funerária oitocentista em Portugal. Olisipo. Boletim do Grupo “Amigos de Lisboa”, II Série 11:88- 97.

Queiróz, J. (2002). Os Cemitérios do Porto e a arte funerária oitocentista em Portugal. Consolidação da vivência romântica na perpetuação da memória. Tese de Doutoramento em História da Arte, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto. Porto, 2002.

Sena, B., Pinto, A. (2022), Rochas carbonatadas, recurso mineral histórico Rev. Ciência Elem., V10(01):015. doi.org/10.24927/rce2022.015

Silva, M. F. (2023). Pensar a Necrópole: a Arquitetura como catalisador do Ritual Funerário. Tese de Mestrado em Arquitetura; Cidade e Território. Universidade do Porto, Porto.

Silva, R. (2012), Evolução Identitária de Um Lugar – A Conchada de Coimbra, Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura, Departamento de Arquitectura da FCTUC, Coimbra 2012, p.68

Simões, A.C, 1882. Dos Hospitaes da Universidade de Coimbra. Coimbra. Imprensa da Universida de Coimbra. Coimbra. Imprensa da Universidade, pg. 112-113, 119-122.

Xavier, P. (2001). A morte, símbolos e alegorias, ed. Livros Horizonte.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS PARA SIMPLIFICAR E SISTEMATIZAR A REABILITAÇÃO DE COBERTURAS TRADICIONAIS DE MADEIRA COM TELHA CERÂMICA

Yasmin Soares Ribeiro[a], J. Mendes da Silva[b]

[a]Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, yasmin07soares@gmail.com

[b]Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, CERIS – Pólo de Coimbra, Portugal, raimundo@dec.uc.pt

RESUMO

A sustentabilidade é fundamental nas políticas de desenvolvimento, suas abordagens vão desde a eficiência energética à promoção do bem-estar e preservação do património. A construção civil, por sua contribuição nas emissões, é alvo de iniciativas voltadas a reduzir impactos negativos.

Tão crucial quanto implementar novos materiais de menor impacto é promover a longevidade do construído. Sua preservação, tendo como preocupações o ciclo de vida e respeito pelo património, é fundamental para uma abordagem sustentável. O estudo foca na reabilitação de coberturas, estas que, além de constituírem a mais importante camada de proteção do edifício, representam a imagem da cidade e, caso estejam ameaçadas, também o edifício se torna vulnerável. Tal condição inviabiliza a preservação do património, tornando-se ameaça à sustentabilidade da reabilitação.

É notório uma menor preocupação em relação às coberturas no âmbito das reabilitações, resultando na carência de parametrização e instrumentos auxiliares abrangentes para sua realização. Há necessidade de um sistema de apoio, que cubra a temática do início ao fim, com impacto no tempo de trabalho e nos resultados.

Propõe-se a criação de uma estratégia para o desenvolvimento das ações de reabilitação de coberturas, fornecendo uma ferramenta que auxilie os profissionais a realizarem um trabalho focado e completo.

Palavras-chave: Telhados, Coberturas Tradicionais, Reabilitação de edifícios, Inspeção e diagnóstico

1 INTRODUÇÃO

Apesar de haver uma tendência a mudar a situação atual, as reabilitações ainda assumem um papel pouco relevante face à construção nova em Portugal. Dados dos Censos 2021 indicam um parque habitacional de construções antigas em que o número de edifícios que necessitam de intervenção superam os que não necessitam, enfatizando a urgente necessidade de intervenção para a preservação dos mesmos.

Para que uma reabilitação atinja a qualidade esperada, é necessário que se conheça o edifício no qual se está a trabalhar. Para além do conhecimento das técnicas construtivas e materiais adotados, é importante ter em conta toda a documentação histórica e patrimonial, para que as soluções adotadas na etapa de projeto sejam compatíveis e valorizem a pré-existência. Reabilitações que apresentam problemas, seja na fase de projeto ou de execução, vão repercutir-se não só no funcionamento do edifício como ocasionar novas patologias e consequentemente mais intervenções.

Em se tratando das coberturas dos edifícios, os problemas relativos a má qualidade das reabilitações se tornam mais prejudiciais, uma vez que estamos a tratar da mais importante camada de proteção do edificado. Alem disso pelo fato de serem um elemento construído que é “invisível” aos olhos, muitas vezes são subvalorizadas no momento da reabilitação do edifício

Apesar da diversidade de modelos e técnicas construtivas de coberturas na atualidade, o estudo vai focar-se nas coberturas que podem ser consideradas as mais tradicionais em Portugal: as coberturas inclinadas com estrutura de madeira e revestimento cerâmico, conforme indicado na figura 1.

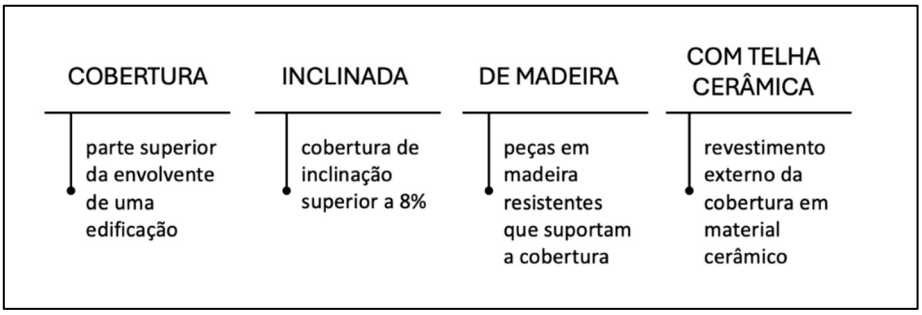


Figura 1 - Tipo de cobertura foco do estudo

Em todo processo operacional é importante que se tenham critérios e parâmetros a serem seguidos a fim de que se tenha um resultado de qualidade. Com as reabilitações de coberturas não é diferente: em se tratando de projeto, a falta de parametrização e instrumentos auxiliares também dificulta que se tenha uma reabilitação final satisfatória. Uma possível explicação para essa carência é o fato de as coberturas inclinadas revestidas em telhas cerâmicas serem oriundas de técnicas tradicionais e muitas vezes populares, o que de certa forma dispensa (ou dispensou) o estudo aprofundado e a sistematização. Apesar de não existir tal suporte para a reabilitação de coberturas, é sabido o ganho que se tem quando as reabilitações são feitas com alguma forma de sistematização e com qualidade.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo impactar na qualidade das reabilitações de coberturas tradicionais de estrutura de madeira e revestimento cerâmico, apoiando o corpo técnico através da criação de uma parametrização direcionada às coberturas, impactando diretamente no tempo de trabalho e no resultado da reabilitação.

2 CARACTERISTICAS E PATOLOGIAS DE COBERTURAS CERÂMICAS

As coberturas inclinadas eram dominantes no território português até meados do século XX em todos os tipos de edifícios. Apesar de hoje haver um crescimento do uso de outros tipos de cobertura, nomeadamente coberturas planas, as coberturas inclinadas ainda são marcantes na imagem da cidade antiga e, mesmo noutras zonas, ainda é grande o número de construções que as utilizam, sobretudo em construções de pequeno e médio porte (Figura 2).

As coberturas inclinadas podem variar das mais simples estruturas até complexos sistemas de peças. As mais simples se baseiam em técnicas tradicionais da arquitetura e construção e não exigem o emprego de alta tecnologia; aliado a isso, são soluções de fácil manutenção e baixo custo e – não por coincidência – sofrem frequentemente com as patologias associadas à sua conceção e execução.

Apesar das coberturas cerâmicas possuírem diversas possibilidades de formas e composições é possível organizá-las de forma a se ter famílias e grupos tipificados dos elementos mais correntes nas coberturas. Esse estudo da caracterização da cobertura é fundamental para a compreensão das técnicas construtivas e influencia em todo o processo de projeto de reabilitação da mesma.

Outro fator importante a se ter em conta quando se trata de reabilitação de coberturas é o estudo das anomalias mais correntes nesse tipo de construção. Esse conhecimento é essencial para a promoção de construções mais seguras e duráveis. O aprofundamento deste tópico melhor nos prepara para enfrentar os desafios e garantir uma máxima eficiência das coberturas seja em novos projetos ou reabilitações de coberturas. Na figura 3 estão representadas algumas características e patologias comumente encontradas em coberturas tradicionais.

Figura 2 – Exemplo da imagem da cidade marcada pelas coberturas de telha cerâmicas tradicionais (Vila do Corvo e Viseu)

[#01]

Telhados são frequentemente o início de ruínas em edifício, uma vez que representa a primeira camada de proteção

[#02]

A vegetação parasitária pode acarretar ou potencializar patologias nas coberturas e podem ser eliminadas com atos de manutenção periódica.

[#03]

O uso comum e excessivo de argamassa para fixação das telhas alem de causar uma sobrecarga na cobertura ainda dificulta a microventilação necessária.

[#04]

Os remates em pontos singulares quando executados de forma incorreta e com ligações rígidas não são duráveis e podem acarretar novas reabilitações no futuro.

[#05]
Muitas coberturas apresentam patologias por suas próprias geometrias serem complexas e muitas vezes inadequadas.

Figura 3- Imagens comentadas de telhados tradicionais

3 PROGRAMA DE AUXÍLIO AO PROJETO DE REABILITAÇÃO DE COBERTURAS

3.1 ENQUADRAMENTO

Como visto, há uma carência de recursos de suporte ao projeto de reabilitação, principalmente quando se trata das coberturas. Dessa forma o estudo tem como objetivo a criação de uma ferramenta de apoio expedita que possa auxiliar em todas as fases do processo de reabilitação de coberturas, buscando ganhos relacionados a qualidade dentre outros, nomeadamente:

- Respeito ao bem patrimonial
- Aumento da vida útil do edifício
- Agilidade nos processos
- Documentação organizada

Por meio da tipificação e agrupamento das coberturas tradicionais, é possível organizar de maneira sistemática as tipologias existentes, identificando as suas principais características construtivas. Essa abordagem semiautomática contribui para a análise das principais patologias presentes. Após a geração da ficha de caracterização e patologia, a estratégia propõe oferecer sugestões específicas de reabilitação para a cobertura em questão.

A metodologia aplicada se baseia em uma pesquisa-ação, onde se busca, como resultado de pesquisas relacionadas à temática, contribuir para minimizar um problema existente, nomeadamente a falta de parametrização das reabilitações de coberturas.

3.1.1 Sistema operacional da ferramenta

A ferramenta de apoio ao projeto de reabilitação foi concebida para que o usuário a utilize do início ao fim do processo. Para que isso seja possível foi preciso delinear todo o trajeto que o processo percorre. A partir do conhecimento desse fluxo, foi possível uma clarificação do que seriam os quatro eixos principais, representados na figura 4.

Devido a sua capacidade de programação, sua interface manejável e fácil acesso e utilização pelo usuário, o software Microsoft Excel (com Visual Basic) foi o suporte escolhido.

3.1.2 As fases do procedimento

Fase 1 - Caracterização da cobertura

Apesar das coberturas cerâmicas possuírem diversas possibilidades de formas e composições é possível organizá-las de maneira a se ter famílias e grupos tipificados dos elementos mais correntes nas coberturas, como acima se referiu.

A fim de que a aplicação informática atingisse o maior número de possibilidades de características construtivas de uma cobertura, foi feita uma lista exaustiva, adotando quatro abordagens:

- Listagem das características a partir de literatura;
- Listagem das características a partir da observação pessoal de coberturas;
- Listagem das características a partir da análise fotográfica de coberturas;
- Listagem de características a partir do estudo de alguma cobertura.

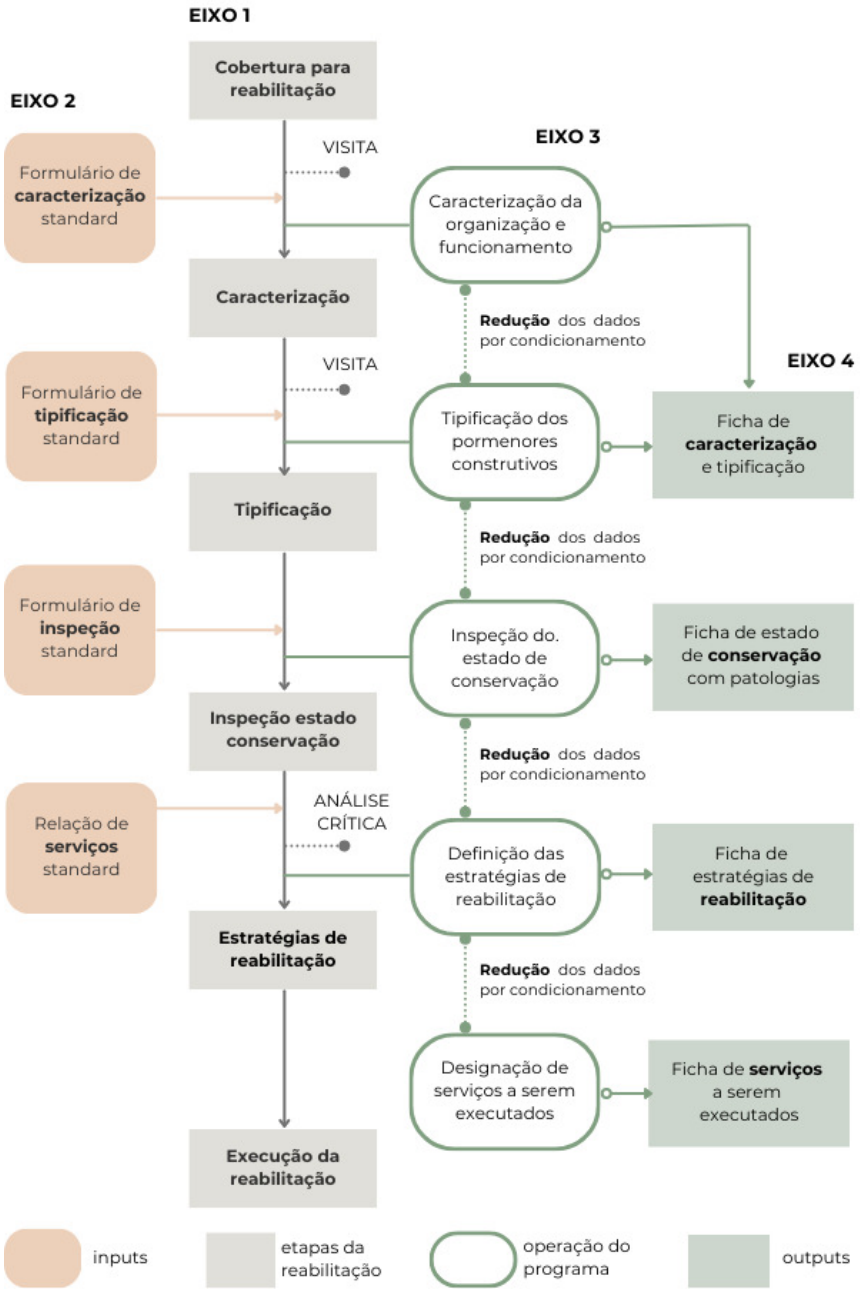


Figura 4 - Fluxograma da reabilitação de coberturas

No final obteve-se um conjunto de cerca de 270 diferentes possibilidades de características para uma cobertura; tais opções são ofertadas ao usuário em formato de uma lista em que o usuário assinala as opções que lhe são pertinentes a partir da observação da cobertura em estudo (Quadro 1).

Algumas perguntas são relacionadas diretamente com outras e a depender da resposta anterior, podendo não ser necessário seu preenchimento. O próprio programa indica, por meio de cores, se a pergunta deve ser respondida ou não. Dessa maneira, reduz-se a possibilidade do usuário se esquecer de observar determinadas características da cobertura, minimizando a possibilidade de um erro de projeto proveniente de uma inspeção realizada de maneira menos assertiva.

Quadro 1 – Fragmento da folha de caracterização

01 - PREENCHIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DA COBERTURA

Regras de preenchimento para cada cor de células

Digite aqui	Responda em formato de texto curto
✓	Assinale apenas uma opção de resposta
✓	Assinale todas as opções necessárias

PREENCHER SOMENTE CÉLULAS VERDES

CARACTERÍSTICAS		RESPOSTAS
Empresa responsável		*Digite aqui*
Nome do edifício		*Digite aqui*
Endereço do edifício		*Digite aqui*
Uso do edifício	Residencial unifamiliar	
	Residencial multifamiliar	
	Comercial	
	Institucional	
Presença de blocos autonomos	Com blocos autônomos	
	Sem blocos autônomos	
Número de blocos autônomos	1 bloco	
	2 blocos	
	3 blocos	
	4 blocos	
	>4 blocos	

Fase 2 - Listagem das anomalias observadas na cobertura

O estudo das anomalias nas coberturas cerâmicas é essencial para a promoção de construções mais seguras e duráveis. As anomalias nas coberturas podem comprometer a funcionalidade, a aparência e a segurança dos usuários e podem ser oriundas de diversos fatores e em vários momentos, desde o projeto até a utilização, como por exemplo: erros na conceção, execução realizada de forma equivocada, uso incorreto e adaptações equivocadas da parte do usuário, desgaste por ação do tempo, falta de manutenção periódica, reabilitações anteriores equivocadas

Tal como foi feito na caracterização, a partir de literatura, observações de coberturas e conhecimento de projetos reais de reabilitação, foi possível listar as anomalias mais correntes nas coberturas cerâmicas, que foram divididas em seis categorias, nomeadamente: geral, estrutura, complementos, revestimento, ligações e drenagem.

A fim de agilizar e semi automatizar o processo, no momento da seleção das anomalias observadas na cobertura em estudo por parte do usuário, o programa faz uma sugestão de eliminação de anomalias que são menos possíveis de estarem presentes na cobertura. Isso é possível a partir do pré cruzamento das possibilidades de características da cobertura com a lista de possíveis defeitos frequentes. Ou seja, cada possível anomalia foi analisada e classificada pela sua possibilidade de ser eliminável no momento da caracterização. Ao realizar esse cruzamento é possível reduzir o número de possibilidades para o usuário, deixando a tarefa mais ágil. Tomemos como exemplo uma situação hipotética (caso A):

Caso A

O usuário preenche no momento da caracterização que sua cobertura não possui estrutura primária, ou seja, possivelmente é um telhado de pequenas dimensões que só possui a estrutura secundária.

Tendo essa informação, o programa, no momento de sugerir a lista de possíveis anomalias da cobertura, não irá destacar anomalias relacionadas diretamente com a estrutura primária.

Apesar da comodidade de ser um programa dinâmico, é sempre importante frisar a necessidade de constante análise crítica por parte do usuário. Dessa forma, mesmo as anomalias podendo ser eliminadas a partir da caracterização, elas permanecem listadas em tom menos destacado, permitindo que o usuário tome conhecimento e até mesmo opte por escolhê-la. O intuito desta fase é que o usuário assinale com um "x" as anomalias que condizem com as observadas por ele. Ao final da lista é possível que o usuário insira eventuais defeitos observados que não constem na lista inicial.

No momento que o usuário assinala a anomalia, é destacado a frente a ação de reabilitação proposta como solução para aquela patologia. Além do contributo da literatura específica, foram utilizados como fonte de pesquisa casos reais de reabilitação de coberturas. Ao final dessa etapa, para cada anomalia foi atribuída uma ação, conforme exemplo no Quadro 2

Quadro 2 - Exemplo de preenchimento de anomalias

02 - PREENCHIMENTO DAS ANOMALIAS
Regras de preenchimento

✓ Assinale no campo verde as anomalias que você observou na

ASSINALAR SOMENTE NAS CÉLULAS VERDES

DICAS E ESCLARECIMENTOS

1. O "**X**" em vermelho significa que a marcação está incoerente com as informações dadas na cacterização
2. Para desmarcar uma seleção basta clicar 'delete' do teclado

ANOMALIAS	RESPOSTAS	AÇÕES DE REABILITAÇÃO PROPOSTAS
[BA001] Geometria muito complexa exigindo cuidados especiais		
[BA002] Geometria inadequada (por exemplo agua empenada)	✓	[BB002] Levantamento da telha e a sua reposição, após a introdução de complemento de estanquidade sobre o suporte. Verificar necessidade de revisão da geometria e reformulação pontual da estrutura secundária
[BA003] Geometria inadequada (em um ponto específico)	✓	[BB003] Intervenção localizada - levantamento da telha e a sua reposição, após a introdução de complem. de estanquidade sobre suporte. Se necessário revisar a geometria e a reformulação pontual da estrutura secundária
[BA004] Geometria inadequada (águas com inclinações diferentes)		
[BA005] Inclinação excessiva da cobertura		
[BA006] Inclinação insuficiente da cobertura	✓	[BB006] Introduzir reforço de estanquidade, nomadamente uma membrana de complemento de estanquidade permeável ao vapor de água ou sub telha sem amianto. Em casos mais graves, corrigir a inclinação da cobertura

Fase 3 - Serviços de reabilitação

Por norma apesar de ações de reabilitação serem pensadas em sua integridade, faz-se necessário em um pensamento executivo, que se desmembre tais ações em serviços de obra. Tal desmembramento possibilitou compreender que diferentes estratégias de reparação para diferentes anomalias podem possuir o mesmo serviço, quando este é pensado de forma isolada. O objetivo final é que se tenha a lista de serviços já cruzada com todas as estratégias de reabilitação possíveis para a cobertura.

Mais uma vez, incentivando o pensamento critico do usuário, apesar de estarem destacados os serviços sugeridos, ele pode selecionar ou até mesmo desselecionar as atividades quando julgar necessário. O quadro 3 representa parte dessa folha de preenchimento de serviços de reabilitação.

Quadro 3 - Seleção de serviços de reabilitação

03 - PREENCHIMENTO DOS SERVIÇOS DE REABILITAÇÃO A SE REALIZAR

Regras de preenchimento

Carregue as informações já coletadas no botão ao lado → CARREGAR

✓ Assinale no campo verde os serviços de reabilitação que achar pertinente de acordo com o diagnóstico de patologias da sua

DICAS E ESCLARECIMENTOS

1. Leia com atenção caso avisos apareçam durante o preenchimento
2. Para desmarcar uma seleção basta clicar 'delete' do teclado
3. O "X" em vermelho indica os serviços que são sugeridos mas que não foram assinalados

ASSINALAR SOMENTE NAS CÉLULAS

SERVIÇOS	SELEÇÃO	ESTRATÉGIA DE REABILITAÇÃO ASSOCIADA A ANOMALIA	ANOMALIAS ASSINALADAS NA FASE 02			
			[BA002] Geometria inadequada (por exemplo agua empenada)	[BA003] Geometria inadequada (em um ponto específico)	[BA004] Geometria inadequada (águas com inclinações diferentes)
			[BB002] Levantamento da telha e a sua reposição, após a introdução de complemento de estanquidade sobre o	[BB003] Intervenção localizada - levantamento da telha e a sua reposição, após a introdução de complem. de estanquidade	[BB004] Introduzir reforço de estanquidade nas zonas de ligações entre águas, através de bandas exteriores aderentes. Em
[C001] Análise de necessidade de componente					
[C002] Análise de revisão da geometria total	✓				●
[C003] Análise de revisão da geometria pontual	✓		●	●	
[C004] Reversão de trabalhos equivocados realizados anteriormente					
[C005] Análise de melhor estratégia para micro ventilação					
[C006] Análise de conversão da cobertura para montagem a seco					
[C007] Análise de melhor estratégia para transições e remates					
[C008] Análise das características dos elementos de drenagem	✓				
[C009] Remoção de vegetação parasitária	✓				
[C010] Limpeza integral da cobertura					
[C011] Limpeza integral das zonas de transição e ligações					
[C012] Conceção e montagem de cobertura provisória	✓		●	●	

Fase 4 – Resultados (“outputs”) do programa

Após todo o processo de caracterização e diagnóstico, o programa gera folhas A4 configuradas e desenhadas para que, apesar da grande quantidade de informações coletadas, elas sejam apresentadas, enviadas e arquivadas de uma maneira organizada e clara, como representado na figura 5. As folhas de outputs são maioritariamente automáticas. São divididas em quatro “fichas-padrão”:

- “Ficha de caracterização”: coleta as informações preenchidas no momento da caracterização e organiza de forma a se obter uma prancha síntese com todos os dados coletados sobre aquela cobertura.
- “Fichas de anomalias”: folha totalmente automática que busca os dados da planilha onde foram assinaladas as anomalias presentes na cobertura
- “Ficha de estratégias de intervenção”: folha totalmente automática que apresenta a ação de reabilitação direta para cada anomalia detetada na cobertura.
- “Ficha de serviços”: folha parcialmente automática que busca os dados da planilha de listagem de serviços e os organiza separados por categoria. Nessa planilha o usuário tem a possibilidade de já mensurar todos os serviços listados, podendo esta já ser um documento orçamentário.

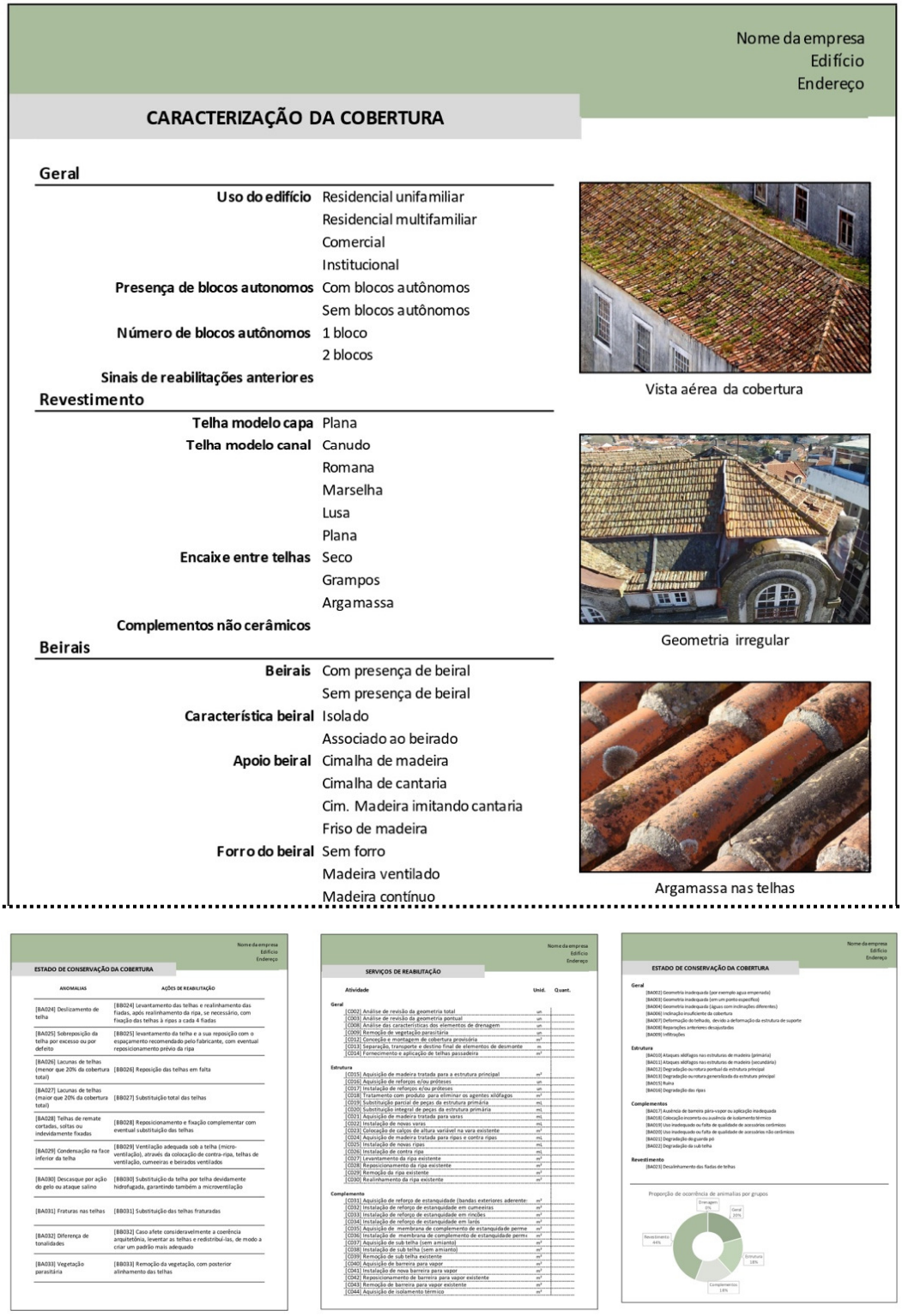


Figura 5 – Fichas-padrão (“outputs”) do programa com ênfase na primeira e miniatura das demais

4 NOTAS FINAIS

Este artigo apresentou um olhar direto para um elemento muitas vezes subvalorizado, mas que desempenha funções essenciais na proteção dos edifícios: as coberturas. Foi evidenciada a necessidade urgente de intervenções nos processos de projeto para a reabilitação de edifícios, sublinhando a importância de uma reabilitação de qualidade.

Devem ser criados cada vez mais programas que incentivem a reabilitação. As ferramentas de suporte são essenciais para incentivar essa prática e garantir boa qualidade aos projetos. É importante enfatizar que o processo de reabilitação é multidisciplinar e qualquer projeto deve considerar o edifício como um todo e todos os aspetos que a reabilitação envolve.

O programa de auxílio à reabilitação de coberturas cerâmicas pode ser um grande contributo para orientar o corpo técnico, fornecendo diretrizes e parâmetros para o projeto. Reconhecendo a volatilidade de algumas exigências técnicas, o programa foi concebido como uma ferramenta dinâmica, capaz de ser melhorada e alterada ao longo do tempo conforme surgem novas necessidades e exigências.

Esta abordagem garante que a reabilitação de coberturas cerâmicas se mantenha atualizada e eficaz, contribuindo significativamente para a qualidade e durabilidade das intervenções em edifícios. É, portanto, crucial continuar desenvolvendo e aprimorando tais programas e ferramentas, assegurando que as práticas de reabilitação atendam às demandas técnicas e contribuam para a sustentabilidade e a preservação do patrimônio edificado.

REFERÊNCIAS

SILVA, J. Mendes; ABRANTES, Vitor; VICENTE, Romeu S (2003). – "Defeitos de concepção execução de coberturas de telha cerâmica - casos de estudo". 1o Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB-2003), FEUP, Porto.

Ramos, A. (2009). "Os custos do desenvolvimento sustentável para a Engenharia, Arquitetura e Construção nos processos de reabilitação". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

APICER (2018). "Guia para Projeto e Aplicação de Telhas Cerâmicas." Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e Cristalaria.

APICC (1998). "Manual de Aplicação de Telhas cerâmicas", Instituto da Construção / Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, APICC. Coimbra, 1998.

Portal da Habitação (2007). "Método de avaliação do estado da conservação de imóveis" (MAEC). Um programa do novo Regime de Arrendamento Urbano

Costa, F Pereira (1955). "Enciclopédia Prática da construção Civil", fascículos 1, 2, 8, 9 10 e 11.

Appleton J. (2009). "Novas oportunidades para a construção sustentável." Reabilitação Sustentável. Lisboa, Instituto Superior Técnico. Congresso LiderA 09:

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CONTRIBUTOS DA FOTOGRAMETRIA PARA A SALVAGUARDA E PROMOÇÃO DO PATRIMÓNIO CULTURAL EDIFICADO: CASO DE ESTUDO EM ÉVORA

Paulo Fanha[a]; Tiago Miguel Ferreira[b]; J. Mendes Silva[c]

[a]Câmara Municipal de Évora | Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, paulo.fanha@gmail.com

[b]University of the West of England (UWE Bristol), College of Arts, Technology and Environment - School of Engineering, Frenchay Campus, Coldharbour Lane, Bristol BS16 1QY, UK, Tiago.Ferreira@uwe.ac.uk

[c]Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, CERIS – Pólo de Coimbra, Portugal, raimundo@dec.uc.pt

RESUMO

A fotogrametria digital de curta distância é uma importante e versátil ferramenta para a documentação e para a reabilitação de edifícios históricos, com um comprovado desempenho na representação da realidade, por efeito dos seus atuais métodos de trabalho, baseados em várias formas de captação de imagens e em processamentos de reconstrução conhecidos – designadamente os baseados nas técnicas de SfM (*Structure from Motion*).

A aplicação desta tecnologia para obtenção de documentação visual e metricamente rigorosa sobre o património cultural edificado, relevante, quer pelos resultados diretos de registo e memória, quer pelo seu contributo para a fundamentação das decisões nos processos de reabilitação desse mesmo património, começa a estar ao alcance de um corpo técnico cada vez mais alargado. No entanto, exige preparação, testes e reflexão criteriosa sobre a sua adequação a cada objetivo, nomeadamente quando existe a opção pela contenção de recursos, que, sem descurar a qualidade, pode levar a uma generalização em muitos contextos desejável.

O presente artigo apresenta uma breve síntese destes métodos e exemplifica a sua aplicação para efeitos de caracterização geral urbana e arquitetónica do edificado, através de um caso de estudo complexo e de grande dimensão – o antigo Convento de Santa Clara de Évora – fazendo uma análise crítica, quer do processo, quer dos resultados.

O antigo Convento de Santa Clara de Évora permanece hoje como uma das grandes moles edificadas no centro histórico da cidade, com importância na sua vivência quotidiana e com significado cultural e patrimonial reconhecidos. Atualmente dividido entre a sua igreja e a escola do ensino básico que ali foi instalada em meados do século passado, padece, contudo, já de evidenciadas necessidades de intervenção com vista à sua reabilitação, situação que serviu de motivação para a realização deste trabalho.

Palavras-chave: Fotogrametria digital, SfM, Reabilitação de edifícios, Convento de Santa Clara de Évora, Évora

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas digitais têm uma utilidade reconhecida no apoio à documentação e à reabilitação de edifícios ou conjuntos urbanos, especialmente em cenários de valor histórico e ou cultural. De entre aquelas, a fotogrametria digital revela-se atualmente um poderoso meio para criação de modelos tridimensionais realistas e, consequentemente, para a representação e análise da própria realidade – fruto, em particular, do desenvolvimento das técnicas conhecidas por SfM (*Structure from Motion*).

Em Évora, o antigo convento de Santa Clara mostrava-se um caso interessante para estudo, utilizando esta tecnologia. Não raramente, percebem-se lacunas na documentação sobre edifícios de valor patrimonial, porque a disponibilidade e o rastreamento desse tipo de informação várias vezes se verifica ser difícil, ou se mostra desatualizada ou é mesmo inexistente – e isso mesmo ocorria com o antigo convento, hoje escola. Além do mais, a sua importância arquitetónica e urbana revelava-se acrescida, quer pela sua dimensão, quer pela sua classificação como monumento nacional, quer ainda enquanto o único equipamento do segundo ciclo de educação presente no centro da cidade.

Assim, foram objetivos do trabalho: i) documentar esse conjunto edificado de modo amplo, angariando documentação visual rigorosa, possibilitadora de novas leituras e melhores informações; e ii) testar as atuais capacidades e autonomia da fotogrametria digital, usando recursos limitados, medianos, ao alcance de um maior número de pessoas ou entidades. Do desenvolvimento do trabalho surgiam as expetativas de se poder: contribuir ativamente para a reabilitação da escola e da igreja de Santa Clara, nem que fosse enquanto chamada de atenção para o edificado; capacitar melhores práticas na gestão urbanística e arquitetónica; e promover o uso da fotogrametria digital aplicada em edifícios históricos, expondo-se técnicas e processos capazes de replicação em outros cenários.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 O CONVENTO / ESCOLA DE SANTA CLARA DE ÉVORA

2.1.1 História e formas do Convento de Santa Clara de Évora

Hoje separado entre Igreja e Escola, o quarteirão do antigo Convento de Santa Clara mantém-se praticamente inalterado desde a sua origem medieval. Considerando a sua forma cadastral original, mantém-se um dos maiores quarteirões no interior do centro histórico de Évora – este conjunto urbano foi justificadamente inscrito na lista do património mundial, em 1986, pela sua identidade e singularidade urbanística e arquitetónica, de origem romana, mas com crescente importância na era medieval, e atingindo o seu auge nos séculos XV e XVI, permanecerem ainda hoje reconhecíveis.

As clarissas surgem em Évora em 1452, data da fundação na cidade da casa religiosa. No século XVI, fruto do enriquecimento da casa, ocorrem importantes benfeitorias, já sob influência de modelos da renascença. A construção de uma nova igreja ocorre em finais do século XVI (Espanca, 1966). Destacando-se na mole urbana, o convento assentava numa organização claustral, com edificações mais a poente, no perímetro do grande claustro e de um claustrim e pátios a norte daquele, pontuadas por mirantes, e com o vazio de grande cerca, a nascente. A igreja localizou-se a sul, com entradas pela fachada lateral, uma tipologia que nos conventos femininos vinha evoluindo desde tempos medievais. Um convento e sua igreja que terá influenciado o seu desenho é o Convento de Santa Helena do Monte Calvário, fundado próximo, no século XVI e também em Évora, o qual se constituirá como um exemplo de charneira para outros conventos mais e num contexto geográfico alargado. A própria igreja do Convento de Santa Clara também não deixará de influenciar outros conventos de clarissas, a um nível mais regional, como é verificável em Alcácer do Sal ou em Borba (Gomes, 2000; Valente, 2011).

A extinção das ordens religiosas em 1834 dita o fim da casa religiosa. Em 1903, com a morte da última das religiosas, dá-se o primeiro de vários esbulhos do património conventual. Após alguns anos encerrado, a primeira reocupação do edifício é militar, para quartéis, durando até 1936, quando há uma derrocada de parte do edifício, principalmente na ala poente (v. Figura 1) (Caeiro, 2005).

2.1.2 Adaptação para Escola de Santa Clara

Os espaços do convento são decididos destinar-se a uso de educação, com obras vultuosas de reconstrução e de adaptação durante a década de 1940, que virão a moldar o conjunto nas suas formas atuais. Para a instalação da escola, várias modificações são então introduzidas, além das reconstruções dos volumes que haviam ruído. Entre outras: são demolidos todos os volumes sobre as galerias do claustro, ao nível de 2.º andar; a área entre claustros é também demolida, reconstruindo-se um novo volume, onde fica a escada principal; o antigo claustrim é também objeto de remodelação, ampliando--se e transformando-se no atual, onde ainda permanece o poço; a antiga cerca do convento é aproveitada para instalações de ginásio e de oficinas, com construção periférica a nascente e de baixa altura (v. Figura 1) (Branco e Santos, 1994-2014; ASAP, 2019). Por fim, em 1951 instala-se a Escola Industrial e Comercial de Évora; e mais tarde, em 1977, fica afeta ao ensino de segundo ciclo – hoje a Escola Básica de Santa Clara. A igreja, separada definitivamente do restante conjunto, fica afeta à Paróquia de Santo Antão. Esta factualidade não deixará de revelar-se com algumas consequências negativas para a identidade e também para a conservação do edificado (Fernandes, 2007: 149).

Figura 1 – À esquerda, aspeto das obras de limpeza da derrocada da ala oeste do convento, voltada à Rua de Santa Clara (Direção Geral do Património Cultural (DGPC), Sistema de Informação para o Património Arquitetónico (SIPA), 1937); ao centro, aspeto das obras, na frente norte do claustro, percebendo-se o novo volume da caixa de escadas (DGPC, SIPA, 1950); à direita, aspeto das obras de remodelação e extensão do claustrim, olhando para nordeste a sua transformação para o atual espaço (DGPC, SIPA, 1950).

Na atualidade, a utilização diária da escola padece de duas dificuldades principais: existe uma desadequação funcional e de conforto cada vez mais sentida; e a degradação do estado de conservação do edificado ficou também evidente, relevando-se os sinais de infiltrações nas galerias dos claustros. No lado da igreja, os problemas são graves também. As últimas obras de manutenção datam de finais do século passado (Branco e Santos, 1994-2014) e, na transição para o atual, os espaços da igreja foram usados para instalações temporárias do museu. Porém, a manutenção ainda hoje dos dispositivos leves e de carácter transitório então utilizados (agora em usufruto de uma fundação religiosa), resulta numa redução da perceção espacial própria da igreja, seja a de dentro (coro) ou a de fora (pública). Ademais, ficam escondidas ou esquecidas necessidades de intervenção em outros espaços significativos, como no coro alto ou na torre sineira (v. Figura 2).

Figura 2 – À esquerda, aspeto de uma das salas de aula, com acesso pelo claustro; ao centro, aspeto dos tetos abobadados da galeria inferior nascente do claustro; à direita, aspeto do coro baixo na atualidade, em perspetiva voltada para grade de separação da igreja de fora.

2.2 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

2.2.1 Conceito e contexto atual

O termo fotogrametria conjuga os étimos de origem grega para luz, escrita e medição. Como esclarece melhor a ISPRS: «A fotogrametria é a ciência e a tecnologia que visa extrair informações geométricas e temáticas tridimensionais confiáveis (…)» (ISPRS, 2022: 2). Alguns princípios sobre os quais assenta são bem antigos, como é a perspetiva, mas o aparecimento da disciplina resulta diretamente da invenção da fotografia. Depois de experiências pioneiras por Meydenbauer, o primeiro a usar o termo "fotogrametria", a sua utilidade para o património cultural percebe-se sobretudo na década de 1960, sendo exemplar a criação então do CIPA (*Comité International de la Photogrammetrie Architecturale*).

Atualmente, a fotogrametria é inteiramente digital. Todo o processo e qualquer meio são digitais, desde a captação de informação. Nos finais dos anos 1990 e na área do património cultural assistia-se ao abandono da fotogrametria em favor de outras tecnologias, designadamente as de rastreamento tridimensional por Laser (3DLS). Contudo, na transição para a segunda década evidencia-se um ressurgimento da fotogrametria como tecnologia capaz e equiparável às demais, graças às melhorias havidas: nos equipamentos disponíveis (câmaras digitais relativamente baratas, desenvolvimento de pequenas aeronaves não tripuladas (drones); bem como nos próprios computadores em uso – com melhor hardware (maiores capacidades de processamento, p. ex.) e novos software (o algoritmo de SIFT, *Scale-Invariant Feature Transform*, p. ex., capaz de estabelecer correspondências entre imagens de forma sólida (Lowe, 1999: 1)); e tanto em aplicações terrestres como aéreas (Historic England, 2017; Remondino et al., 2014: 146).

2.2.2 Resumo teórico e de processo

Na atualidade a fotogrametria digital processa-se por norma em cinco passos. Inicia-se com a captação de imagens de determinado objeto – a qual terá vantagem se programada e organizada em função do conhecimento de todo o processo sequente. De seguida, processa-se a identificação de pontos comuns entre fotografias, organizadas em pares e depois em blocos. Sucede-se o seu alinhamento e cálculo, quer de posições de câmaras, quer de pontos no espaço, ainda em número relativamente reduzido, mas com atributos de maior fidedignidade, através das chamadas equações de colinearidade – é este o processo designado de SfM, central a todos os demais. Determinada a situação espacial destes pontos, podem depois ser calculados muitos outros, na sua vizinhança ou com eles relacionados, tirando partido de procedimentos conhecidos por MVS (*Multi-View Stereo*), formando-se uma nuvem de pontos densa (Furukawa e Ponce, 2007). Esta pode então ser transformada numa superfície triangulada, volumétrica, sobre a qual se projeta uma imagem composta, formalizando assim um

modelo tridimensional virtual e fotorrealista. No final deste processo, podem-se gerar vários produtos, resultantes ou derivados desse modelo ou da sua análise (Historic England, 2017).

Os modelos de nuvem de pontos densificada são do maior interesse, sobretudo com a sua migração para outros programas, seja para análise direta ou como base para novas criações. Estes modelos tridimensionais assumem relevo principalmente em dois ambientes de utilização externa: um deles o HBIM (*Heritage* ou *Historic Building Information Modelling*); o outro o dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os modelos de superfície texturizada, pelas suas capacidades comunicacionais, têm tido também um uso crescente, p. ex. em projetos de realidade aumentada e de realidade virtual.

2.3 TRABALHOS E RESULTADOS FOTOGRAMÉTRICOS EM SANTA CLARA

2.3.1 Preparativos

Com o objetivo de cobrir toda a envolvente das edificações, incluindo das suas coberturas, o uso de um drone foi necessário (escolhendo-se o Anafi Parrot). Para as imagens ao nível do solo mostrou-se preferencial o uso de uma máquina fotográfica tipo DSLR (utilizou-se uma Nikon D3200). Por ligeireza, facilidade de manuseamento e versatilidade em espaços confinados, utilizou-se ainda um telemóvel munido, entre outras, de lente de ultra-grande-angular (no caso, um Samsung A52s). Para os processamentos fotogramétricos, dispondo-se e tratando-se vários milhares de fotografias, foi necessária a utilização de um computador equivalente aos comummente preparados para jogos de vídeo (no caso, equipado com placa-mãe MSI PRO A-690 WiFi, processador 12th Gen Intel Core i7-12700KF, 3.60 GHz, memória RAM de 32.0 Gb e placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 12 Gb). No que respeita ao software para esse processamento, de entre as soluções ao dispor optou-se por usar o programa Reality Capture (RC); acessoriamente, foi ainda utilizado o programa CloudCompare (CC), com amplas possibilidades para manuseamento, visualização e edição de nuvens de pontos.

2.3.2 Metodologia

A execução do trabalho, em levantamentos e em processamentos, passou por uma abordagem e por uma documentação por etapas. Primeiro no exterior, obtendo uma caracterização da envolvente, pelos arruamentos. E depois nos interiores do quarteirão, o claustro grande do convento, a sul, o claustrim, a norte, e o grande pátio de jogos, a nascente. Procurou-se em seguida uma documentação já somente de cariz arquitetónica, focada nos espaços de circulação comuns, horizontais e verticais, em torno dos claustros da escola. Houve ainda a intenção de conseguir experimentar a caracterização de espaços interiores, um local propício para isso sendo na zona da portaria.

2.3.3 Levantamentos

Os primeiros trabalhos de levantamento desenvolvidos foram os que envolviam o drone. Em regra, os primeiros registos eram sempre os superiores, em grelha, sucediam-se rondas ao setor a ilustrar, em órbita, tomando perspetivas oblíquas, e finalmente, documentavam-se as fachadas, na perpendicular às suas superfícies. Uma segunda vertente dos levantamentos fotográficos focou-se, primeiro, nos espaços das galerias dos claustros – difíceis de documentar, exigiram experimentações e repetições – e, logo de seguida, sobre espaços de circulação, descrevendo as transições de nível, em lanços ou em caixas de escadas. Os últimos trabalhos de levantamento incidiram em espaços interiores, usando dois métodos: um sustentou-se num mastro extensível, improvisado, para suporte do drone; um segundo método de levantamento recorreu à utilização do telemóvel e sua lente ultra-grande-angular. Ficou bem evidenciada a capacidade destas óticas, só estas conseguindo ilustrar eficazmente espaços interiores, diversas vezes de dimensão reduzida (v. Figura 3).

Figura 3 – Sequências de fotos ilustrando: no topo, levantamentos com drone, na perpendicular e oblíquos ao objeto; ao centro, levantamentos com câmara DSLR, em movimentos circulares de nível e convergentes no objeto; em baixo, levantamentos com telemóvel com lente ultra-grande-angular, em movimentos de arrastamento e de rotação, oblíquos ao objeto.

2.3.4 Modelação do quarteirão de Santa Clara

Os trabalhos de modelação tridimensional iniciaram-se com duas experiências, parcelares: a primeira focou-se no claustrim, a norte, tentando-se perceber como um conjunto de imagens sobre um espaço existente à volta seria recriado; a segunda experiência tentou o inverso, a modelação de um volume compacto e de dimensão considerável, a Igreja de Santa Clara, a partir de imagens à sua volta. Empreendeu-se de seguida a recriação volumétrica de todo o quarteirão, como desejado. O processo para isso passou pela agregação sucessiva de modelos. A exportação de imagens começou a ser feita diretamente do RC, devido a melhor iluminação de escorços e sinalização dos planos de corte. Deste modelo já se procurou interação com programas externos: introduziram-se as imagens produzidas em ambiente CAD (Autocad 2023), testando escala, montagem planificada de alçados e confronto com desenhos do SIPA, p. ex.; e também se importou o modelo de nuvem de pontos densa para o CC, experimentando possibilidades de catalogação da informação e de segmentações dos dados, p. ex. de acordo com a verticalidade dos pontos (v. Figura 4). Este primeiro modelo dava, porém, a ver algumas debilidades relevantes, com má texturização e com erros de modelação, duplicando superfícies, o que determinou a produção de um novo modelo geral. A nova reconstrução do quarteirão envolveu reforços de levantamento e obrigou ainda à edição de algumas sequências de imagens, o que se procurou sempre reduzir ao mínimo. O novo modelo, reconstruído e texturizado, mostrou evolução em relação ao anterior, sobretudo pela correção de quase todos os erros verificados (v. Figura 5). Uma ortoimagem de planta de coberturas pôde-se transferir para AutoCAD, para impressões à escala, e

também para ambiente SIG, mas neste caso não de forma automatizada, como seria desejável, devido a lacunas no posicionamento geográfico calculado.

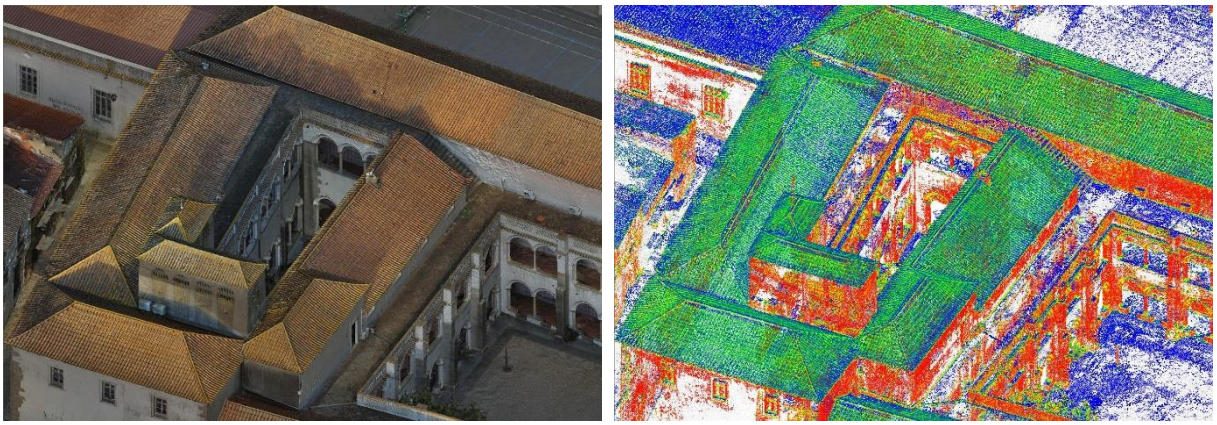


Figura 4 – Visualização axonométrica, à esquerda, do modelo de superfície texturizada, e, à direita, do modelo em nuvem de pontos, após sua classificação segundo a verticalidade própria – os pontos horizontais, a azul, progredindo até aos pontos verticais, a vermelho – a partir do programa CC.

Figura 5 – À esquerda, modelo de nuvem de pontos esparsa, após reconstrução SfM, com localização de câmaras; ao centro, modelo de nuvem de pontos densificada, após reconstrução MVS; à direita, modelo de superfície texturizada – a partir do programa RC.

2.3.5 Modelação dos claustros da escola

As modelações de cariz mais próximo ao edifício iniciaram-se também por duas experimentações. A primeira, de novo no claustrim, mas incorporando dados das galerias, o que se alcançou a partir da modelação individual de cada uma delas, por sua vez resultantes da agregação de três modelos parcelares originados no seu interior (frentes interior, exterior e de tetos). Várias ortoimagens originadas desse modelo de superfície foram organizadas em mosaico, planificando os espaços, por recurso ao AutoCAD. Uma segunda experimentação, no canto sudoeste do claustro, onde se localizam as escadas exteriores originais do convento, originou resultados coerentes, permitindo com esses métodos de levantamento / processamento avançar para modelos maiores. Uma vez formados modelos específicos para as alas das galerias e para os núcleos de escadas, puderam-se agregar em conjuntos coesos, isso se testando para o piso térreo do claustro. Vale a pena referir as dificuldades na representação das galerias, em que se teve de vencer efeitos de paralaxe e de exposições fotográficas muito contrastadas. Do modelo de superfície exportaram-se várias ortoimagens, de entre as quais uma planta de solo foi usada em AutoCAD e, introduzida segundo escala calculada, pôde-se subpô-la ao desenho existente, vetorizado, da escola: as discrepâncias visíveis evidenciaram a desatualização dos desenhos em uso e disponíveis no município. Por fim, experimentou-se a criação de um modelo globalizante, de teste, por isso apenas focado na metade oeste das galerias dos pisos de ambos os claustros. Incluíram-se os vários núcleos de escadas que os intermedeiam, permitindo desde logo uma compreensão mais imediata dos espaços e suas relações (v. Figura 6).

Figura 6 – Ortoimagem, corte longitudinal pelos claustros, galerias e caixa de escadas intermédia, voltado para poente – imagem produzida em RC.

2.3.6 Modelação de alguns espaços interiores na portaria

Um modelo de conjunto, final, procurou congregar os três ambientes abordados, do exterior, das galerias dos claustros e de salas interiores. Os espaços interiores revelam-se com pior definição – são difíceis de reconstruir devido à presença de grandes superfícies monocromáticas e sem texturas. Não obstantes, as ortoimagens exportadas permitem uma compreensão geral dos espaços com um maior pormenor. Por fim, experimentou-se cortar o próprio modelo, para perceção das suas capacidades comunicacionais, visando ampliar o entendimento dos espaços e sistemas construtivos (v. Figura 7).

Figura 7 – À esquerda, ortoimagem de corte vertical transversal, pelas salas próximas à fachada; à direita, perspetiva de modelo de superfície texturizada, cortado duas vezes – produção em RC.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma primeira vertente de análise aos resultados incide no próprio processo para chegar a estes. Desde logo, importa perceber que tempos foram os de levantamento. Por recurso a um cronograma de registos, verificou-se terem decorrido em blocos mais compactos para exteriores e circulações, mais dispersos para os interiores. É de assinalar que, do total de cerca de 90 horas, utilizadas em recolhas fotográficas, os tempos usados para documentar os espaços interiores da escola – e somente de forma parcial – avolumam-se em duas vezes mais do que os usados para representar toda a envolvente exterior do quarteirão. Dos números registados de fotografias captadas, num total de mais de 26 600,

percebe-se que estes foram muito superiores nas caracterizações de espaços interiores nos claustros, totalizando quase 19 200 imagens e com uma taxa de desaproveitamento superior a 30%. Ao invés, o papel desempenhado pelo drone e respetiva captação de imagens por via aérea demonstrou ser vital para a modelação da envolvente exterior – somaram-se mais de 5800 imagens aéreas, quase 80% do total de 7500 fotos para a envolvente, e com a taxa de desaproveitamento mais baixa, de apenas 5%. Dos registos de tempos de processamento dos maiores modelos produzidos, verificou-se que estes foram bem expressivos, alguns exigindo trabalho durante vários dias. Agregando toda a informação, é lógico concluir que onde a relação de tempo e esforço, face aos resultados alcançados, se mostrou mais proveitosa foi nas reconstruções do quarteirão, com informação além do mais globalizante.

Uma segunda vertente de avaliação, aos próprios resultados, foi também progressiva. Procurou-se primeiro uma aferição visual, sobre atributos e qualidade intrínseca à própria reconstrução e texturização dos modelos. Para isso importou a monitorização de lacunas, ou de defeitos visuais – os quais não deixaram de ocorrer. Os defeitos de modelação e ou de texturização são mais evidentes nas reconstruções de espaços interiores. Por outro lado, identificando também as mais valias visuais nos modelos produzidos, é percetível que se permite uma melhor produção e exportação de derivados. Tal como possibilita novos níveis de análise e de interpretação dos modelos, envolvendo a interação com outros programas, como os assinalados. Um segundo atributo de verificação confrontou diretamente as fotografias de levantamento e perspetivas similares retiradas dos modelos texturizados, percebendo-se nestes o seu grande grau de aproximação visual à realidade (v. Figura 8).

Para perceber se as reconstruções eram metricamente rigorosas, mostrou-se necessário empreender trabalhos de verificação métrica, por amostragem, em vários locais da escola, depois replicados nos modelos (cerca de meia centena de medições). O rigor percebido nos planos de nível mostrou-se assinalável pela positiva, com diferenças entre medidas, as locais e as modeladas, compreendidas entre +1/-1 cm (diferenças proporcionais, em média, de 0,03%). Nas medições de tipo altimétrico os resultados foram diferentes, com diferenças entre medidas mais expressivas, entre máximos de +4/-4 cm (diferenças médias de 0,13%), decorrentes do próprio processamento fotogramétrico – ainda assim, aceitáveis, considerando-se uma pretendida caracterização arquitetónica de nível geral.

Por fim, avaliou-se a precisão posicional dos resultados. Uma primeira inserção de ortoimagem em SIG fez-se por georreferenciação simples, por três pontos, sem distorção – a sobreposição mostrou-se eficaz e a ortofoto produzida proporcionada e sem desfasamentos. A partir de um segundo modelo do quarteirão, aprofundou-se a análise à independência dos automatismos do programa RC. A exportação de imagem georreferenciada e sua inserção direta no ambiente SIG resultou, contudo, desfasada, impondo-se que, sempre que seja exigível precisão posicional rigorosa, deva haver um apoio topográfico e obtenção de pontos de controlo auxiliadores do processo de reconstrução.

Figura 8 – Confrontação de fotografia tomada sobre o claustro, em vista para noroeste, à esquerda, com vista similar do modelo de superfície texturizada do quarteirão, a partir de ponto de vista similar, à direita – a partir do programa RC.

4 CONCLUSÕES

Para documentação urbana, os resultados visuais alcançados permitem concluir por uma aplicabilidade da fotogrametria para a representação ampla e pormenorizada de quarteirões urbanos, mesmo os de grande dimensão (v. Figura 9). Considerando a sua acessibilidade, possibilitando melhorar-se p. ex. o que já se alcançara nos levantamentos de início do século, a nível urbano, pela extinta DGEMN. Para documentação arquitetónica, a fotogrametria digital revelou ser também uma tecnologia robusta, sendo possível alcançar resultados utilizáveis diretamente em processos de reabilitação do edificado, seja para diagnóstico, seja para suporte à execução do respetivo projeto.

Decorre dos resultados da fotogrametria o seu grande potencial para nos capacitar novos "modos de ver", na feliz expressão de John Berger (2018). Podemos ver para ontem – a integração de documentação histórica, p. ex. fotografias antigas, com os processos fotogramétricos e com os modelos digitais resultantes capacita uma regressão ao passado e também uma sua recriação virtual (v. Figura 10). Por outro lado, ultrapassando-se os moldes da perspetiva, que imperam desde a Renascença, ficamos ainda habilitados a ver também, simultaneamente, por dentro. Com efeito, tornar transparentes as materialidades mais sólidas viabiliza-nos um olhar mais poderoso sobre as edificações e, portanto, amplia-nos as possibilidades da sua própria compreensão (v. Figura 11).

O decurso deste trabalho deixou percetível, sobretudo, o quão poderosa poderá ser a fotogrametria enquanto ferramenta de análise da realidade das edificações. Por um lado, possibilitando ações de verificação fora do lugar e congregando vários intervenientes em simultâneo; e por outro lado, pela ampliação substancial das capacidades de inspeção, por análise de novos atributos, surgidos da interpretação e manipulação dos seus resultados (v. Figura 12).

Figura 9 – Alçado para poente obtido por fotogrametria, para a Rua de Santa Clara. Esc. ~1/500.

Figura 10 – Perspetiva do claustro, emulada no modelo de superfície, à esquerda, e de fotografia do arquivo da DGPC, SIPA, de 1936, à direita, permitindo ilustrar diretamente modificações havidas.

Figura 11 – Perspetiva da nuvem de pontos densificada, ilustrando simultaneamente aspetos exteriores e interiores, no claustrim da escola – a partir do programa RC.

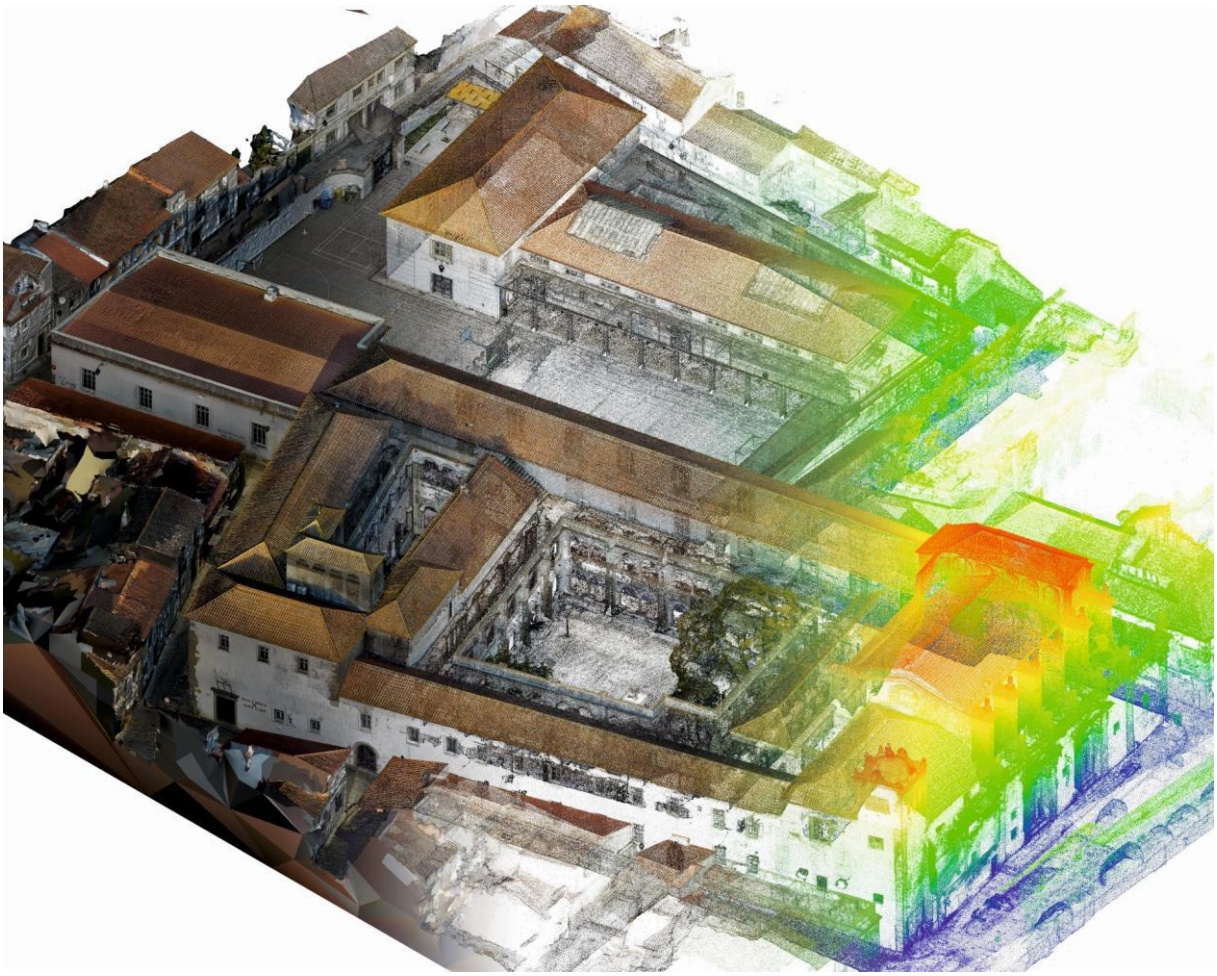


Figura 12 – Imagem compósita, de modelo em nuvem de pontos densa, ao centro, para modelo de superfície texturizada, à esquerda, e para modelo de nuvem de pontos densa, em análise de elevações, por gradação de cores, à direita – a partir do programa CC.

REFERÊNCIAS

ASAP, Atlas of School Architecture in Portugal (2019). Atlas of School Architecture in Portugal - Education, Heritage and Challenges. Lisboa, Universidade de Lisboa. Instituto Superior Técnico http://asap-ehc.tecnico.ulisboa.pt/database/escola.php?id=213

BERGER, John (2018) – Modos de Ver, pp. 199. Lisboa, Antígona

BRANCO, Manuel, SANTOS, João (1994-2014). Convento de Santa Clara de Évora / Escola Secundária de Santa Clara. In SIPA - Sistema de Informação para o Património Arquitetónico, IPA.00002722, DGPC. http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=2722

CAEIRO, Elsa (2005). Os Conventos do Termo de Évora. Sevilha, Ph.D. Thesis. Escola Técnica Superior de Arquitectura, Universidade de Sevilha

ESPANCA, Túlio (1966). Inventário Artístico de Portugal. Concelho de Évora. In Inventário Artístico de Portugal, VII, 2 vols., pp. 218 - 223. Lisboa

FERNANDES, Maria L. A. (2007). Centro histórico de Évora. Os "restauros" do século XX, de 1900 à classificação mundial. In Monumentos n.º 26. Revista semestral de edifícios e monumentos, pp. 144 - 154. Lisboa, DGEMN. https://www.academia.edu/10303570/Centro_hist%C3%B3rico_de_%C3%89vora_Os_restauros_do_s%C3%A9culo_XX_de_1900_%C3%A0_classifica%C3%A7%C3%A3o_mundial

FURUKAWA, Yasutaka, PONCE, Jean (2007). Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. In Proceedings, 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 32(1), pp. 8, IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/document/4270271

GOMES, Paulo Varela (2000). A fachada pseudo-frontal na arquitectura das igrejas de freiras no mundo português. In 14,5 Ensaios de História e Arquitectura, pp. 249 - 261. Montemor-o-Novo, Almedina

HISTORIC ENGLAND, (2017). Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice, pp. 125. Swindon, Historic England. https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/

ISPRS, Sociedade Internacional de Fotogrametria e Deteção Remota (2022). ISPRS - Informação a partir de imagens - Brochura de apresentação (versão português), pp. 2, ISPRS. https://www.isprs.org/publications/brochure/ISPRS brochure potuguese.pdf

LOWE, David G. (1999). Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In Proceedings of the International Conference on Computer Vision, Corfu, pp. 8. Corfu. https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf

REMONDINO, Fabio, SPERA, Maria Grazia, NOCERINO, Erica, et al. (2014). State of the art in high density image matching. In The Photogrammetric Record, n.º 29, pp. 144 - 166, Remote Sensing and Photogrammetry Society. https://www.academia.edu/14200419/State_of_the_art_in_high density image matching

VALENTE, Teresa (2011). O espaço nas igrejas dos conventos das clarissas da Província dos Algarves. In Promontoria, Ano 9, Número 9, 2011 - Revista de História, Arqueologia e Património da Universidade do Algarve, pp. 117 - 140. Faro, Universidade do Algarve. http://hdl.handle.net/10400.1/7437

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPORTÂNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Josefa Rombe[a]; José Diogo[b]

a Universidade Politécnica, Paulo Samuel Kakomba, 913, Moçambique, vanguir90@gmail.com

b Universidade Politécnica, Paulo Samuel Kakomba, 913, Moçambique, joeddiogo@gmail.com

RESUMO

Sendo os pavimentos flexíveis, o tipo de estruturas mais verificadas em Moçambique, estes, são os que apresentam demasiadas patologias, o que torna questionánel o bom desempenho dos mesmos. A presença destas, afecta negativamente na mobilidade rodoviária de pessoas e bens, facto que contribui para avultados prejuízos no âmbito económico geral do país.

Com a passagem repetida dos rodados aliada à característica viscoelástica do pavimento flexível, verifica-se, que após a retirada da carga no mesmo, o pavimento não recupera totalmente a sua posição inicial. Este fenómeno é chamado fluência, definida como sendo uma deformação lenta e progressiva do material quando submetido a uma tensão constante, em que as deformações crescem ao longo do tempo mesmo sob uma carga não variável.

O objectivo da presente pesquisa é eliminar as patologias que se verificam nos pavimentos flexíveis em Moçambique, demonstrando que o efeito da temperatura deve ser considerado no cálculo do dimensionamento dos pavimentos. No presente trabalho, o âmbito da problemática é direcionado através da hipótese, que a falta da consideração do fenómeno de viscoelasticidade na ánalise de pavimentos flexíveis, subestima as acções de tensões e deformações solicitantes no cálculo estrutural.

Neste estudo, são adoptados dois modelos de análise para as simulações, em que, o primeiro é o modelo A- linear elástico que assume todas camadas como linear elásticas e o segundo, como sendo modelo B- viscoelástico, que admite a primeira camada como viscoelástica e as restantes linear elásticas. Para o efeito, no estudo foi adoptado uma metodologia baseada nos resultados das deformações das simulações efectuadas para cada modelo, no caso de estudo do projecto de construção de estrada no troço 1 - Maputo By Pass, circular de Maputo, cujos resultados, demonstraram a existência de uma forte correlação entre o efeito de temperatura e as deformações excessivas durante a análise de pavimentos modelos.

Cada modelo foi constituído por estruturas de 6 camadas, e cada estrutura foi considerada com uma área carregada por rodas circular dupla, foram igualmente considerados os parâmetros de sensibilidade dos materiais do pavimento, tais como a carga, a pressão de contacto dos pneus, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade. Da simulação feita com ajuda do programa KENLAYER para os dois modelos de pavimento, revelou-se que: Modelo A – Pavimento linear elástico admite tensões baixas na superfície em relação ao Modelo B- pavimento viscoelástico, ambos modelos mostraram que tanto as tensões assim como as deformações, decrescem a medida que a profundidade aumenta e sendo mais alta nas posições de localização de cargas.

Palavras-chave: Pavimentos, Viscoelasticidade, Variação de temperatura

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Diogo (2007) citando Yoder e Witckzack, Huang (1993, 2004), a mecânica clássica define o pavimento como sendo uma estrutura composta por diversas camadas de materiais elásticos ou elasto-visco-plástico. Os pavimentos rodoviários têm muita utilidade no cotidiano de uma sociedade, de acordo com Reis (2009:2), pavimento é a estrutura construída sobre um terreno terraplanado, que suporta as cargas provenientes do tráfego, redistribui essas cargas para a infra-estrutura e proporciona as condições satisfatórias de conforto, economia e segurança a quem utiliza a estrutura.

1.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

De acordo com Reis (2009:2), o uso do betume como material para misturas de pavimentos betuminosas começou nos Estados Unidos em 1896. O recurso ao betume para preparação de camada de revestimento superficial ocorreu após a decisão da sua utilização como solução alternativa para reparação dum pavimento rígido que apresentou deterioração precoce. A resistência estrutural dos pavimentos flexíveis é dada pelas diferentes camadas que o constituem assim como os materiais usados no qual a resistência e rigidez são fundamentais. O pavimento é composto por revestimento ou capa selante, base, sub-base, reforço do subleito, regularização do subleito e subleito como verifica-se na figura 1.

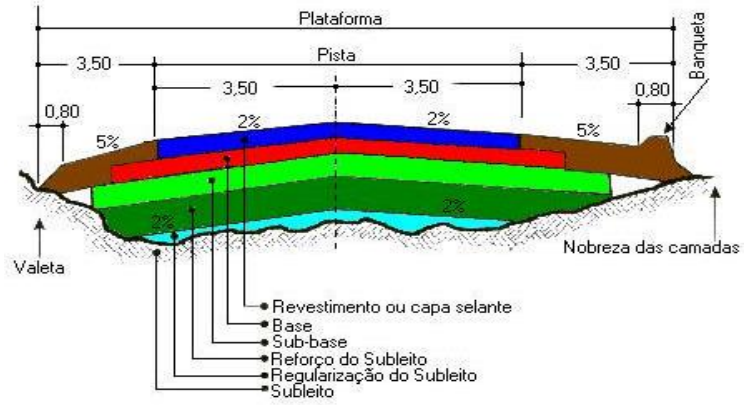


Figura 1: Estrutura de pavimento flexível – Fonte: Merighi (2004)

1.2 PAVIMENTO RÍGIDO

De acordo com Reis (2009:2), os pavimentos rígidos caracterizam-se pela camada de desgaste ser constituída por uma laje de betão de elevada resistência. A figura 2 mostra que o pavimento apresenta placa de concreto, sub-base, reforço do subleito, e camadas finais de terraplanagem. Os principais dinamizadores dos pavimentos rígidos foram os ingleses com a primeira construção em 1865, seguindo-se os Estados Unidos da América em 1891. Antes da segunda guerra mundial a preferência para os pavimentos das auto-estradas dos Americanos e Alemães resumia-se sobretudo aos pavimentos rígidos. Este capítulo no presente trabalho não é desenvolvido por não ser objecto da sua pesquisa, contudo a candidata apresenta abaixo a estrutura de um pavimento típico rígido.

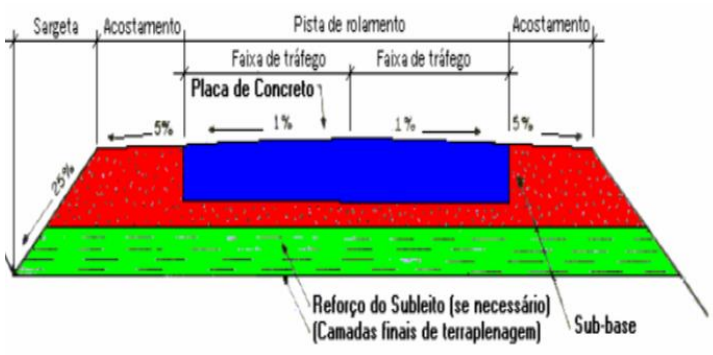


Figura 2: Estrutura de pavimento rígido – Fonte: Merighi (2004)

1.3 COEFICIENTE DE POISSON

A abordagem mecanística de projectos de pavimentos requer informações sobre o coeficiente de Poisson. Durante o ensaio de módulo de resiliência, podem ser medidas as deformações laterais e axiais no corpo de prova e, consequentemente, determinar o coeficiente de Poisson, indicado na equação 1. A relação entre a deformação lateral , e a deformação axial para um carregamento aplicado na direcção axial define este coeficiente, ou seja:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a}$$

Equação 1: Coeficiente de Poisson – Fonte: Pereira (2007)

1.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O Módulo de elasticidade de um material é uma caracterização mecânica do material, obtida no ensaio triaxial de cargas repetidas, que define a relação entre a tensão desvio aplicada e a deformação recuperável ou resiliente. Este ensaio procura reproduzir as condições de campo, onde o corpo de prova é submetido a uma tensão de compressão (σ1) e uma tensão de confinamento (σ3). A amostra quando submetida a sucessivos carregamentos e descarregamentos, deforma-se, obtendo-se assim, as deformações recuperáveis (εr). Com este valor e o da tensão desvio (σd), obtém-se o módulo de resiliência (MR) que traduz a capacidade do solo retornar a sua situação inicial após ser submetido a um carregamento. Por definição, o módulo de resiliência (MR) é definido pela seguinte equação 2 abaixo indicada:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Equação 2: Módulo de elasticidade – Fonte: Pereira (2007)

Onde:

σ_d = Tensão desvio repetida;

ε_r = Deformação recuperável ou resiliente correspondente a um certo número de aplicações de σ_d

1.5 TEMPERATURA NOS PAVIMENTOS

De acordo com Santos (1995), nos pavimentos rodoviários flexíveis, existe a combinação de dois tipos de acções, temperatura e tráfego, que tem como resultado o acumular de dano num pavimento

rodoviário. O objectivo da consideração da temperatura nas camadas betuminosas e do tráfego de pesados no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis é de permitir uma melhor aproximação ao comportamento real do desempenho do pavimento de estradas durante o período de serviço.

De acordo com Lakes (1999), o efeito da temperatura é considerado na resistência à deformação permanente das misturas betuminosas. Uma característica básica dos materiais viscoelásticos é denominada de fluência, que é uma deformação lenta e progressiva do material quando submetido a uma tensão constante, ou seja, as deformações que crescem ao longo do tempo mesmo sob uma carga não variável. Existe um método validado para cálculo de distribuição da temperatura do pavimento, que é baseado do relacionamento entre temperaturas do ar e temperaturas no pavimento. De acordo com Diogo (2007) Citando Huang (2004), o cálculo de temperatura no pavimento pode ser feita pela equação 3.

$$Mp = Ma \times (1 + \frac{1}{Z+4}) - \frac{34}{Z+4} + 6$$

Equação 3: Temperatura do pavimento – Fonte: Diogo (2007)

1.6 TEORIA DO MODELO LINEAR ELÁSTICO

De acordo com Portela (2011:2), este modelo ainda é um dos mais usados para tratar da relação tensão-deformação em revestimentos asfálticos. Isso se deve basicamente a sua simplicidade e fácil aplicação. Este modelo baseia-se na ideia de que o material se deforma imediatamente com a aplicação do carregamento e retorna ao seu estado original quando este carregamento é removido. O modelo é governado, na forma unidimensional, pela Lei de Hooke dada pela equação 4 e pode ser bem utilizado para pequenas deformações dos materiais:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Equação 4: Lei de Hooke – Fonte: Portela (2011)

Onde:

σ = representa a tensão elástica;
E = o módulo de elasticidade;
E = a deformação elástica.

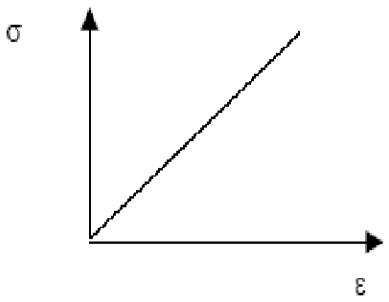


Gráfico 1: Comportamento linear elástico – Fonte; Rocha (2010)

1.7 TEORIA DO MODELO VISCOELÁSTICO

O modelo viscoelástico linear tem sido bastante utilizado na caracterização de misturas asfálticas (Huang, 2004) devido à boa correlação obtida entre a teoria e os ensaios de laboratório (Soares e

Souza, 2002). As misturas asfálticas, quando submetidas a temperaturas não muito baixas, podem ter seu comportamento representado de maneira satisfatória pela teoria da viscoelasticidade (Huang, 2004). Quando estas misturas se apresentam na fase viscoelástica linear, o Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (Shames e Cozzarelli,1997; Lakes, 1998; Roylance, 2001) é aplicável e o material pode ser considerado termo-reologicamente simples.

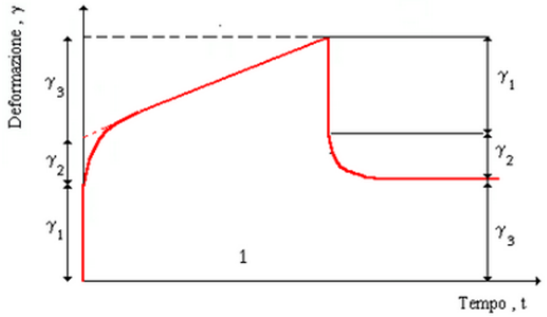


Gráfico 2: Comportamento viscoelástico – Fonte: Rocha (2010)

A teoria do efeito da influência da temperatura no dimensionamento dos pavimentos rodoviários flexíveis, é apresentada com a combinação de dois tipos de acções, temperatura e tráfego, que tem como resultado a acumulação do dano num pavimento rodoviário. O objectivo da consideração da temperatura nas camadas betuminosas e do tráfego de pesados no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis é de simular o comportamento real do pavimento, dessa forma definir melhor as solicitações a considerar para o dimensionamento desse pavimento, de modo, a mitigar o aparecimento precoce de patologias nos mesmos.

A teoria de viscoelasticidade em pavimentos flexíveis, ultimamente, é o mais aceite em relação à teoria linear elástica na análise de deformações e tensões nos pavimentos, pois, apesar de também considerar que o material se deforma imediatamente com a aplicação do carregamento, esta teoria considera que o pavimento não retorna ao seu estado original quando este carregamento é removido. Esta teoria, permite uma melhor aproximação ao comportamento real do desempenho do pavimento de estradas durante o período de serviço.

2 CASO DE ESTUDO - TROÇO 1 DO PROJECTO MAPUTO BY PASS

2.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O projecto Maputo By Pass- Circular de Maputo, localiza-se em Maputo, no sul de Moçambique, cuja a extensão total é de cerca de 79km.O troço 1 do projecto Maputo By Pass com cerca de 6,125km de extensão localiza-se na avenida da Marginal caracterizado como pavimento flexível. Figura xxx mostra o troço correspondente ao objecto de estudo. O troço 1 inicia a partir do hotel Radisson e termina na Ponte da Costa Do Sol, conforme mostrado na figura 3.

Figura 3: Localização do troço em estudo da secção 1 do projecto Maputo By Pass – Fonte: Projecto Maputo By Pass

Este projecto consiste na construção de uma estrada circular a fim de tornar as zonas que são abrangidas pelo projecto mais acessíveis, de modo a descongestionar o tráfego de viaturas da cidade de Maputo. O estado de conservação da estrada indicada, em 2012, antes da intervenção apresentava-se em estado avançado de degradação, e para melhorar a sua condição, o governo de Moçambique decidiu requalificar este troço e lançou um projecto que no mesmo ano culminou com a sua construção para fim de ligar Maputo com a estrada Nacional que tem o fim no norte do país.

Figura 4: Patologia verificada na secção 1 do projecto Maputo By Pass

2.2 MODELOS DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO E PARAMETROS DE SENSIBILIDADE

Para analisar a resposta do pavimento foram propostos dois modelos de pavimento, cada modelo sendo constituída uma estrutura de 5 camadas conforme mostrado a figura 5. Para o primeiro modelo

a camada de asfalto é simulada como linear elástica e no segundo modelo como viscoelástica. Toda estrutura foi considerada como sendo uma área carregada por rodas circular dupla. Os parâmetros de sensibilidade dos materiais do pavimento estão mostrados nas próprias figuras. A carga em cada roda é de 20KN e a pressão de contacto dos pneus é de 520 KPa (Theyz et al, 1996). Os módulos de elasticidade ou módulos de resiliência são calculadas pela forma (Yoder e Wiczack, 1975), indicado na equação 5.

$$E(MR) = 10.3 \times CBR$$

Equação 5: Deformação total – Fonte: Diogo (2007)

Onde:

E (M)→ Módulo de elasticidade ou de resiliência Mpa;
CBR → California bearing ratio, a partir de testes de CBR.

A simulação a seguir é feita através do programa KENLAYER (Huang, 2004) com vista a determinar as deformações do pavimento previsto nesse estudo. O pavimento em estudo é constituído por 5 camadas, sendo a primeira asfálticas e as restantes granulares.

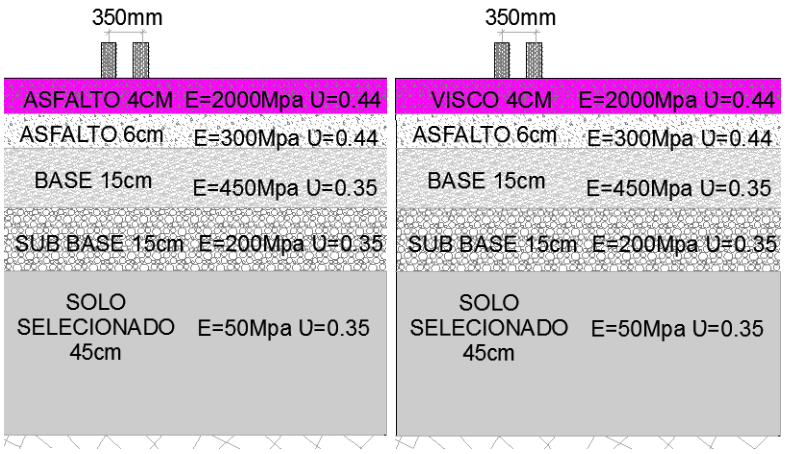


Figura 5: Estrutura de pavimento linear e viscoelástico

2.3 DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE NO PAVIMENTO

De acordo com Diogo (2007) (citando Lytton, Uzan, Fernando, Hiltunen, Roque e Stoffels 1993), até a data, a maioria das pesquisas sobre a estimativa de deformação permanente nos pavimentos asfálticos tem sido baseada em uma abordagem de deslocamento de camadas, e, em certo modo dependente da propriedade viscoelástica do material asfáltico. A deformação total no pavimento asfáltico pode ser calculada pela equação abaixo e define-se como sendo a soma de deformações de camadas individuais ao longo de toda profundidade.

$$RD_{total} = RD_{AC} + RD_{B} + \ldots + RD_{SG}$$

Equação 6: Deformação total – Fonte: Diogo (2007)

Onde:

RD → deformação permanente do pavimento;
RDAC, RDB, RDSG → são deformações permanentes para o asfalto, base e camadas de subleito, respectivamente.

3 RESULTADOS

Da simulação efectuada com o auxílio do programa KENLAYER podemos verificar os seguintes resultados:

3.1 ANÁLISE DE TENSÕES:

Para ambos modelos de pavimento linear (gráfico 3), que assume a primeira camada de linear elástica e o modelo viscoelástico (gráfico 4), que assume camada superficial de asfalto como viscoelástica e restantes linear elásticas; as tensões diminuem a medida que a profundidade aumenta sendo mais alta na superfície.

TENSÕES

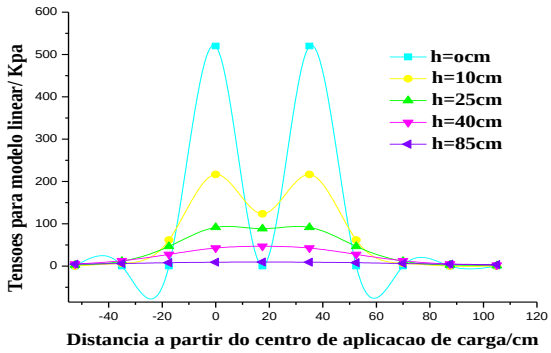


Gráfico 3: Tensões - modelo linear

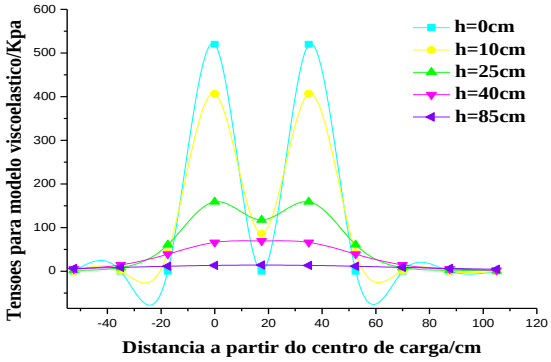


Gráfico 4: Tensões - modelo viscoelástico

3.2 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES:

Para todos modelos de pavimento linear (gráfico 5), que assume a primeira camada de linear elástica e o modelo viscoelástico (gráfico 6), que assume camada superficial de asfalto como viscoelástica e restantes linear elásticas, o mesmo fenómeno se repete para as deformações que diminuem a medida que a profundidade aumenta sendo mais alta na superfície.

DEFORMAÇÕES

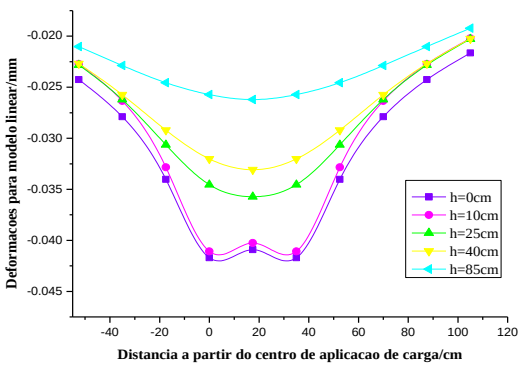


Gráfico 5: Deformações - modelo linear

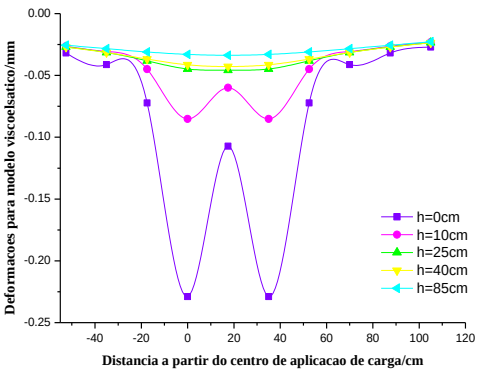


Gráfico 6: Deformações - modelo viscoelástico

3.3 INTERPRETAÇÃO COMPARATIVA DE RESPOSTAS NO MODELO DE PAVIMENTOS LINEAR E VISCOELÁSTICOS

A avaliação comparativa tem por finalidade demonstrar as respostas dos pavimentos gerados pela simulação efectuada pelo programa KENPAVE, para dois modelos, modelo elástico e viscoelástico. O gráfico 7 reflecte os resultados das deformações para os modelos linear elástico e viscoelástico, referente ao ponto de aplicação de carga, correspondente a h=0 cm, nota-se que o modelo linear elástico admite valores de deformações menores do que o modelo viscoelástico, devido a não consideração do efeito de temperatura que afecta a camada viscosa de asfalto no dimensionamento dos pavimentos.

Nestas condições fica validado que nos pavimentos asfálticos o efeito de viscoelasticidade está sempre presente e deve ser considerado para o caso presente dos projectos construídos no sul de Moçambique. O fenómeno de viscoelasticidade pode ser considerado como a causa da roptura rápida dos pavimentos asfálticos. A assunção da camada de asfalto como linear elástica pelo nosso país e países da região da África Austral que substima este efeito pode-se considerar como um equívoco pois o resultado é demonstrável pelo actual descontrole na gestão dos sistemas de pavimentos.

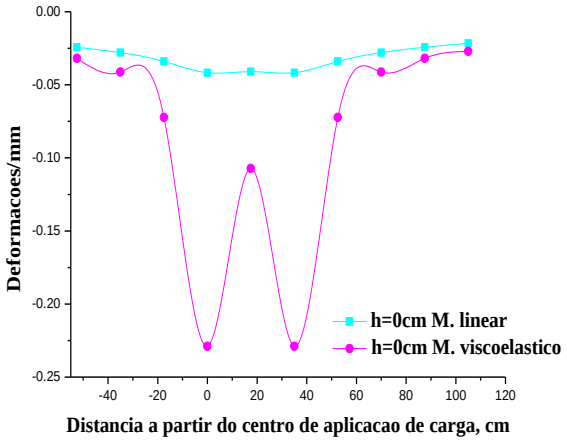


Gráfico 7: Gráfico comparativo das deformações para os modelos, linear e viscoelástico, para h=0cm

3.4 DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE NO PAVIMENTO

A tabela 1 apresenta resultados dos cálculos de deformações permanente do pavimento para dois modelos (linear elástico e viscoelástico) obtidos com ajuda do programa KENLAYER. Dos resultados verifica-se que a deformação permanente no modelo linear é de 0.01599cm ou seja 0.15mm e no modelo viscoelásico é de 0.19593 cm ou seja 1.95mm. comparando os dois modelos verifica-se que o modelo viscoelástico admite maiores deformações permanentes.

Profundidade	Deformação no eixo x=0	Deformação total para o modelo linear	Deformação no eixo x=0	Deformação total para o modelo viscoelástivo
0	0.04171		0.22889	
10	0.04108	0.00063	0.08527	0.14362
25	0.03455	0.00653	0.04473	0.04054
40	0.03202	0.00253	0.04139	0.00334
105	0.02572	0.0063	0.03296	0.00843
	∑	0.01599	∑	0.19593

Tabela 1: Deformação permanente do pavimento

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1 CONCLUSÕES

Ficou evidente que os aspectos de viscoelasticidade nos pavimentos asfálticos quando sujeitos a temperaturas estão sempre presentes pelo que se recomenda a sua consideração no dimensionamento de pavimentos asfálticos em Moçambique em particular para regiões cujas temperaturas são altas na época de verão.

Conclui-se igualmente que:

- A temperatura influencia no aumento das deformações referente a camada de revestimento dum pavimento flexível;

- O fenómeno de viscoelasticidade está sempre presente nos pavimentos asfálticos e desta forma o estudo validado o estudo;

4.2 RECOMENDAÇÕES

Considerar a temperatura no dimensionamento de pavimentos asfálticos em Moçambique em particular devido a altas temperaturas na época de verão;

- O Uso do programa KENPAVE para avaliação dos pavimentos;
- Nos estudos futuros, verificar o efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos de aeroportos onde as cargas são demasiadamente excessivas.

REFERÊNCIAS

- Bernucci, Motta, Ceratti e Soares (2010:3,9-10), Pavimentação Asfáltica,
- Diogo, J.F.R., (2007), Tese de Doutoramento, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China,
- SANTOS, Luís Guilherme de Picado (1995), Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis,
- DNIT (2006), Manual de restauração de pavimentos asfáltico,
- Yoder, E.J. and Witczak, M.W. (1975) Principle of Pavement Design,
- Huang, Y. H. (2004), Pavement analysis and design,
- Reis, Nuno Filipe Dos Santos (2009), Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários, Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço, capítulo 2.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA POR VIA DA SOLUÇÃO PAVIMENTOS MISTOS: BOAS PRÁTICAS PARA EVITAR INSUCESSOS

Helena Cruz[a]; José Saporiti Machado[b]; Sónia Duarte[c]

[a] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, helenacruz@lnec.pt;

[b]saporiti@lnec.pt; [c] sduarte@lnec.pt

RESUMO

A realização de pavimentos mistos madeira-betão é uma técnica construtiva que tira partido das características de ambos os materiais, permitindo realizar pavimentos mais leves do que com lajes de betão armado, mas também mais resistentes, menos flexíveis e com melhor desempenho acústico do que os pavimentos tradicionais de madeira.

É uma técnica amplamente usada, quer em construção nova, quer no âmbito da reabilitação de pavimentos antigos de madeira sobretudo para melhoria do comportamento mecânico do pavimento original, nomeadamente o aumento da resistência e da rigidez e a redução da vibração.

Em reabilitação, uma lâmina de betão é adicionada sobre o pavimento existente. O bom funcionamento desta solução requer uma ligação rígida entre o betão e as vigas de madeira, a solidez das entregas dessas vigas nas paredes e uma execução cuidada, para impedir que a água do betão entre em contacto e seja absorvida pela madeira durante a betonagem e cura do betão, o que irá propiciar, ou agravar, a degradação biológica deste material.

Esta comunicação aborda os pavimentos mistos madeira-betão, especialmente na vertente da reabilitação de edifícios, e apresenta alguns exemplos em que a falta de conhecimento sobre a forma correta de aplicação conduziu ao colapso total de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE

Pavimentos de madeira, pavimentos mistos, betonilha, reabilitação, degradação biológica

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção é responsável por cerca de 36 % das emissões de gases com efeito de estufa e de 40 % de consumo energético (fonte: UE). Assim, o uso de madeira na construção poderá contribuir positivamente para o objetivo "carbono zero" definido pela União Europeia até 2050, dado que é um recurso renovável e de origem natural.

A reabilitação de edifícios antigos requer frequentemente intervenções em pavimentos de madeira, seja para resolver problemas de degradação do material, decorrentes do contacto com água e da ação de agentes de degradação biológica da madeira, tais como fungos de podridão ou insetos xilófagos, seja para corrigir deformações, ou ainda para melhorar o seu comportamento mecânico,

nomeadamente a rigidez e a resistência à flexão, de modo a cumprir as atuais exigências regulamentares (NP EN 1995-1-1). De assinalar que os pavimento de madeira se inserem na classe de risco 1, associada ao interior das habitações em ambiente seco, devendo a madeira ser aplicada e mantida em condições de serviço sem exposição a agentes atmosféricos ou água líquida (EN335, 2013).

A realização de pavimentos mistos madeira-betão é uma técnica potencialmente interessante para reabilitação de pavimentos antigos de madeira, que tira partido das características de ambos os materiais, permitindo obter pavimentos mais leves do que com lajes de betão armado, mas também mais resistentes, menos flexíveis e com melhor desempenho acústico do que os pavimentos tradicionais de madeira.

Dependendo da tipologia e condições do edifício em causa, esta técnica assegura o princípio da reutilização e pode ser utilizada com sucesso para melhoria do comportamento do pavimento no seu estado atual (ou mesmo do pavimento original), sem remover as estruturas em serviço, e sem alterar drasticamente a massa dos pisos e, consequentemente, o comportamento global do edifício aos sismos.

Nesta abordagem, uma pequena lâmina de betão é adicionada sobre o pavimento existente, podendo ser usado o soalho como cofragem. Esta lâmina em compressão é rigidamente ligada às vigas de madeira, que asseguram a resistência à tração do conjunto. O bom funcionamento desta solução requer um adequado dimensionamento, bem como uma ligação rígida entre o betão e as vigas de madeira, a solidez das entregas dessas vigas nas paredes e ainda uma execução cuidada, no sentido de impedir que a água do betão entre em contacto e seja absorvida pela madeira durante a betonagem e cura do betão, o que irá propiciar, ou agravar, a degradação deste material por fungos de podridão ou térmitas subterrâneas.

No entanto, a prática tem mostrado que, em muitas intervenções ditas “de reabilitação” de edifícios, o procedimento seguido passa por aplicar simplesmente uma betonilha sobre o pavimento de madeira existente, sem observar os cuidados referidos, o que se traduz numa sobrecarga significativa sobre as vigas e ocasiona frequentemente o seu apodrecimento e eventual colapso.

2 CONCEITO E VANTAGENS DOS PAVIMENTOS MISTOS MADEIRA-BETÃO

Os pavimentos mistos madeira-betão são obtidos pela combinação de vigas ou pavimentos de madeira e uma lâmina de betão, ligados de forma rígida. A ligação entre a madeira e o betão deve ser realizada de forma a oferecer a necessária resistência e rigidez, essencial para que ambos os materiais funcionem em conjunto.

O betão no banzo superior resiste aos esforços de compressão enquanto a madeira resiste aos esforços de tração e flexão associados às forças gravíticas, devendo para isso a linha neutra da secção transversal coincidir aproximadamente com a interface entre os dois materiais e os ligadores serem capazes de resistir aos esforços de corte desenvolvidos nessa interface (bem como impedir o afastamento entre as duas camadas).

Diversos sistemas de ligação têm vindo a ser utilizados, como ligadores do tipo cavilha (parafusos ou cavilhas metálicas ou de madeira), varões colados, perfis ou chapas metálicas, ou entalhes praticados nas vigas para assegurar o imbricamento entre a madeira e o betão, ou ainda a combinação de diversos destes sistemas (Figura 1). De entre as várias opções, os entalhes na madeira que serão preenchido

por betão e os ligadores contínuos colados são aquelas que asseguram maior rigidez e melhor efeito compósito.

Os ligadores são geralmente posicionados ao longo das vigas em função da distribuição das tensões de corte, pelo que, numa viga bi-apoiada sujeita a carga uniformemente distribuída, o seu espaçamento será progressivamente crescente desde os apoios até meio-vão.

Figura 1 – Algumas ligações usadas em pavimentos mistos madeira-betão

Este conceito esteve na origem de uma patente de Muller (1922), referido por Yeoh, D., et al (2011), tendo sido sucessivamente aplicado em numerosas obras, numa primeira fase sobretudo na reabilitação de edifícios históricos na Europa. Estendeu-se depois a outras utilizações, nomeadamente a construção de tabuleiros de pontes e, mais tarde, a construção de edifícios novos, um pouco por todo o mundo.

Por comparação com as lajes de betão armado, os pavimentos mistos de madeira-betão têm menor massa, associada a uma menor ação sísmica, permitem o aligeiramento das fundações, maior facilidade de transporte e elevação, e eventual dispensa de cofragem, com menores tempos de construção e menor pegada ecológica.

Por comparação com os pavimentos de madeira, os pavimentos mistos de madeira-betão apresentam maior rigidez, melhor isolamento acústico (por serem mais pesados), maior inércia térmica e eventualmente melhor comportamento ao fogo.

A adição de uma lâmina de betão, a um pavimento de madeira, pode ainda melhorar significativamente o seu comportamento de diafragma, vantajoso para o comportamento sísmico global de edifícios tradicionais de alvenaria e madeira. Registe-se, no entanto, que outras medidas podem ser adotadas no mesmo sentido, como por exemplo, a fixação de placas de derivados de madeira estruturais, com boa rigidez ao corte no plano, aos pavimentos existentes.

A identidade histórica e cultural dos edifícios deverá também ser um fator de ponderação no processo de decisão sobre as diversas soluções para reabilitação de pavimentos de madeira.

3 ENQUADRAMENTO NORMATIVO

Em termos regulamentares, o dimensionamento de pavimentos mistos é atualmente enquadrado pelo Eurocódigo 5, parte 2 (NP EN 1995-2), que apresenta disposições específicas para elementos compósitos madeira-betão e respetivas ligações, embora muito sucintas.

No âmbito do desenvolvimento em curso da nova geração de Eurocódigos estruturais, com publicação prevista para 2027, um conjunto alargado de regras de dimensionamento de pavimentos madeira-

betão foi compilado e publicado numa especificação técnica europeia (CEN/TS 19103, 2021). Prevê-se que essas regras venham a constituir uma nova secção da parte 1 do novo Eurocódigo 5 (EN 1995-1). Enquanto isso não se concretiza, deve ser seguido o estipulado na CEN/TS 19103 (2021).

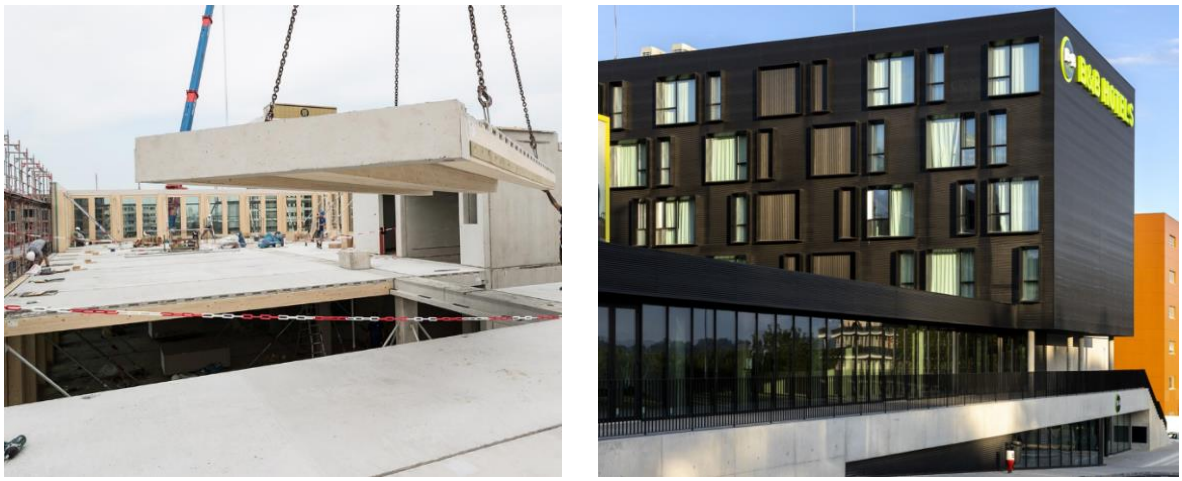
Também a futura versão da EN 1995-2, em preparação, será substancialmente mais extensa e completa, nomeadamente no que se refere a lajes mistas madeira-betão, em articulação com o referido documento. Além disso, prevê-se a publicação de uma nova parte do EC5, a EN 1995-3, cobrindo a execução de estruturas, com regras adicionais.

No caso de intervenções de reabilitação, os documentos normativos a seguir consistem na referida especificação técnica europeia, complementada com informação a retirar dos Eurocódigos, baseando-se, assim, estas intervenções em projetos de dimensionamento estrutural adequados, tendo em conta os materiais existentes, as ações previstas e as condições ambientais de serviço.

4 PAVIMENTOS MISTOS EM CONSTRUÇÃO NOVA

Como referido anteriormente, embora a solução dos pavimentos mistos madeira-betão tenha sido desenvolvida na vertente da reabilitação, com realização *in situ*, mais recentemente ganhou expressão em construção nova através de incorporação em sistemas de prefabricação. Estes sistemas prefabricados são apoiados em Avaliações Técnicas Europeias (ETA) publicados com base em Documentos de Avaliação Europeus (DAE) ou na realização de estudos de viabilidade técnica tendo em conta a regulamentação nacional.

Os pavimentos mistos de madeira-betão têm vindo a ser aplicados na construção de novos edifícios, devido às vantagens que esta solução proporciona (sustentabilidade, exploração otimizada das propriedades de dois materiais de construção distintos). São exemplos alguns sistemas de construção industrializada de edifícios (como o sistema cree – https://www.creebuildings.com/system) ou a produção em fábrica de elementos estruturais isolados a incorporar numa obra (Figura 2).



a) b)

Figura 2 – Exemplos de construção nova segundo um sistema híbrido madeira-betão

5 REABILITAÇÃO E DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA

A reabilitação estrutural de pavimentos de madeira tradicionais é muitas vezes necessária, para assegurar o cumprimento das atuais exigências regulamentares de segurança, em termos de resistência e, sobretudo, de rigidez, bem como para limitação de vibrações ou melhoria do isolamento acústico de forma a respeitar as exigências de conforto na utilização.

Pode ainda ser necessário o reforço estrutural de pavimentos, quando se pretende uma mudança de utilização a que correspondem maiores sobrecargas do que as previstas originalmente.

Uma condição prévia a ações de reforço de pavimentos de madeira é a necessária avaliação do estado de conservação dos elementos de madeira e dos riscos de deterioração inerentes à solução de reforço que venha a ser tomada.

Os agentes de degradação biológica das construções de madeira no nosso país compreendem: fungos de podridão, térmitas subterrâneas e insetos de madeira seca (incluem carunchos e térmitas de madeira seca). É importante referir que diferentes espécies de madeira têm uma durabilidade natural também diferente face aos agentes de degradação biológica. Por exemplo, madeira não tratada de pinho, é considerada pouco durável (EN350, 2016).

Os fungos de podridão atacam a madeira em condições de teor de água elevado, geralmente acima de 20%, sendo frequente a degradação pontual dos vigamentos e soalhos em zonas sujeitas a humidificação acidental (por exemplo, provocadas por roturas de canalizações) ou repetida (em zonas sujeitas a infiltrações pela cobertura ou em contacto com alvenarias exteriores). Nessas situações, a degradação da madeira pode ser intensa, apesar de pontual, comprometendo a capacidade de carga dos elementos afetados e consequentemente a segurança dos pavimentos (Figura 3).

No caso de pavimentos em pisos térreos ou enterrados, com caixas de ar confinadas e não ventiladas, em contacto com ambientes geralmente húmidos, ou outras situações equivalentes, é frequente que toda a madeira do pavimento atinja e mantenha de forma prolongada um teor de água acima dos valores críticos de ataque por fungos, registando consequentemente uma degradação generalizada.

A perda de resistência associada ao ataque por fungos de podridão é difícil de estimar com rigor, pelo que se aconselha uma abordagem conservativa, assumindo que a capacidade de resistência das peças atacadas pode estar comprometida.

a) b)

Figura 3 – Degradação por fungos de podridão afetando unicamente as entregas húmidas (a) e generalizada a todo o vigamento de uma laje de esteira sob cobertura em mau estado (b)

As térmitas subterrâneas podem atacar a madeira em condições semelhantes às descritas anteriormente para os fungos de podridão, ou seja, quando o seu teor de água se encontra acima de valores da ordem de 18-20 %, principalmente (mas não exclusivamente) quando é aplicada em contacto com, ou próxima do solo.

A degradação da madeira causada por térmitas subterrâneas pode ser muito intensa, afetando maioritariamente as extremidades das vigas em contacto com paredes exteriores húmidas, ou zonas sujeitas a infiltrações de água (da chuva ou devidas a canalizações em mau estado; Figura 4).

Em ambientes particularmente húmidos, como por exemplo, caves sem ventilação ou pavimentos térreos aplicados sem os devidos cuidados de isolamento, a infestação por térmitas subterrâneas pode estender-se de forma generalizada a toda a madeira. Os estragos causados são muitas vezes detetados numa fase avançada, pois estes insetos são crípticos, ou seja, os sinais externos de ataque por térmitas subterrâneas são difíceis de detetar, já que o ataque se processa no interior da madeira.

a) b)

Figura 4 – Vigamento com degradação por térmitas subterrâneas, afetando sobretudo as entregas (a) e ataque generalizado por térmitas subterrâneas em piso térreo com caixa de ar não ventilada (b)

Já os carunchos não requerem teor de água elevado da madeira, atacando normalmente elementos aplicados em ambientes interiores secos. As infestações por carunchos tendem a afetar, de forma generalizada, o borne, e por vezes o cerne, dependendo da espécie de caruncho em questão, de toda a madeira aplicada no local.

A degradação causada à madeira pelos carunchos traduz-se em galerias efetuadas no interior da madeira, e a infestação é detetável muitas vezes pelos orifícios de saída dos insetos adultos, já que a fase larvar é a que se alimenta no interior da madeira (Figura 5). Este ataque está associado a uma determinada redução da secção transversal dos elementos de madeira (Parracha et al. 2018). Mesmo que a secção transversal dos elementos não seja significativamente reduzida, as infestações por carunchos podem ser críticas, por comprometer as ligações, por exemplo, entre o vigamento e os forros de teto.

Figura 5 – Vigamento com degradação generalizada por carunchos

As térmitas de madeira seca mais preocupantes, do ponto de vista do ataque a madeira em serviço, pertencem à espécie *Cryptotermes brevis* Walker. Estes insetos, tal como os carunchos, não necessitam de um elevado teor de água dos elementos de madeira para se instalarem. O nível de ataque por térmitas de madeira seca pode atingir proporções preocupantes. O seu comportamento é semelhante ao das térmitas subterrâneas, na medida em que são crípticas, pois os sinais de ataque são normalmente detetados alguns anos após a sua instalação (Parracha et al. 2018), mas podem ocorrer de forma generalizada em zonas do edifício não sujeitas a humidificação (Figura 6).

Figura 6 – Vigamento com degradação por térmitas de madeira seca

Os agentes de degradação biológica dependem de fatores como a temperatura e a humidade relativa do ar, bem como do teor de água dos elementos de madeira, para se instalarem e causar danos (Cruz e Nunes, 2005). Uma das formas de prevenir infestações por estes agentes é manter o teor de água dos elementos de madeira abaixo do nível ótimo para o seu desenvolvimento, o que será indicado apenas para fungos de podridão e térmitas subterrâneas. Os agentes de degradação biológica necessitam também de alimento para se desenvolverem, ou seja, madeira disponível. A durabilidade conferida através de diversos tipos de tratamento (químico, térmico ou outro) poderá alterar as condições de utilização de madeira como fonte de alimento.

A utilização de soluções mistas madeira-betão poderá contribuir positivamente para a prevenção de ataques por agentes de degradação biológica, já que dificulta o acesso aos elementos de madeira, especialmente relevante para a postura de ovos no caso da reinfestação por insetos.

A realização de pavimentos mistos madeira-betão, no âmbito da reabilitação de estruturas antigas, tira partido do vigamento de madeira existente, e eventualmente do soalho (que funciona como cofragem perdida), aos quais é adicionada uma fina camada de betão.

O funcionamento conjunto entre a madeira e o betão é conseguido pela cravação de ligadores, que devem ser devidamente dimensionados e dispostos de forma criteriosa, ao longo de todo o comprimento das vigas, de forma a conseguir uma ligação resistente e rígida.

Existem diversos ligadores comerciais certificados para este efeito, muitas vezes tendo uma parte roscada, que é cravada na madeira, e uma parte lisa que fica embebida no betão. De forma a aumentar a rigidez da ligação, recomenda-se que os ligadores sejam inseridos diagonalmente ao plano de corte, aos pares, sendo os ligadores do par inclinados em sentidos opostos (Figura 7).

Figura 7 – Exemplos de montagem com ligadores de corte comerciais, vendo-se a armadura de distribuição / controlo de fissuração e a barreira impermeabilizante

É também essencial que as vigas de madeira consigam assegurar a sua função na estrutura compósita, pelo que a utilização desta técnica requer uma avaliação cuidada do estado de conservação da madeira, de forma a avaliar se o vigamento apresenta a solidez necessária, nomeadamente ao nível dos apoios.

Outro aspeto que importa acautelar é o isolamento entre a madeira e o betão fresco, para impedir que a água de amassadura seja absorvida pela madeira, material altamente higroscópico, no processo de betonagem e início da cura.

Por esta razão, é necessário fixar uma barreira impermeável sobre a madeira, que poderá ser materializada por uma pintura isolante ou um por um filme plástico com cerca de 200 µm de espessura, preferencialmente transparente para permitir o correto posicionamento dos ligadores de corte durante a sua instalação. Se o filme plástico for demasiadamente fino, existe o risco de que se rompa durante o processo. Nas emendas entre folhas de filme plástico recomenda-se uma sobreposição simples entre 30 e 40 cm. Uma vez que o betão se estende até à parede, o filme plástico deve subir pela parede, em toda a periferia do pavimento, até uma altura de cerca de 40 cm.

Refira-se, por último, que a camada de betão é dotada de armadura de distribuição, geralmente uma rede metálica para controlar a fendilhação (Figura 7).

6 MÁS PRÁTICAS NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS ANTIGOS

Infelizmente, a prática tem mostrado que, em muitas intervenções ditas "de reabilitação" de edifícios, a intervenção envolve a aplicação de betão ou betonilha sobre os pavimentos, mas não respeita em nada as regras básicas de dimensionamento e de execução de pavimentos mistos.

São frequentes as intervenções em que uma camada de betonilha é simplesmente despejada sobre os pavimentos de madeira, com a intenção de os nivelar e, eventualmente, permitir a incorporação de redes de água e esgotos. Em alguns casos, a flecha dos pavimentos antigos ou o seu desnivelamento leva a que essa camada chegue a atingir localmente espessuras de cerca de 20 cm, o que representa um acréscimo de peso considerável.

Por falta de entendimento do funcionamento de uma estrutura compósita, é corrente a total omissão dos ligadores de corte, bem como uma flagrante despreocupação com o estado de conservação dos vigamentos originais, e consequente falta de reparação ou reforço, que possam ser eventualmente necessárias. Resultam, deste modo, vigamentos cujas condições precárias de conservação e de segurança são mantidas, sendo agora sobrecarregados de forma significativa com a adição de uma nova camada que não contribui, como devido, para a capacidade resistente do conjunto.

Um outro aspeto crítico é a falta de colocação da necessária barreira impermeável entre a madeira e o betão, o que permite a absorção significativa de água pela madeira, durante a betonagem. A retenção dessa água permite a manutenção de teores de água elevados na madeira durante períodos prolongados, causando ou acelerando de forma drástica o seu apodrecimento ou infestação por térmitas subterrâneas.

Figura 8 – Pavimentos de cozinhas, evidenciando desligamento entre as camadas de madeira e betonilha e sinais de cedência da estrutura de suporte

Na Figura 8 podem observar-se os resultados da intervenção feita em várias frações de um edifício gaioleiro, em que é visível a deformação dos pavimentos anteriormente "reforçados" com a adição de betonilhas, o desligamento entre a madeira e a camada do material cimentício e a fissuração do revestimento cerâmico devidos à cedência da estrutura de suporte.

As figuras 9 e 10 mostram as consequências desastrosas de uma intervenção incorreta visando o reforço de pavimentos de madeira, feita por simples adição de betonilhas, o que conduziu a um aumento do peso exercido sobre o pavimento de madeira original (a não introdução de ligadores madeira-betão não permite um comportamento solidário entre os dois materiais) e a condições propícias ao apodrecimento da madeira (uma vez que não foi introduzido um filme na interface madeira-"betão" que limitasse a absorção de água pelos elementos de madeira).

Figura 9 – Pavimento que colapsou após adição de betonilha e apodrecimento da madeira

Figura 10 – Pavimento em que a madeira apodreceu, após adição de betonilha, com sinais de rotura e cedência em diversos pontos

7. CONCLUSÕES

Elementos estruturais híbridos (madeira-betão) constituem soluções eficientes e sustentáveis para a construção, ao combinar de forma eficiente num único elemento dois materiais, aproveitando destes a suas melhores características. Na construção nova, estes elementos assentam na prefabricação, garantindo níveis de qualidade elevados na sua execução e colocação em obra, devendo, no entanto, a escolha basear-se em sistemas alvo de Avaliações Técnicas Europeias ou de estudos técnicos por entidades independentes que garantam um comportamento e durabilidade adequados.

A realização de pavimentos mistos em obra, nomeadamente em ações de reabilitação, deve cumprir a normalização ou regulamentação em vigor, sendo necessária a verificação prévia das condições dos elementos de madeira existentes, a atenção cuidada às boas práticas de execução e um dimensionamento adequado da solução a empreender.

REFERÊNCIAS

CEN/TS 19103 (2021). Eurocode 5: Design of timber structures – Structural design of timber-concrete composite structures - Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021.

Cruz, H., Nunes, L. (2005). A madeira como material de construção. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Dias, A.M.P.G., Martins, A.R.D., Simões, L.M.C., Providência, P.M., Andrade, A.A.M. (2015). Statistical analysis of timber-concrete connections — mechanical properties. Computers & Structures, 155:67–84. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.02.036

EN 335 (2013). Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium,2013.

EN 350 (2016). Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2016.

NP EN 1995-1(2022). Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Portugal. 2022.

NP EN 1995-2(2022). Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeira. Parte 2: Pontes. Instituto Português da Qualidade, Portugal. 2022.

Parracha, J., Duarte, S., Faria, P., Nunes, L. (2018). A importância dos insetos de madeira seca na reabilitação de estruturas de madeira. Proceedings of "Construção 2018". Edited by V.P. Freitas and V. Abrantes, Porto, Portugal, 21-23 November 2018. Pp. 771-780.

Yeoh, D., Fragiacomo, M., De Franceschi, M., Boon, K.H. (2011). State of the art on timber-concrete composite structures: literature review. Journal of Structural Engineering, 137(10):1085-1095. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

CARACTERIZAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA DO PALÁCIO NACIONAL DA AJUDA

Helena Cruz[a]; Sónia Duarte[b]; Rogério Mota[c]; Marília Pereira[d]; Simona Fontul[e]; Luís Matias[f]; Ana Isabel Marques[g]; Lina Nunes[b]

[a]Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, helenacruz@lnec.pt, [b] sduarte@lnec.pt, [c] rmota@lnec.pt, [d] marilia@lnec.pt, [e] simona@lnec.pt, [f] lmatias@lnec.pt, [g] aimarques@lnec.pt

RESUMO

A identificação, caracterização e avaliação do estado de conservação de estruturas pode revelar-se particularmente difícil no caso de estruturas antigas com interesse histórico, pelas limitações de acesso e de inspeção relacionadas com a proteção de património classificado.

Esta comunicação descreve um estudo conduzido pelo LNEC no Palácio Nacional da Ajuda, tendo em vista avaliar o estado de conservação e segurança de pavimentos de madeira, focando em particular o Toucador da Rainha e o Atelier do Rei na extremidade poente da Ala sul.

No âmbito de uma abordagem multidisciplinar, foi realizada uma extensa campanha de trabalho de campo, que envolveu: i) inspeção para deteção de problemas relacionados com degradação de madeiras; ii) reconhecimento da composição, localização e geometria de vigamentos nas diversas zonas do pavimento, com recurso a georadar; iii) sondagens pontuais para identificação da madeira e avaliação do seu estado de conservação, por amostragem; e iv) utilização de câmara termográfica para identificação de zonas húmidas no edifício, tendo em vista atuar sobre as causas das anomalias detetadas.

Os resultados obtidos confirmaram o potencial da utilização do georadar e da termografia e de uma abordagem multidisciplinar no âmbito da caracterização e do diagnóstico de estruturas em edifícios.

Palavras-chave: estrutura de madeira, diagnóstico, inspeção, georadar, termografia

1 INTRODUÇÃO

No seguimento da deteção da presença de térmitas subterrâneas em paredes e quadros do Toucador da Rainha do Palácio Nacional da Ajuda (PNA), na extremidade oeste da Ala sul, foi solicitada ao LNEC a avaliação do estado de conservação e segurança das estruturas afetadas e uma proposta de intervenção tendo em vista o controlo da praga.

As térmitas subterrâneas da espécie *Reticulitermes grassei* Clément (Blattodea, Rhinotermitidae) estão amplamente distribuídas em Portugal, ocorrendo na natureza nas raízes e cepos de árvores ou outro material lenhoso existente no solo, sempre que se verifiquem condições favoráveis ao seu desenvolvimento (especialmente um ambiente com humidade elevada). Transitam frequentemente do seu habitat natural para as construções desde que as condições em que a madeira (ou outros materiais celulósicos) esteja aplicada conduzam a um aumento anormal do seu teor de água. Os estragos que as térmitas subterrâneas causam nas madeiras vulneráveis são preocupantes, não só pelo consumo, mas também pelo facto de o ataque se processar no interior das peças, permanecendo o exterior inalterado. Todas as madeiras não tratadas nacionais usadas na construção, e em especial o pinho bravo, são suscetíveis ao ataque por *R. grassei*.

A infestação por térmitas subterrâneas tem sido registada pontualmente, desde há algumas décadas, e sido alvo de intervenções pontuais de tratamento numa tentativa de controlar as infestações. Atendendo à preocupação manifestada pelos responsáveis pelo PNA, os trabalhos da equipa do LNEC incidiram sobretudo na zona do Toucador e WC da Rainha (Piso 1), que registou a mais recente infestação, e no Atelier do Rei (Piso 3), sobrejacente à primeira, no sentido de avaliar a possível extensão dessa infestação ao Atelier, que tinha sofrido uma infiltração severa de água em 2020/21 e a alteração significativa das condições ambientais com o emparedamento das janelas a norte e poente.

Face à intensidade da infestação por térmitas subterrâneas na parede norte do Toucador da Rainha (visível no fasquiado de madeira e no revestimento de seda e outros elementos decorativos) e o abatimento observado no piso na mesma zona, foi acordada a realização de uma sondagem no soalho junto à parede, para verificar os aspetos construtivos relevantes, nomeadamente a constituição e condições de apoio desse pavimento e avaliar localmente a espécie, a qualidade e a eventual degradação biológica da madeira.

Posteriormente, foi considerada oportuna a utilização complementar de métodos não destrutivos de levantamento geométrico, baseados na utilização de georadar, para reconhecimento da localização dos elementos estruturais, fora da zona de sondagem.

Dado que a infestação de madeira por térmitas subterrâneas requer a presença de humidade, capaz de proporcionar um teor de água relativamente elevado (acima de 18-20 %) na madeira, foi igualmente decidido utilizar uma câmara termográfica para localizar zonas húmidas, potencialmente relacionadas com pontos de entrada de água no edifício.

Estes trabalhos foram enquadrados por inspeção visual, do interior do edifício, para deteção e identificação de problemas relacionados com degradação de madeiras, e das fachadas e cobertura, para reconhecimento de potenciais deficiências construtivas ou problemas de conservação, que possam justificar a ocorrência de infiltrações, tendo em vista atuar diretamente sobre as causas das anomalias detetadas.

Os trabalhos realizados no PNA foram iniciados em fevereiro de 2024, na sequência de um inverno particularmente chuvoso, para facilitar a deteção de eventuais infiltrações.

O Real Paço de Nossa Senhora da Ajuda começou a ser construído em 1796. Apesar de inúmeras tentativas, durante os séculos XIX e XX, com vários projetos de remate, só em 2016 se iniciou finalmente o projeto e as obras necessárias ao remate poente do PNA para instalação do Museu do Tesouro Real. A nova Ala do PNA foi inaugurada em junho de 2021. Sabe-se que as coberturas originais de madeira de parte da Ala sul foram reconstruídas em betão armado no âmbito das extensas obras de requalificação realizadas nos anos setenta do século XX, permanecendo com estrutura de madeira as coberturas do Piso 4 localizadas sobre o Atelier do Rei (Piso 3). Tendo em conta as imagens disponibilizadas no Google Earth Pro (consultado em maio de 2024), entre o final de 2020 e o início de 2021 decorreram obras de alteração das coberturas da extremidade poente da Ala sul, sobre as zonas que são objeto do presente estudo.

Embora não tenha havido acesso a informação sobre datas e características de intervenções anteriores nas coberturas, nas visitas realizadas pelo LNEC em 2024 verificou-se que as coberturas de toda a Ala sul são constituídas por elementos de betão armado, sobre laje de esteira em betão com vigotas e abobadilha cerâmica.

2 INSPEÇÃO VISUAL

2.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Foi aberta uma janela de inspeção no pavimento do Toucador da Rainha, através de corte pontual do soalho junto à parede interior paralela à fachada, na zona de maior abatimento do pavimento. Nesta zona, o afastamento vertical entre o rodapé e o soalho atingia cerca de 60 mm (Figura 1).

a) b)

Figura 1 – Afastamento entre o pavimento e a parede interior no
Toucador da Rainha (a) e sinais de infestação na parede interior norte (b)

O corte do soalho foi feito de modo a não afetar as vigas e a facilitar a reparação subsequente e minimizar o seu impacto visual. Foi também usada a abertura de ventilação da caixa de ar do pavimento, junto da fachada, para inspecionar a outra extremidade da estrutura (Figura 2). As observações efetuadas nestas duas zonas permitiram verificar que o soalho, aparentemente de madeira de casquinha, com cerca de 33 mm de espessura, assenta sobre um vigamento composto por duas ordens de vigas, de madeira maciça. As características anatómicas da madeira das vigas observadas sugerem tratar-se de pinho.

Nas zonas expostas, a 2ª ordem do vigamento, imediatamente abaixo do soalho, é constituída por vigas orientadas na direção norte-sul, com dimensões (11 x 7) cm e espaçamento entre eixos de 37 cm. A 1ª ordem de vigamento, orientada paralelamente à fachada, é constituída por vigas com a mesma secção transversal e espaçamento entre eixos de 120 cm apoiadas sobre o embasamento irregular ou em vão em alguns pontos.

A partir do orifício de ventilação, observou-se que a viga inferior, mais próxima da fachada, se encontra interrompida nessa zona, supostamente para facilitar a circulação de ar. Neste local, a base da caixa de ar (que coincide aproximadamente, com a parte inferior do orifício de ventilação) situa-se cerca de 57 cm acima da superfície da varanda adjacente.

a) b)

Figura 2 – Estrutura do pavimento no Toucador da Rainha: a) vista a partir da janela de inspeção e b) vista a partir do orifício de ventilação na fachada

Pode igualmente observar-se o tarugamento das vigas superiores, a existência de entalhes nas ligações entre as duas ordens de vigas e a presença de cunhas de madeira sobre as vigas superiores, para nivelamento do soalho. Constatou-se também a presença de entulho diverso (pedras e pedaços de madeira) sobre o embasamento, sugerindo que o vigamento de primeira ordem terá uma base de apoio irregular. A caixa de ar tem altura muito variável, que pode atingir cerca de 50 cm em alguns pontos. Até onde foi possível observar, nas zonas de prospeção, as entregas das vigas na parede estavam secas e sem degradação significativa por fungos de podridão ou por insetos.

2.2 ESTADO DE CONSERVAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MADEIRA

A avaliação do estado de conservação dos elementos de madeira foi efetuada por inspeção visual e, quando adequado, com recurso a um instrumento afiado, sendo complementada com a medição do teor de água da madeira através de um humidímetro de contacto.

O ataque por térmitas verificado na parede do Toucador da Rainha já se encontrava inativo à data das visitas (Figura 2b). Através da janela de inspeção no Toucador da Rainha, foi possível comprovar o bom estado geral das vigas de suporte do pavimento, com sinais de ataques pontuais de caruncho pequeno, e alguns fungos de podridão, mas de extensão pouco assinalável. Um dos tarugos observado demonstrou sinais de ataque severo por térmita subterrânea (Figura 3a), sem responsabilidade no desnível observado. Na zona do WC foram detetados vestígios de térmitas subterrâneas, nos rodapés e pavimento da zona noroeste, onde está instalado o sanitário e bidé. Em nenhum local se verificou teor de água dos elementos de madeira acima dos 14 %, exceto nas caixilharias das janelas a sul, que, no entanto, não exibem sinais de agentes de degradação biológica.

No Atelier, foram identificados em algumas zonas do pavimento sinais de ataque inativo por térmita subterrânea e por caruncho pequeno (Figura 3b) O teor de água das peças de madeira do pavimento oscilava entre 11 % e 14 %, sendo mais elevado na zona onde as peças estavam levantadas devido à infiltração assinalada anteriormente (15 %).

a) b)

Figura 3 – Vestígios de ataques por térmitas subterrâneas: a) tarugo observado através da janela de inspeção aberta no Toucador da Rainha e b) pavimento do Atelier do Rei.

Embora a equipa do LNEC tenha desenvolvido maiores esforços de inspeção no Toucador e WC da Rainha (Piso 1) e no Atelier do Rei (Piso 3), foram igualmente avaliados outros locais, de forma a reconstituir a história recente das obras realizadas e verificar anteriores ocorrências. No decurso dessa atividade, foi detetada a presença de térmitas ativas na caixilharia de madeira de uma janela exterior do WC do Piso 4. Nas restantes zonas, não foi detetado nenhum vestígio que indicasse a presença de térmitas ativas, apesar de não ser de excluir esta possibilidade, dado o caráter críptico destes insetos.

No Atelier do Rei foram observadas marcas antigas de infiltração de água na parede este (sob a zona de transição das coberturas originais) e os resultados de uma infiltração de água, ocorrida durante a construção da fachada poente, que danificou severamente o piso decorativo em madeira (Figura 4).

Figura 4 – Parede com sinais de escorrência antigos e pavimento degradado no Atelier do Rei

2.3 ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA ENVOLVENTE

Conforme referido, as coberturas originais da Ala sul do edifício foram sucessivamente substituídas por estruturas de cobertura de betão armado, sobre lajes de esteira aligeiradas de betão com vigotas e abobadilhas cerâmicas. Admite-se que esta solução terá resolvido as entradas de água pela cobertura para os compartimentos subjacentes.

Verificou-se que a junta entre o edifício antigo e a nova Ala poente não foi concluída, permitindo a franca entrada de água entre os dois edifícios. Apesar disso, não foi detetada humidade nas paredes poente, quer no Atelier do Rei (Piso 3) quer no Toucador da Rainha (Piso 1), admitindo-se que a água infiltrada nessa junta de grandes dimensões (cerca de 12 cm de largura) seja encaminhada diretamente para os pisos inferiores. Além de persistirem diversas guardas provisórias precárias ao nível da cobertura, também as paredes do saguão partilhado pelas Alas sul e poente não foram concluídas, permitindo a infiltração de água para o interior do edifício, como é patente junto a uma janela emparedada do Atelier do Rei (Figura 5).

a) b) c) d)

Figura 5 – Estado de conservação da envolvente: a) e b) junta entre a Ala poente e a Ala sul; c) paredes inacabadas no saguão poente e d) sinais de humidade na janela emparedada

3 RECONHECIMENTO DA LOCALIZAÇÃO DAS VIGAS - GEORADAR

3.1 METODOLOGIA E EQUIPAMENTO

Para identificação da localização e da orientação das vigas foi utilizado um método não destrutivo baseado em ondas eletromagnéticas. O equipamento utilizado, georadar (Ground Penetrating Radar – GPR), permite a deteção de mudanças na estrutura, até uma dada profundidade, dependendo da frequência das antenas (Fontul *et al*., 2018). O método consiste na emissão e receção de ondas eletromagnéticas, de uma dada frequência, através do material e análise do sinal recebido. Quanto maior a frequência, maior a resolução da resposta e mais reduzida a profundidade de medição. Utilizou-se o equipamento SIR 4000, da GSSI, com antenas de frequência 1,6 GHz e de 2,6 GHz.

3.2 PROCEDIMENTO

Com o objetivo de identificar indiretamente alguma variação sob o soalho no local onde ocorreu a subsidência que pudesse explicar a sua origem, foi executado um perfil com georadar paralelamente à parede (Perfil 1, na Figura 6). Com este perfil identificou-se, desde logo, o posicionamento das vigas transversais de suporte do soalho (perpendiculares à parede em estudo). Com base neste resultado, foi escolhido o local mais adequado para a abertura de uma janela de inspeção (sondagem), sensivelmente a meio da parede, onde o sinal do georadar apontava para a presença de duas vigas com menor afastamento entre si.

Figura 6 – Toucador da Rainha. A – Representação esquemática dos perfis de georadar, orientação das vigas e localização da janela de inspeção; B - Execução de perfil de georadar paralelamente à parede objeto de estudo; C - Execução de perfil de georadar perpendicularmente à parede

A validação da existência e dimensão das vigas, para interpretação dos registos do georadar (radargramas), foi feita com base na estrutura exposta pela sondagem. Foram igualmente executados perfis perpendicularmente à parede, para identificação da localização das vigas longitudinais, procurando que ficassem alinhados ora com a posição das vigas transversais, ora entre estas. A Figura 7 apresenta, esquematicamente, os perfis executados, a orientação das vigas e a localização da janela de inspeção e alguns aspetos dos ensaios realizados.

Nos registos obtidos com o georadar foi medido o tempo de propagação, de ida e volta, da onda eletromagnética através dos vários elementos ensaiados. Para se determinar a espessura destes elementos é necessário conhecer a velocidade de propagação da onda em cada material, a qual depende, entre outros fatores, da constante dielétrica do meio, *k*. Segundo Davis e Annan (1989) a relação entre a velocidade de propagação no vazio, *c* (3x 10^8 ms^{-1}), e no meio em estudo, *v*, é dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

Considerando que v=2h/t (sendo h o espaço percorrido pela onda entre o emissor e a interface e entre esta e o recetor, e t o tempo total deste percurso), podemos estimar a espessura de cada material atravessado pelas ondas eletromagnéticas com base na seguinte expressão, em função de *k*:

$$h = \frac{0{,}3\ t}{2\sqrt{k}} \quad (2)$$

Sempre que possível, deve-se calibrar os resultados do georadar com dados de espessura medidos nos elementos ensaiados. A janela de inspeção possibilitou a medição das espessuras do soalho, das vigas transversais e longitudinais e da profundidade da caixa de ar até ao embasamento.

3.3 RESULTADOS

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam exemplos dos resultados obtidos com o georadar no Toucador da Rainha. São apresentados três perfis, um longitudinal e dois transversais. Considerando k= 4 na equação (2), para a constante dielétrica na madeira (Rodrigues et al. 2021), e k=1 para o ar, é, assim, possível estimar as espessuras do soalho e da viga superior, aos 3,6 m de distância do Perfil 1, representado através do radargrama apresentado na Figura 7, e as espessuras do soalho e do espaço de ar entre este e o embasamento no mesmo perfil, aos 3,8 m de distância (Quadro 1).

No Perfil 2, executado entre duas vigas superiores, foi possível identificar a posição das vigas longitudinais (inferiores), assim como o embasamento. No Perfil 3, executado 0,10 m ao lado, sobre uma viga superior, apenas é possível identificar a interface inferior desta viga e o embasamento. Nestes perfis a caixa de ar entre o soalho e o embasamento varia entre cerca de 32 cm e 44 cm.

Quadro 1 – Resultados obtidos, para a espessura dos materiais, no local da janela de inspeção

Elemento/Material	k	Espessura aos 3,6 m (cm)		Espessura aos 3,8 m (cm)	
		medida	estimada	medida	estimada
Soalho	4	3,3	3,2	3,3	3,2
Viga transversal /superior	4	10,7	10,6	-	-
Ar	1	20	?	32	33

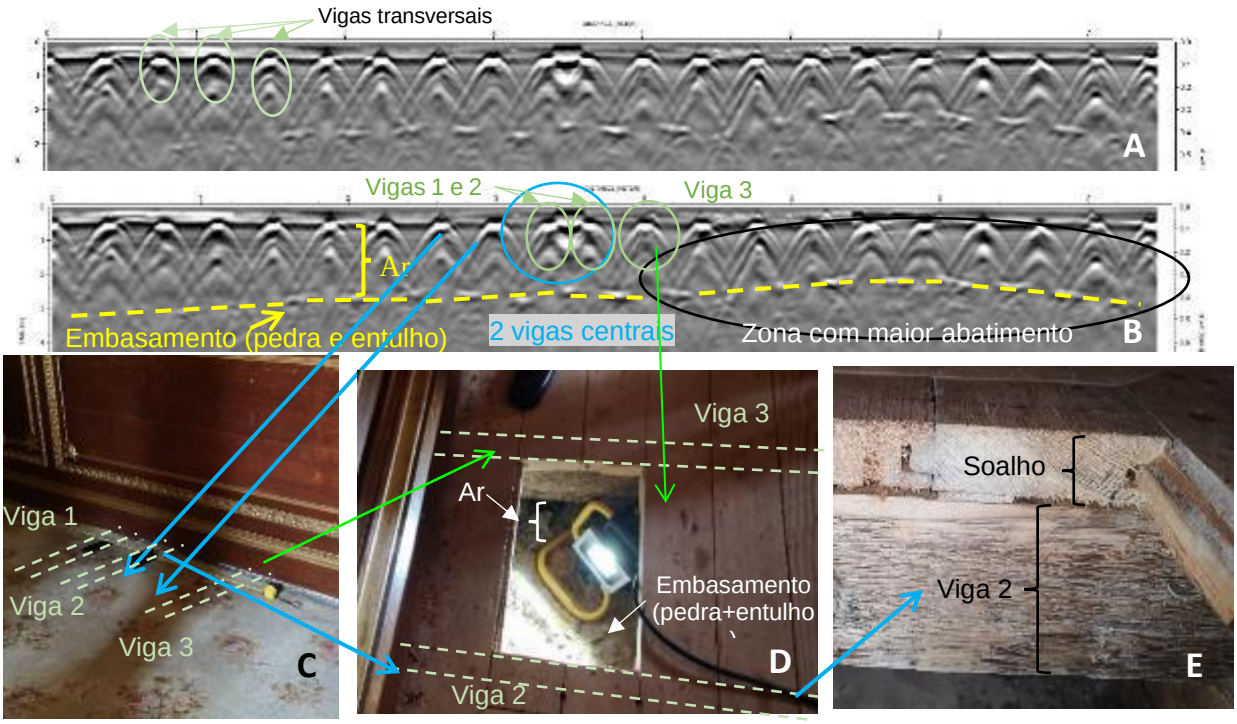
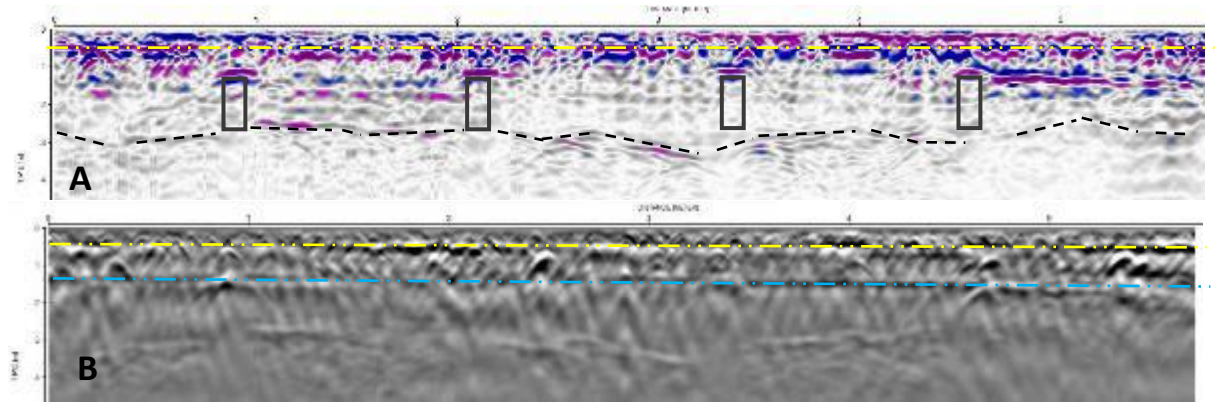


Figura 7 – Toucador da Rainha – resultados obtidos no chão, ao longo da parede. **A** – Radargrama obtido com a antena de 1,6 GHz no Perfil 1 (ver Figura 6); **B** – Radargrama com interpretação; **C** – Visualização da posição onde foram identificadas duas vigas transversais centrais (Vigas 1 e 2) com pequena separação entre si (as linhas a tracejado assinalam as posições das duas vigas e da Viga 3); **D** - Janela de inspeção, sendo visível a Viga 3; **E** – Viga 2, vista pela janela de inspeção



LEGENDA

- Viga longitudinal/inferior
- Interface ar/embasamento
- Interface soalho/viga superior
- Interface viga superior/ar

Figura 8 – Toucador da Rainha – resultados obtidos no chão, perpendicularmente à parede. **A** – Radargrama interpretativo obtido no Perfil 2, perpendicular à parede e ao Perfil 1 (ver Figura 6), com início no ponto 0,30 m do Perfil 1; **B** – Radargrama com interpretação do Perfil 3, perpendicular à parede e com início no ponto 0,40 m do Perfil 1.

Nos registos obtidos no Toucador da Rainha foi possível identificar a localização das vigas de madeira de suporte do soalho. Verifica-se que a distância entre as vigas transversais é aproximadamente constante e igual a 37 cm, e a distância entre as vigas longitudinais é de cerca de 120 cm. Detetaram-se, ainda, as interfaces entre os vários materiais, o que permitiu estimar as espessuras do soalho, da viga superior e do espaço de ar sob o soalho até ao topo do embasamento (entre as vigas de madeira).

4 DETEÇÃO DE PONTOS DE ENTRADA DE ÁGUA - TERMOGRAFIA

4.1 METODOLOGIA E EQUIPAMENTO

Para a deteção de possíveis pontos de entrada de água através da envolvente exterior do edifício, e consequente presença de humidade nos elementos constituintes, utilizou-se o método de Termografia de Infravermelhos (TIV). A TIV é uma técnica não-destrutiva que permite, através da medição da radiação térmica emitida e refletida pelas superfícies dos elementos em observação, na gama dos infravermelhos, representar a temperatura superficial desses elementos com ausência de contacto do elemento em análise (termograma). Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**9 apresenta-se a câmara termográfica utilizada no ensaio realizado no presente estudo.

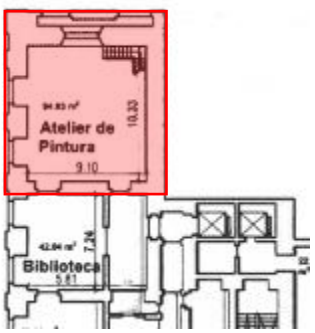
A TIV é utilizada em diferentes áreas da Engenharia Civil, revelando ter potencial em estudos de avaliação da qualidade térmica de edifícios e sistemas de climatização, conservação do património histórico e inspeção da envolvente de edifícios (Lourenço, 2017).

O sucesso da aplicação da referida técnica depende da existência de fenómenos de transmissão de calor no elemento do edifício em análise, a fim de se obterem padrões térmicos que tornem possível a deteção e identificação de heterogeneidades existentes no interior desse elemento (destacamentos, vazios ou presença de humidade). No caso de presença de humidade podem-se detetar diferenças de temperatura, pelo facto de a mudança de estado correspondente à evaporação, que é acompanhada por uma absorção de calor pela humidade, provocar um arrefecimento localizado da superfície.

4.2 PROCEDIMENTO

Com o intuito de detetar possíveis infiltrações de água, utilizou-se a TIV para avaliar a presença de humidade na envolvente do edifício, nomeadamente, em paredes interiores e exteriores, no WC e no Toucador da Rainha (Piso 1) e no Atelier do Rei (Piso 3), conforme indicado na Figura 9, onde ocorreram infiltrações de água, há cerca de 3 anos e, consequentemente, o aparecimento de térmitas. Nesse sentido, foram realizadas inspeções termográficas de Infravermelhos nos referidos espaços, entre 21 de fevereiro e 20 de março, no seguimento de períodos de elevada precipitação.

Piso 1



Piso 3

Figura 9 – Locais de medição e equipamento de termografia de infravermelhos (TIV)

4.3 RESULTADOS

Face ao exposto, apresentam-se de seguida os resultados obtidos da análise termográfica efetuada (fotografia e termograma), respetivamente, na parede adjacente à Ala poente, em ambas as salas (Figura 10), e em paredes interiores dos mesmos espaços, onde anteriormente ocorreram sinais da presença de humidade (Figura 11).

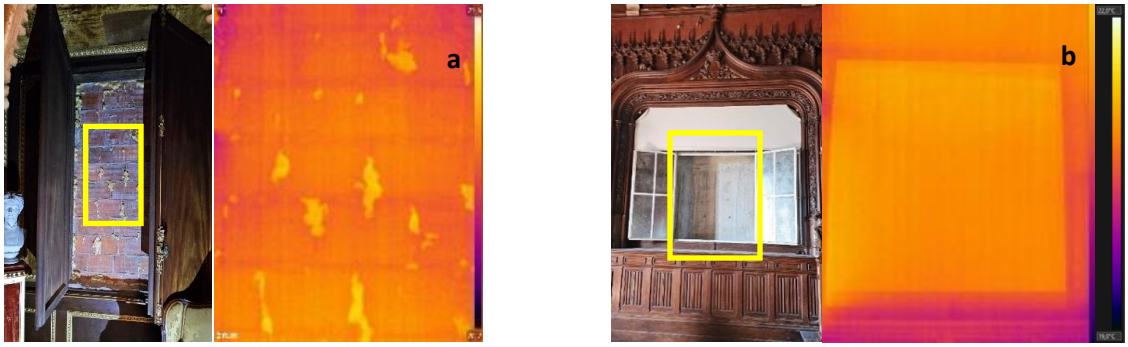


Figura 10 – Fachada em contacto com a nova ala do Palácio:
a) Toucador da Rainha (Piso 1); b) Atelier do Rei (Piso 3)

Figura 11 – Parede interior dos espaços analisados:
a) Toucador da Rainha (Piso 1); b) Atelier do Rei (Piso 3)

A análise das figuras anteriores permite concluir que, face aos diferentes padrões de temperaturas registados, não é detetável a presença de humidade nas áreas analisadas com o método termográfico. Salienta-se que este facto foi confirmado através de realização de medições pontuais com um humidímetro portátil. Registe-se ainda que na Figura 11b é possível identificar a estrutura de madeira de suporte do revestimento interior, através da utilização da termografia de infravermelhos.

5 CONCLUSÕES

Os trabalhos de campo realizados pelo LNEC no PNA, entre fevereiro e maio de 2024, e a análise da informação coligida permitiram concluir o seguinte:

- No período em apreço foram observados diversos sinais de ataque por térmitas subterrâneas, em pavimentos e caixilharia de portas e janelas do PNA, nomeadamente no Toucador da Rainha (Piso 1). Trata-se, na grande maioria dos casos, de infestações não ativas, encontrando-se a madeira seca (com valores de teor de água abaixo do limite de risco para estes insetos);
- Apenas se registou uma infestação ativa por térmitas subterrâneas na caixilharia exterior das instalações sanitárias situadas no Piso 4;

- A utilização de termografia de Infravermelhos em várias salas do PNA confirmou as medições feitas com humidímetro de contacto, no sentido de não ter sido detetada a presença de humidade nos materiais constituintes de pavimentos e paredes que sugira atualmente a existência de infiltrações de água ativas;
- Nestas circunstâncias, considera-se que as infestações registadas no Toucador e WC da Rainha (Piso 1) em 2023 resultaram de condições ambientais extremas, de caráter acidental, neste caso a infiltração de grandes quantidades de água, possivelmente relacionada com as obras do fecho da Ala poente e substituição das coberturas antigas do edifício, que potenciaram o acesso de térmitas subterrâneas residentes nas imediações;
- A observação do pavimento do Toucador da Rainha (Piso 1), que apresenta um abatimento considerável sob a parede interior (o qual atinge cerca de 60 mm na parede entre as duas portas) revelou a existência de duas ordens de vigas de madeira cruzadas, sob o soalho, a inferior com orientação este-oeste, assente sobre o embasamento irregular, e a superior com orientação norte-sul, com ligação às primeiras por entalhe e pregagem;
- A inspeção da estrutura do pavimento do Toucador da Rainha, feita a partir da janela de inspeção e a partir do orifício de ventilação na fachada, embora limitadas em termos da área observada, sugerem a inexistência de problemas estruturais ou de conservação do vigamento de madeira que justifiquem o abatimento do piso sob a parede interior;
- Desta forma, tendo em conta a irregularidade da base de assentamento das vigas inferiores e a evidência de rotação de algumas vigas superiores sobre o respetivo apoio, com arrancamento parcial dos pregos de ligação no cruzamento das vigas (junto à fachada), admite-se que o abatimento do pavimento do Toucador da Rainha (Piso 1) sob a parede interior tenha resultado do escorregamento de algumas vigas sobre os apoios, eventualmente durante um sismo ou por vibrações induzidas por obras realizadas na envolvente;
- Estando o movimento das vigas limitado pela altura da caixa de ar, e não havendo indícios de um processo de degradação biológica desta madeira em curso, considera-se que a deformação deste pavimento não configura uma situação de risco ou falta de segurança estrutural;
- A utilização de georadar provou ser uma técnica eficaz para identificação da constituição dos pavimentos, permitindo confirmar que a estrutura do pavimento do Toucador da Rainha (Piso 1) tem uma constituição relativamente uniforme e que a caixa de ar apresenta profundidade variável em todo o compartimento;
- O cruzamento da informação recolhida pela utilização do Georadar com as inspeções feitas no interior e exterior das salas do Piso 1 – ala sul permite estimar que a base de assentamento dos pavimentos dessas salas se situa sempre acima da face superior da varanda adjacente, situação favorável do ponto de vista da conservação destes pavimentos, mas que não dispensa cuidados frequentes com a limpeza e a manutenção da varanda para evitar a acumulação de água, terra e restos vegetais. Este plano de manutenção poderá incluir o refechamento das juntas das pedras de revestimento da varanda;
- Embora a substituição das coberturas no extremo oeste da Ala sul tenha reduzido significativamente as infiltrações de água para o interior do PNA nesta zona, persistem algumas situações relacionadas com a falta de conclusão dos trabalhos iniciados em 2020/2021, que importa resolver, nomeadamente o reboco das paredes do saguão junto à fachada poente e o fecho da junta entre a fachada poente e a Ala sul;

- O historial de infestações por térmitas subterrâneas no PNA nos últimos 30 anos mostra que elas estão presentes no local, manifestando-se de forma mais visível sempre que as condições ambientais o permitam. Desta forma, recomenda-se a adoção de um plano de controlo integrado de pragas, adaptado ao cariz museológico do PNA, tendo em conta o valor do seu acervo, e o frequente surgimento de problemas associados à degradação biológica de madeira do edifício (entre outros agentes de biodegradação de diversos materiais existentes nas coleções do PNA).
- Na zona do WC da Rainha (e eventualmente do Atelier do Rei) é aconselhável verificar o estado do pavimento e das vigas de suporte, e avaliar a necessidade de substituição de elementos de madeira cujo nível de ataque por térmitas seja elevado e comprometa a função estrutural. A existir substituição, deverá ser feita por madeira tratada ou naturalmente durável.
- Deve-se evitar qualquer fonte de humidificação das madeiras aplicadas, nomeadamente: i) com as caixilharias, que deverão ser melhoradas em termos da sua estanquidade, de forma a prevenir não só a entrada de água, mas também a entrada de insetos; ii) assegurar uma boa ventilação dos elementos estruturais de madeira, nomeadamente a nível das caixas de ar; iii) a interface entre o PNA e o novo edifício construído deverá ser alvo de obra que permita eliminar as entradas de água no PNA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a autorização para divulgação do trabalho efetuado, por parte do Diretor do PNA, Dr. José Alberto Ribeiro, bem como o acompanhamento prestado pela equipa de Conservação e Restauro liderada pela Drª Manuela Santana.

A componente de georadar teve o apoio financeiro da FCT, através do projeto com a referência PTDC/HAR-HIS/5288/2020.

REFERÊNCIAS

Davis, J.L., Annan, A.P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37:531-551. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x

EN 350:2016 – Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. European Committee for Standardization, 2016.

Fontul, S., Solla, M., Cruz, H., Machado, J. S., Pajewski, L. (2018), Ground Penetrating Radar Investigations in the Noble Hall of São Carlos Theater in Lisbon, Portugal. Surv Geophys (2018) 39: 1125. https://doi.org/10.1007/s10712-018-9477-z

Lourenço, T., Matias, L., Faria P. (2017) Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. Construction & Building Materials, 148, 419-428 (September 2017). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.052

Rodrigues, B.P., Senalik, C.A., Wu, X, Wacker, J. (2021). Use of Ground Penetrating Radar in the Evaluation of Wood Structures: A Review. Forests 2021, 12, 492. https://doi.org/10.3390/f12040492

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DESEMPENHO DE UM REVESTIMENTO POLIMÉRICO PARA MITIGAÇÃO DE REAÇÕES EXPANSIVAS DE ORIGEM INTERNA NO BETÃO

João Custódio[a]; Helena Silva[b]; Sílvia Pereira[b]; Susana Cabral Fonseca[b]; António Bettencourt Ribeiro[b]; Filipa Morais[c]; Simão Pereira[c]; Luís Antunes[d]; Mariana Pinto[d]

[a]LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, jcustodio@lnec.pt

[b]LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

[c]Norscut, Concessão de Auto-Estradas, S.A., Rua Filipe Folque, 10J, 1.º Dto., 1050-113 Lisboa, Portugal

[d]Qi-Technologie, QITCST Lda., Rua Gervásio Lobato, 15 Armazém C, Casal do Marco, 2840-187 Seixal, Portugal

RESUMO

Nas últimas décadas tem sido detetado, em Portugal e no estrangeiro, um número significativo de casos de degradação de estruturas de betão de grande importância estratégica, como barragens, pontes e viadutos, em resultado da ocorrência de reações químicas expansivas de origem interna - reação álcalis-sílica (RAS) e reação sulfática interna (RSI). Sendo que o seu desenvolvimento requer a presença no betão de um teor de humidade elevado e pode provocar a expansão do betão, a qual, em determinadas circunstâncias, pode resultar na sua fendilhação.

A fendilhação promove outros processos de degradação do betão nas estruturas, uma vez que facilita a penetração de agentes agressivos, e.g., a água, os cloretos, o dióxido de carbono; conduzindo, desta forma, à diminuição da vida útil da estrutura e, em última instância, à sua demolição precoce.

Os sistemas de proteção superficial, desde que possuam propriedades adequadas, podem funcionar como uma barreira física à penetração de agentes agressivos, e ser utilizados em estratégias de prevenção e mitigação dos vários mecanismos de degradação que possam ocorrer nas estruturas de betão. No caso particular destas reações expansivas, os revestimentos aplicados na superfície do betão podem ajudar a reduzir o seu impacto, por controlo da humidade no interior do betão.

Nesta comunicação apresenta-se uma compilação dos critérios que devem ser utilizados na seleção de revestimentos poliméricos para aplicação em estruturas de betão afetadas por reações expansivas. São ainda apresentados os resultados preliminares de um caso de estudo, em que se avalia o efeito da aplicação de um revestimento polimérico, selecionado tendo em consideração os referidos critérios, no betão de uma estrutura afetada por reações expansivas internas.

Palavras-chave: Revestimentos poliméricos para proteção superficial do betão; Mitigação de reações químicas expansivas internas; Reação Álcalis-Sílica; Reação Sulfática Interna; Reabilitação/Reparação estruturas de betão.

1 INTRODUÇÃO

Sob a designação de reações químicas expansivas de origem interna no betão englobam-se as reações álcalis-agregado e as reações sulfáticas.

As reações álcalis-agregado são reações químicas que envolvem alguns constituintes reativos dos agregados e os iões hidroxilo e alcalinos (de sódio e potássio) presentes na solução dos poros do betão. Este tipo de reações divide-se em dois tipos: (i) as reações álcalis-sílica e álcalis-silicato, que são as mais frequentes e surgem, geralmente, englobadas na mesma designação de reações álcalis-sílica, e em que intervêm agregados contendo formas de sílica amorfa ou mal cristalizada e certos minerais siliciosos reativos aos álcalis; e (ii) as reações álcalis-carbonato, que envolvem certos calcários dolomíticos, mas cuja ocorrência no betão ainda não foi detetada em Portugal.

As reações sulfáticas de origem interna são reações químicas que envolvem o anião sulfato e resultam na formação de etringite, sendo que os sulfatos provêm de constituintes do próprio betão. A etringite formada nos estágios iniciais de hidratação não se traduz em expansões deletérias e ocorre normalmente durante a hidratação do ligante no betão. No entanto, a etringite pode, também, formar-se meses ou anos mais tarde, se o betão for sujeito a temperaturas elevadas, especialmente nas primeiras idades, como resultado, quer de tratamentos térmicos quer do desenvolvimento do calor de hidratação nos betões em massa ou com elevadas dosagens de cimento, na presença de sulfatos em quantidade suficiente. A temperaturas elevadas, a etringite resultante do processo de hidratação do cimento instabiliza, formando-se preferencialmente monosulfoaluminato de cálcio, que mais tarde, com a diminuição da temperatura, a migração de sulfatos e a presença de humidade, se converte em etringite, correntemente designada por etringite retardada, numa fase em que pode conduzir à degradação do betão. Neste caso, o fenómeno reação sulfática de origem interna (RSI) é usualmente designado por formação retardada de etringite ou ataque por sulfatos internos induzido pelo calor.

Destas, a reação álcalis-sílica (RAS) e a reação sulfática interna (RSI) têm sido a origem de um número muito significativo de problemas em estruturas de betão em quase todo o mundo. Em geral, as primeiras manifestações de dano no betão associadas à RSI ocorrem antes de uma década após a construção, enquanto as primeiras manifestações de dano associadas à RAS ocorrem depois de períodos mais dilatados, que podem atingir várias décadas. No entanto, se as condições forem propícias, ambas as reações podem ser identificadas no betão ao fim de poucos anos.

Como referido, a RAS e a RSI originam, em determinadas condições, a formação de compostos com características expansivas, que podem levar à fendilhação e perda acentuada da resistência do betão. As consequências da degradação precoce do betão têm implicações económicas muito significativas, uma vez que a RAS e a RSI são normalmente observadas em obras de grande dimensão e os trabalhos necessários para a sua mitigação envolvem grandes áreas de reconstrução, técnicas complexas e materiais de reparação muito dispendiosos. Em algumas situações, para além das implicações económicas, acrescem implicações para a sociedade por interrupção na utilização dessas estruturas (por exemplo, pontes, viadutos ou barragens).

Em Portugal, estas reações estão presentes em várias dezenas de infraestruturas. Relativamente a pontes e viadutos, o primeiro caso foi detetado no início da década de 1990 no Viaduto Duarte Pacheco, em Lisboa. Atualmente, existem mais de 50 obras de arte nas quais se confirmou a presença da RAS e da RSI, com diferentes graus de desenvolvimento. Estas estruturas encontram-se distribuídas de forma relativamente uniforme no país. Destas, os casos mais emblemáticos dizem respeito à rede viária da albufeira da Aguieira, que engloba sete obras de arte, construídas entre 1976 e 1979. A construção da barragem da Aguieira tornou necessária a remodelação da rede viária, de modo a

restabelecer a circulação na zona afetada pela respetiva albufeira. Neste contexto, foram construídas sete pontes – Ponte sobre o Rio Criz I, Ponte sobre o Rio Criz II, Ponte de São João das Areias, Ponte sobre o Rio Mondego em Cunhedo, Ponte sobre a Ribeira de Mortágua e Ponte sobre o Rio Dão em Santa Comba Dão. O desenvolvimento gravoso da RAS e da RSI no betão destas obras de arte motivou a realização de intervenções de fundo para manter a função, o tempo de vida útil de projeto e a segurança das mesmas. As ações de reabilitação desenvolveram-se entre 2013 e 2017. Numa das obras, a ponte sobre o Rio Dão em Foz do Dão, a reabilitação não se apresentou como uma solução viável face à elevada profundidade do rio onde se encontram implantados os pilares e as fundações, tendo sido necessário proceder-se à sua desativação e à construção de uma nova Ponte, inaugurada em 2015, para assegurar a continuação da função que a anterior desempenhava (Custódio *et al.*, 2023). No que diz respeito a barragens, existe uma predominância da RAS relativamente à RSI, estando a presença da RAS associada ao tipo de formações geológicas presentes no local de implementação das barragens. Atualmente, das 60 barragens de betão, com observação contínua acompanhada pelo LNEC, cerca de 20 barragens estão afetadas por reações expansivas, tendo os primeiros casos sido detetados na década de 1980, nomeadamente na barragem do Alto Ceira e na barragem de Pracana. As barragens afetadas localizam-se no norte e no interior sul, em zonas de predominância de rochas graníticas e xistentas, e na zona central, onde ocorre o maciço xisto-grauváquico, no qual existem muitas intrusões quartzíticas. A barragem do Alto Ceira foi substituída em 2013, já que não era viável a sua reabilitação. Há três barragens que apresentam valores médios das extensões acumuladas no tempo superiores a 1000×10^{-6} (Santa Luzia – barragem de abóboda concluída em 1942, Pracana – barragem de contrafortes concluída em 1951, e Fagilde – barragem de gravidade concluída em 1984). A barragem de Fagilde constitui o único caso em que a RSI é largamente predominante em relação à RAS. As barragens do Alto Ceira, de Pracana e de Santa Luzia, todas localizadas no maciço xisto-grauváquico das Beiras, foram construídas com agregados quartzíticos, pelo que experimentaram deteriorações severas devida à RAS. A barragem de Pracana sofreu importantes obras de reabilitação na década de 1980. Atualmente apenas a barragem de Fagilde apresenta taxas de expansão anuais superiores a 100×10^{-6}. Nas outras barragens afetadas os processos de deterioração são ainda de pequena a moderada magnitude (valores acumulados no tempo até cerca de 500×10^{-6}), mas em algumas delas as taxas de expansão têm aumentado nos últimos anos (Batista, 2022).

Para que a RAS tenha lugar, é necessário que se verifiquem em simultâneo as seguintes condições: (a) teor crítico de sílica reativa nos agregados; (b) alcalinidade suficiente nos poros do betão; e (c) água em quantidade suficiente (atualmente, considera-se ser necessária uma humidade relativa interna de pelo menos 80 % para suportar um desenvolvimento expansivo da RAS (Fournier and Bérubé, 2000; Poyet *et al.*, 2006; Poyet *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2012)). Os principais requisitos para o desenvolvimento da RSI, no betão, são os seguintes: (a) temperatura elevada durante as primeiras idades do betão (atualmente, considera-se que a reação só ocorre de forma deletéria se a temperatura no betão exceder os 65 °C); (b) cimento com teores críticos de álcalis, sulfatos e aluminato tricálcico; (c) presença de hidróxido de cálcio em quantidade suficiente na solução nos poros do betão; e (d) humidade suficiente (o desenvolvimento deletério da RSI ocorre para uma humidade relativa interna acima de 90-92 % (Martin *et al.*, 2012)). Assim, para prevenir a ocorrência destas reações, deve atuar-se de modo que, pelo menos, uma destas condições não se verifique (Gonçalves and Custódio, 2010).

O conhecimento dos mecanismos das reações e dos fatores que condicionam a sua ocorrência, permite a adoção de medidas preventivas para evitar a ocorrência deletéria da RAS e da RSI em novas estruturas de betão.

Relativamente à RAS, as medidas preventivas mais comuns incluem: (i) controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão, limitando o teor de álcalis ativos ou usando ligantes apropriados que

incluam adições do tipo II (NP EN 206) (e.g., cinzas volantes siliciosas satisfazendo a NP EN 450-1, sílica de fumo satisfazendo a NP EN 13263-1, metacaulino satisfazendo a NF P18-513 e a NP 4220, pozolanas naturais satisfazendo a NP 4220, escórias granuladas de alto-forno moídas satisfazendo a NP EN 15167-1); (ii) controlar o teor de sílica reativa, através da utilização no betão de um agregado, ou de uma mistura de agregados, que se considere não suscetível ao desenvolvimento deletério da RAS; (iii) controlar a humidade no betão, recorrendo a soluções construtivas e a produtos ou sistemas de proteção superficial adequados; (iv) modificar o ambiente químico na solução dos poros do betão, por exemplo, através da inclusão de sais de lítio na água de amassadura.

No que diz respeito à RSI, a sua mitigação envolve normalmente as seguintes medidas preventivas: (i) controlar a temperatura máxima do betão; (ii) controlar o teor de álcalis no betão e os teores de aluminatos e de sulfatos no ligante; (iii) controlar a humidade no betão; (iv) controlar o teor de hidróxido de cálcio no betão através da utilização de adições tipo II (NP EN 206).

Em Portugal, a regulamentação a adotar para a prevenção da RAS e da RSI em novas estruturas de betão é consubstanciada pela Especificação LNEC E 461 "Betões. Metodologias para prevenir reações químicas expansivas de origem interna" (LNEC, 2021).

A adoção de medidas preventivas, como as referidas anteriormente, em novas estruturas de betão permite reduzir o risco de ocorrência de reações expansivas deletérias. No entanto, no caso de estruturas de betão existentes, afetadas pela RAS ou RSI, ainda não existe consenso sobre o método mais eficaz a implementar para mitigar o seu desenvolvimento, especialmente em estruturas de betão de grandes dimensões, i.e., estruturas maciças ou com elementos estruturais maciços.

As medidas de mitigação mais utilizadas são aquelas que permitem controlar os fatores que induzem o desenvolvimento das reações. A presença de humidade no betão desempenha um papel fundamental nestas reações, funciona como meio de transporte para os iões envolvidos na reação e também no processo expansivo (Martin *et al.*, 2012; Leemann, 2022; Leemann *et al.*, 2024), pelo que o controlo da humidade no betão é uma das medidas mais utilizadas para a mitigação destas reações expansivas (Houndonougbo, 2024). Em estruturas existentes, há um número muito limitado de formas de o conseguir; acresce que, o tipo de estrutura e os elementos estruturais afetados, bem como as condições ambientais de serviço a que a estrutura está exposta, e o estado de desenvolvimento das reações no betão, também condicionam a solução que pode ser adotada e o nível de supressão da RAS e RSI que pode ser alcançado.

Uma das formas de controlar a humidade no interior do betão passa pela utilização de sistemas de proteção superficial. Estes sistemas, se selecionados adequadamente, têm o potencial de atenuar a RAS e a RSI, uma vez que atuam como uma barreira contra a entrada de água e, em determinadas condições, alguns sistemas, com características especiais, podem permitir que o betão seque.

A seleção de sistemas de proteção superficial apropriados, de entre a vasta gama disponível no mercado, é fundamental para garantir a sua eficácia na mitigação de reações expansivas. Contudo, ainda não existem normas com orientações específicas sobre os critérios de seleção e aceitação de sistemas de proteção de superfície adequados para prevenir ou mitigar estas reações nas estruturas de betão.

Nesta comunicação apresentam-se os critérios gerais que devem ser utilizados na seleção de sistemas de proteção superficial para aplicação em estruturas de betão afetadas pela RAS e RSI. São ainda apresentados os resultados de um caso de estudo, em que a humidade relativa interna do betão, de uma estrutura afetada por reações expansivas, é monitorizada periodicamente, após a aplicação de um revestimento polimérico que foi selecionado com base nos critérios acima referidos.

2 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL DO BETÃO – REQUISITOS

A NP EN 1504, que estabelece um guia para a proteção e reparação de betão, apresenta, na sua parte 9, uma sistematização dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de betão, nomeadamente os processos físicos, químicos ou mecânicos de degradação do betão e os processos de corrosão das armaduras. Nesta norma são ainda definidos os princípios químicos, eletroquímicos e físicos de proteção e reparação, que permitem atuar ao nível do betão ou das armaduras.

Estes princípios estão diretamente relacionados com as ações das quais se pretende proteger o betão, físicas, químicas ou mecânicas. Os seis primeiros princípios de proteção e reparação estão relacionados com a degradação do betão (P1 - Proteção contra o ingresso; P2 - Controlo de humidade; P3 - Restauro do betão; P4 - Reforço estrutural; P5 - Resistência física; P6 - Resistência química), enquanto os restantes cinco (P7 - Preservação ou restauro da passivação; P8 - Aumento da resistividade; P9 - Controlo catódico; P10 - Proteção catódica; P11 - Controlo de áreas anódicas) dizem respeito à corrosão das armaduras. Os sistemas de proteção superficial do betão podem atuar de acordo com um dos seguintes cinco princípios de proteção: P1; P2; P5; P6; P8. A sua seleção é condicionada pela especificidade das condições ambientais e depende das solicitações a que a estrutura está sujeita, as quais vão definir o princípio de proteção segundo o qual deverão atuar. Na parte 2 desta norma são identificadas as características a avaliar para cada princípio, indicados os métodos de ensaio que devem ser usados para a sua avaliação, e apresentados os respetivos requisitos mínimos a cumprir.

Segundo a NP EN 1504-2, os sistemas de proteção superficial para estruturas de betão podem ser constituídos por produtos hidrófugos (H), por produtos de impregnação (I) e por revestimentos superficiais (C):

- Os produtos hidrófugos (H) tornam as paredes dos poros e a superfície do betão repelente à água, mas não formam uma película à superfície do betão e não preenchem os seus poros nem alteram o seu aspeto. Habitualmente são usados produtos com base em silanos ou siloxanos;
- Os produtos de impregnação (I) preenchem parcialmente os poros, bloqueando-os e formando ao mesmo tempo uma fina película sobre a superfície do betão. Normalmente os ligantes destes produtos são polímeros orgânicos;
- A aplicação de revestimentos (C) conduz à formação de uma camada contínua sobre a superfície do betão, com uma espessura que pode ir dos 100 micrómetros a vários milímetros. Este tipo de produto de proteção possui características muito diversas, mesmo pertencendo à mesma família ou apresentando um tipo de ligante semelhante, pelo que devem ser selecionados mediante avaliação prévia das suas características. Como exemplo, os ligantes destes revestimentos podem ser polímeros orgânicos, ou cimento hidráulico modificado com uma dispersão de polímero.

Existem ainda outros métodos de proteção de betão baseados nos princípios P1 e P2, como a aplicação de membranas ou de painéis de proteção externos, que não são abordados nesta norma.

No caso específico da proteção do betão com o objetivo de mitigar as reações expansivas internas (RAS e RSI) em estruturas ou elementos estruturais não imersos, os sistemas de proteção superficial devem ser utilizados como métodos para a controlar a humidade no betão (princípio P2). Seguindo a metodologia proposta pela NP EN 1504, para o princípio de controlo da humidade (P2) podem ser utilizados sistemas de proteção superficial de dois tipos: produtos hidrófugos (H) e revestimentos (C). As características obrigatórias a avaliar, bem como os respetivos requisitos, de acordo com este princípio, encontram-se definidas na EN 1504-2 e resumidos no Quadro 1, para os produtos hidrófugos (H) e no Quadro 2, para os revestimentos (C).

Quadro 1 – Características e requisitos de desempenho para os sistemas de proteção superficial, relativos ao princípio do controlo de humidade no betão (P2), para produtos hidrófugos (H), segundo a NP EN 1504-2

Característica de desempenho	Método de ensaio	Requisito
Profundidade de penetração	Aplicação de acordo com a norma EN 13759. Avaliação segundo a norma EN 14630.	Classe I : < 10 mm Classe II : ≥ 10 mm
Absorção de água e resistência aos álcalis	EN 13580	Taxa de absorção: < 7,5 % comparada com o provete não tratado < 10 % (após imersão numa solução alcalina)
Velocidade relativa de secagem	EN 13579	Classe I: > 30 % Classe II: > 10 %

Quadro 2 – Características e requisitos de desempenho para os sistemas de proteção superficial, relativos ao princípio do controlo de humidade no betão (P2), para revestimentos (C), segundo a NP EN 1504-2

Característica de desempenho	Método de ensaio	Requisito		
Permeabilidade ao vapor de água	EN ISO 7783	Classe I: s_D < 5m (permeável ao vapor de água) Classe II: 5 m ≤ s_D ≤ 50 m Classe III: s_D > 50 m (não permeável ao vapor de água)		
Absorção capilar e permeabilidade à água	EN 1062-3	w < 0,1 kg·m^{-2}·h$^{-0,5}$		
Aderência por arrancamento	EN 1542		Sistemas flexíveis ou suportando fendilhação	Sistemas rígidos
		Sem tráfego	Média ≥ 0,8 N·mm^{-2} (valor individual > 0,5)	Média ≥ 1,0 N·mm^{-2} (valor individual > 0,7)
		com tráfego	Média ≥ 1,5 N·mm^{-2} (valor individual > 1,0)	Média ≥ 2,0 N·mm^{-2} (valor individual > 1,5)

A caracterização experimental dos potenciais sistemas de proteção, para avaliar o seu desempenho através de ensaios laboratoriais efetuados de acordo com a normalização acabada de referir, é essencial para a recolha de dados que permitam sustentar a seleção de um sistema para uma determinada estrutura no ambiente em que esta se encontrar.

No entanto, embora as características consideradas obrigatórias na normalização se centrem nas propriedades de barreira, para que um sistema de revestimento possa atenuar eficazmente a RAS e a RSI, devem ser avaliadas outras características tendo em conta a especificidade destas reações e o tipo de estrutura ou elemento estrutural afetados, como por exemplo, a resistência do revestimento à fendilhação do substrato, o comportamento após envelhecimento artificial, a aderência ao betão, e a durabilidade. Deve notar-se que a seleção de um revestimento deve sempre ser precedida da realização de ensaios de diagnóstico e prognóstico de reações expansivas no betão da estrutura a proteger.

3 CASO DE ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

A obra de arte considerada neste estudo é uma ponte em Portugal que foi aberta ao tráfego em 1998. Trata-se de uma ponte curva em planta, em betão armado pré-esforçado, com um comprimento total de 900 m que se divide em onze vãos, o maior dos quais com 180 m sobre o rio. O tabuleiro é constituído por um caixão monocelular com uma largura de 25,7 m e cuja altura é de 4,0 m entre o encontro norte e o pilar P5, sendo variável nos restantes tramos com um valor máximo de 12,0 m sobre os pilares P9 e P10. O tabuleiro é contínuo em toda a sua extensão, rigidamente ligado aos pilares P7 a P10, e simplesmente apoiado sobre os restantes pilares e sobre os encontros. Os pilares têm uma secção quadrada oca constante, cujos vértices estão dotados de nervuras de dimensão variável, como ilustrado na Figura 1. As fundações dos pilares e encontros são diretas.

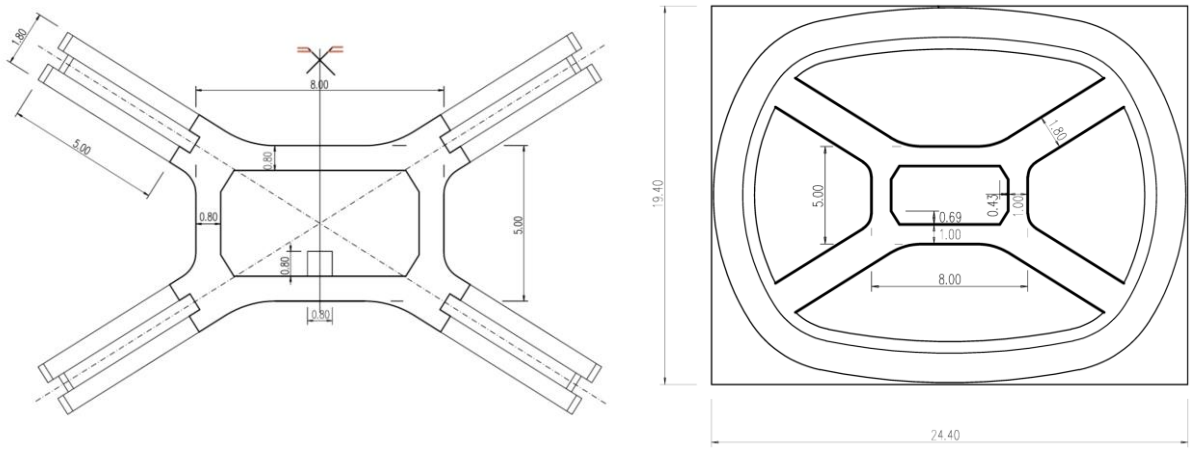


Figura 1 – Secção transversal do fuste (imagem à esquerda) e da sapata (imagem à direita) do pilar P8 (imagens – Armando Rito Engenharia, S.A.)

3.2 FENÓMENOS EXPANSIVOS

A ocorrência de uma fendilhação acentuada na ponte, localizada fundamentalmente na parte inferior dos pilares P6 a P9, originou a realização de um estudo pelo LNEC visando a identificação das causas dessa fendilhação. O padrão de fendilhação variava com a geometria do elemento de betão, mas estava alinhado com a armadura e a direção dos principais campos de tensão, ou apresentava-se sob a forma de fendilhação indiferenciada. Nesse estudo, concluiu-se que a referida fendilhação se deve à ocorrência de reações químicas expansivas de origem interna no betão, nomeadamente a RAS e a RSI. Concluiu-se, também, que ainda existia um potencial de expansão residual moderado no betão amostrado. Como resultado, foi preparado e implementado um plano para monitorizar o teor de humidade do betão, para determinar se a humidade disponível era suficiente para sustentar o desenvolvimento deletério das reações, e para avaliar o efeito que um sistema de proteção de superfície poderia ter na mitigação da RAS e da RSI na estrutura. Para tal, foi selecionado um sistema de revestimento, tendo em conta as considerações feitas na Secção 2, caracterizado em laboratório (Secção 3.3), e aplicado numa área experimental na base do fuste do pilar P8. O seu efeito no nível de humidade do betão está a ser avaliado através de medições da humidade relativa (Secções 3.4 e 3.5). Os resultados deste estudo fornecerão dados para apoiar a decisão a tomar quanto à pertinência da aplicação de um sistema de proteção da superfície do betão para mitigar o desenvolvimento deletério da RAS e da RSI, e para prevenir a deterioração adicional do betão devido a outros mecanismos como, por exemplo, a corrosão das armaduras.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO

O sistema de proteção superficial selecionado é constituído por duas camadas: um revestimento cimentício modificado com polímeros e um revestimento acrílico de base aquosa. A sua capacidade de colmatação de fissuras, resistência à penetração de água, permeabilidade ao vapor de água e eficácia no controlo da humidade no betão foram avaliadas em laboratório num estudo anterior (Custódio *et al.*, 2022). As principais conclusões podem ser resumidas da seguinte forma:

- Permeabilidade à água líquida – os resultados mostraram que o sistema de revestimento cumpre o requisito estabelecido na norma NP EN 1504-2 quanto à velocidade de transmissão da água líquida (permeabilidade) (w < 0,1 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-0.5}$). Assim, espera-se que este sistema possa proteger eficazmente o betão da entrada de água líquida.

- Permeabilidade ao vapor de água – os resultados dos ensaios realizados ao sistema de revestimento permitiram classificá-lo como Classe II (s_D = 9 m), i.e., o sistema de revestimento não é impermeável ao vapor de água ($s_D \geq 50$ m) nem é permeável ao vapor de água ($s_D \leq 5$ m), ou seja, é parcialmente permeável ao vapor de água; o sistema demonstrou ainda que tem uma velocidade de transmissão de vapor de água média (V = 2 g·m^{-2}·d^{-1}).
- Resistência à fendilhação do substrato – os resultados dos ensaios efetuados ao sistema de revestimento, a 23 °C, permitem classificá-lo como A3 (a largura da fissura colmatada foi superior a 500 µm e inferior a 1250 µm). Assim, o sistema de revestimento seria capaz de manter as propriedades de proteção/barreira no betão de uma estrutura afetada, uma vez que tem a capacidade de colmatar fissuras no substrato de betão, se estas não ultrapassarem esse nível.
- Eficácia do sistema de revestimento no controlo da humidade no interior do betão – os resultados obtidos mostram que o sistema de revestimento permite a secagem do betão, uma vez que os valores de humidade relativa (H.R.) diminuíram quando os provetes foram colocados num ambiente com H.R. de 60 %. No entanto, verificou-se que o revestimento não impede a entrada de humidade, uma vez que os provetes que foram colocados numa câmara húmida (H.R. ≥ 95 %, ou seja, onde as superfícies dos provetes estão continuamente molhadas) apresentaram um aumento contínuo da humidade relativa. Assim, os resultados obtidos sugerem que este sistema de revestimento poderá não ser adequado em situações em que o betão seja exposto continuamente ou por períodos muito prolongados a uma humidade do ar muito elevada.

3.4 DESEMPENHO DO REVESTIMENTO

O estudo *in situ* compreendeu três fases. A primeira fase, executada em fevereiro de 2019, consistiu na realização de cinco pares de furos no betão, nos quais foram inseridos tubos cilíndricos ocos para selar o furo até à profundidade desejada. Os furos foram efetuados nos seguintes locais no pilar P8: superfície exterior norte (L1) e sul (L2) do fuste pilar, superfície interior norte do fuste do pilar (L3), superfície vertical exterior sul da sapata do pilar (L4), superfície horizontal superior exterior sul da sapata do pilar (L5). Os dois furos de cada par tinham profundidades diferentes (5 cm e 15 cm), para permitir a medição da H.R. a diferentes distâncias da superfície do elemento. Estes orifícios estavam selados, sendo apenas abertos quando as leituras eram feitas, ou seja, quando a sonda de humidade relativa e temperatura era colocada ou retirada do orifício. As leituras de temperatura e humidade relativa foram realizadas com uma sonda padrão e um medidor portátil de humidade e temperatura padrão Vaisala HM41. A segunda fase, concretizada em março de 2021, consistiu na aplicação do sistema de proteção da superfície, descrito na secção 3.3, no arranque do fuste do pilar P8 da ponte. A área revestida abrangeu alguns dos locais de medição acima mencionados (L2 e L3). Além disso, para obter um conjunto mais abrangente de dados relativos ao efeito do revestimento no nível de humidade do betão, foram feitos 25 novos furos, para medir a temperatura e a humidade relativa do betão, em toda a área de ensaio, sete dos quais numa área sem revestimento. O sistema de revestimento foi aplicado nas quatro faces do pilar, numa faixa de aproximadamente 2 metros de altura, conforme ilustrado na Figura 2. As leituras de temperatura e humidade relativa foram efetuadas com um indicador Vaisala HM40, com um adaptador de ligação rápida, e sondas de encaixe de humidade e temperatura Vaisala HMP40S. Os resultados das duas primeiras fases, apresentados e discutidos em (Custódio *et al.*, 2024), permitiram concluir que o sistema de revestimento aparenta ter resultado numa diminuição do teor de humidade do betão, nos locais e profundidades avaliados – os valores médios de H.R. registados nos locais L2 e L3, antes (2019/02/07-08, 2020/07/20-21, 2020/11/05-07) e após a aplicação do revestimento (2021/05/10-12, 2022/02/07-09, 2022/06/30-2022/07/01), foram, respetivamente: 83 % (18 °C) e 74 % (22 °C) para L2 (superfície exterior sul do fuste pilar); e 98 % (16 °C) e 95 % (14 °C) para L3 (superfície interior norte do fuste do pilar).

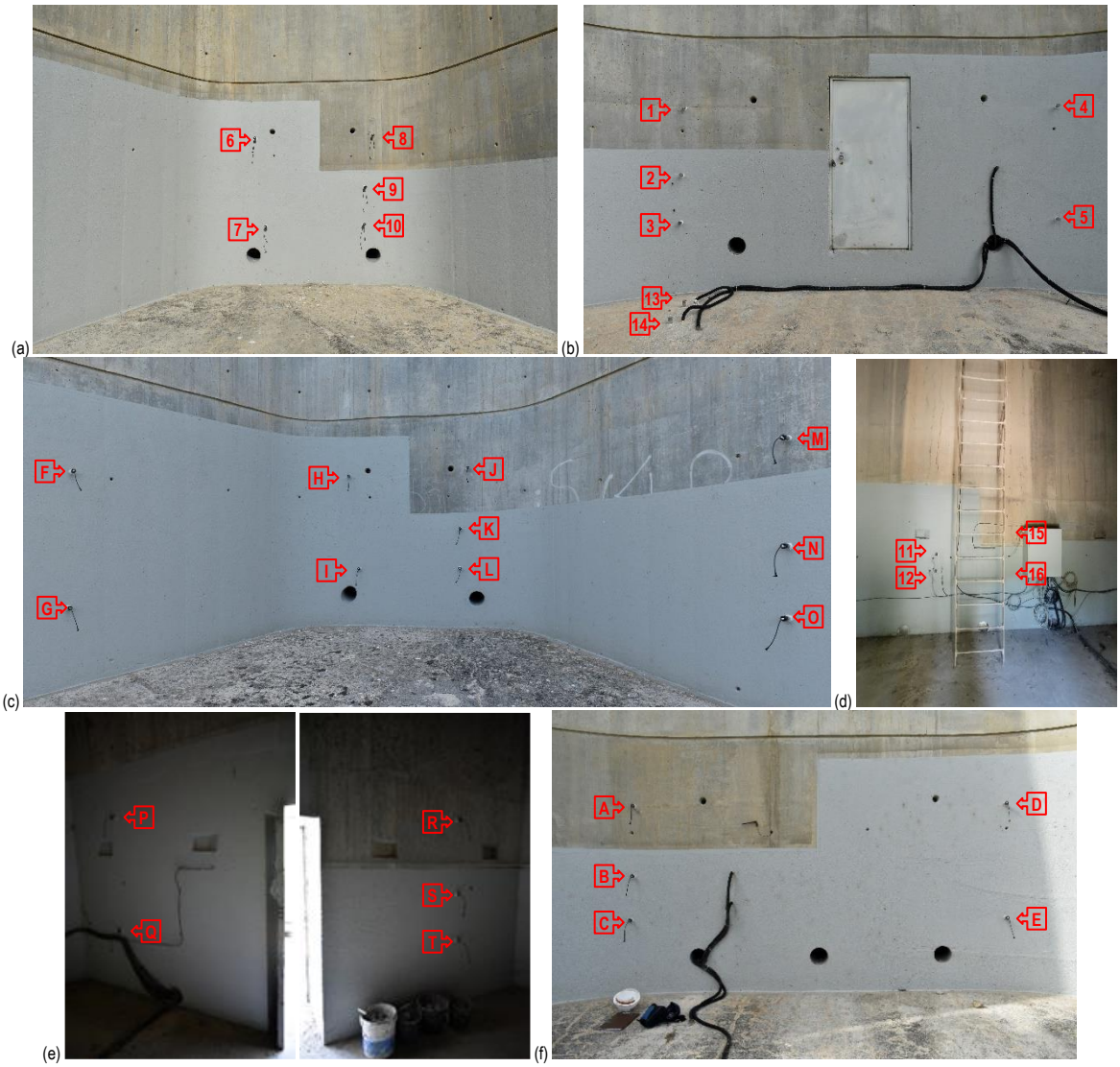


Figura 2 – Zona de avaliação do revestimento na base do fuste do pilar P8 e localização dos pontos de medição da temperatura e da temperatura relativa - (a) lado leste, (b) lado sul, (c) lado oeste, (d) lado norte interior, (e) lado sul interior, (f) lado norte exterior

A terceira fase foi realizada para melhor clarificar o efeito que o revestimento teve no teor de humidade do betão, determinado através de leituras únicas realizadas nos vários locais, em horas e dias distintos, na primeira e segunda fase. Assim, na terceira fase, foram realizadas duas campanhas de medições extensivas em julho e em dezembro de 2023. Nestas duas campanhas, as leituras foram efetuadas numa área mais abrangente e com mais sondas, sendo que estas foram deixadas nos furos durante 5 dias, ao longo dos quais foram feitas várias leituras por dia.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como referido anteriormente, a humidade no interior do betão é um fator preponderante para o desenvolvimento da RAS e da RSI. Para se avaliar o efeito que o revestimento aplicado tem no seu controlo no betão, é necessário verificar o teor de água no betão. O método mais preciso de realizar essa verificação seria através da extração de amostras de betão e sua secagem em estufa até massa constante, para obter a quantidade de água evaporável, ou seja, utilizando um método destrutivo. Contudo, uma vez que no presente estudo se pretende verificar a eficácia do revestimento em momentos e locais distintos, utilizou-se, em alternativa, um método não destrutivo. Dos vários

métodos existentes, optou-se pela medição da humidade relativa do ar no betão (visto poder ser correlacionada com o potencial de expansão do betão devido à RAS e à RSI), portanto, avaliou-se de forma indireta o nível de humidade no betão. A interpretação dos resultados deve ter em conta as limitações e incertezas inerentes à medição do parâmetro humidade relativa e, também, ao facto de na estrutura estarmos perante condições dinâmicas de temperatura e de humidade relativa, existindo gradientes no elemento estrutural em apreço.

A humidade relativa pode ser definida como a relação entre a pressão parcial do vapor de água (p) e a pressão de saturação do vapor de água (p_{s0}) à mesma temperatura, expressa em percentagem. A humidade relativa ambiente tende a diminuir com o aumento da temperatura, uma vez que a pressão de saturação aumenta com o aumento da temperatura. No betão parcialmente saturado e isolado, a humidade relativa tende a aumentar com o aumento da temperatura, devido à redução da tensão superficial e à curvatura dos meniscos da solução dos poros do betão. No entanto, a humidade relativa interna do betão, medida junto à superfície, pode efetivamente acompanhar as variações da humidade relativa ambiente. A humidade relativa no interior do betão é influenciada por vários fatores, tais como a humidade relativa ambiente, a temperatura interna, e o grau de hidratação do cimento.

Os valores médios das medições de humidade relativa (H.R.) e de temperatura (T.), efetuadas em julho e em dezembro de 2023 no fuste do pilar P8, são apresentados no Quadro 3. Apresentam-se apenas os resultados das medições de T. e H.R. efetuadas no segundo, terceiro e quarto dia da campanha *in situ* (cuja duração total foi de cinco dias), visto que nesses três dias foram realizadas três medições (início da manhã, início da tarde e final da tarde); no primeiro dia foi realizada apenas uma medição a meio da tarde e no quinto dia apenas duas medições, início da manhã e início da tarde. Este quadro reporta apenas as medições realizadas no exterior do fuste do pilar P8 e apenas nos furos com profundidade de 5 cm. A análise detalhada de todos os dados obtidos na campanha de medições *in situ* realizada em julho e em dezembro de 2023 será feita posteriormente em relatório LNEC. Através da análise do Quadro 3, verifica-se que a diferença entre a humidade relativa no betão da zona revestida e não revestida é mais relevante no inverno do que no verão (inverno: $HR_{bet.\&rev.}$ 82 %, $HR_{bet.}$ 87 %; verão: $HR_{bet.\&rev.}$ 82 %, $HR_{bet.}$ 81 %).

Quadro 3 – Resumo dos resultados obtidos nas medições de humidade relativa e temperatura efetuadas em julho e em dezembro de 2023

Período do ano	Período do dia	$HR_{bet.\&rev.}$ (%)	$HR_{bet.}$ (%)	$HR_{amb.}$ (%)	$T_{bet.\&rev.}$ (°C)	$T_{bet.}$ (°C)	$T_{amb.}$ (°C)
Verão (julho)	Manhã	84	83	54	25	25	22
	Meio do dia	80	80	31	30	30	31
	Tarde	82	81	38	33	33	31
Inverno (dezembro)	Manhã	83	88	81	6	6	5
	Meio do dia	81	86	74	7	7	7
	Tarde	83	87	88	7	7	6
Verão (julho)	Dia	82	81	41	29	29	28
Inverno (dezembro)	Dia	82	87	81	7	7	6
Verão & Inverno	Dia	82	84	61	18	18	17

Notação: $HR_{bet.\&rev.}$ – valor médio da humidade relativa no betão em zona com revestimento; $HR_{bet.}$ – valor médio da humidade relativa no betão em zona sem revestimento; $HR_{amb.}$ – valor médio da humidade relativa ambiente junto ao local de medição; $T_{bet.\&rev.}$ – valor médio da temperatura no betão em zona com revestimento; $T_{bet.}$ – valor médio da temperatura no betão em zona sem revestimento; $T_{amb.}$ – valor médio da temperatura ambiente junto ao local de medição.

De modo a obter-se um exame mais profundo dos resultados e da sua estrutura foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) em relação às variáveis quantitativas (humidade relativa do betão – $HR_{bet.}$, humidade relativa do ambiente exterior – $HR_{amb.}$, temperatura do betão – $T_{bet.}$, temperatura do ambiente exterior – $T_{amb.}$) (Figura 3). Como a análise por PCA é afetada pela gama de dimensão das variáveis, estas foram previamente centradas e redimensionadas. As fórmulas dos

componentes principais (PC) calculados são: PC1 = -0,22$HR_{bet.}$ + 0,56$T_{bet.}$ - 0,56$HR_{amb.}$ + 0,57$T_{amb.}$, PC2 = 0,97$HR_{bet.}$ + 0,19 $T_{bet.}$ - 0,06 $HR_{amb.}$ + 0,13$T_{amb.}$.

O primeiro componente principal, PC1, representa 74 % da variância dos dados e é controlado em sentidos opostos pelas condições ambientais, $HR_{amb.}$ e $T_{amb.}$ (Figura 3). A $T_{amb.}$ encontra-se por sua vez altamente correlacionada com a $T_{bet.}$, o que significa que uma alteração da temperatura do ambiente exterior provoca uma alteração no mesmo sentido e semelhante proporção na temperatura do betão. Esta correlação era expectável visto que a temperatura no betão foi medida a baixa profundidade em relação à superfície do betão (5 cm), podendo esta correlação ser inferior caso a temperatura seja medida a uma maior profundidade. O segundo componente principal, PC2, representa 22 % da variação dos dados e discrimina a variação ocorrida com a humidade relativa no interior do betão (Figura 3).

O PC1 separa, a nível de condições de humidade relativa (ambiente) e temperatura (ambiente e do betão), claramente as medições ocorridas no verão e no inverno (Figura 4a) e, também, evidencia as diferenças sistemáticas nas condições das medições realizadas da parte da manhã, a meio do dia, ou ao final da tarde (Figura 4b). Observando-se assim, como esperado, temperaturas mais baixas e maior humidade relativa durante a parte da manhã, e temperaturas mais elevadas com menor humidade relativa a meio do dia. No verão, por exemplo, verificou-se que os valores de humidade relativa medidos no betão são em média mais elevados da parte da manhã, seguidos pelos valores médios ao final da tarde e com valores de humidade relativa mais baixos a meio do dia (Quadro 3, Figura 4b).

O PC2 evidencia que a face orientada a oeste apresentou os valores mais elevados de humidade relativa no betão e a voltada a sul os valores mais baixos (Figura 4c). O PC2 evidencia ainda que algumas medições de humidade relativa acima da média, obtidas no inverno, estão associadas a furos específicos, situados na parte superior da zona avaliada, mais suscetíveis ao ingresso de água, nomeadamente furos não revestidos e, também, a um furo em zona revestida próximo da transição para a zona superior não revestida, furos estes que no verão apresentaram valores de humidade relativa já próximos da média dos resultados gerais. Embora a separação das observações relativas à variação da humidade relativa no betão, com e sem revestimento de proteção, realizada através do PC2 não seja muito evidente, observa-se que no inverno a humidade relativa no betão é em média inferior nos locais revestidos (Quadro 3, Figura 4d). No verão as medições de humidade relativa nos locais revestidos apresentam uma maior dispersão de resultados o que resulta em valores médios semelhantes de humidade relativa dos locais com e sem revestimento, embora ainda assim ligeiramente superiores nos locais revestidos (podendo talvez denotar uma diferença na capacidade de secagem do betão nesses locais).

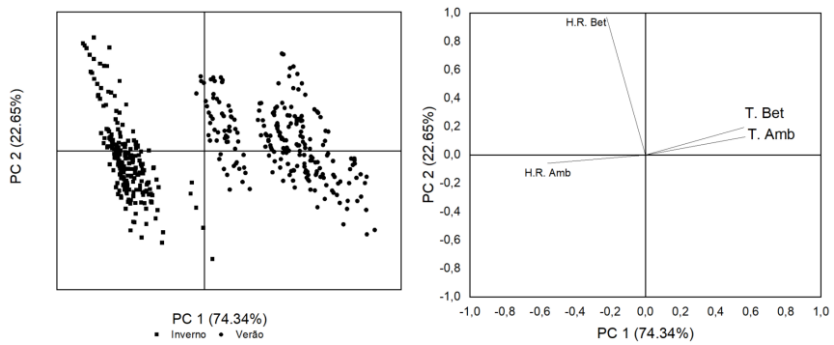


Figura 3 – Análise de Componentes Principais. Esquerda: gráfico de pontuação de componentes (*scores*). Direita: gráfico de carregamentos (*loadings*). A Interpretação da posição das observações registadas no gráfico de *scores* é realizada em conjunto com os eixos das variáveis representado no gráfico de *loadings*

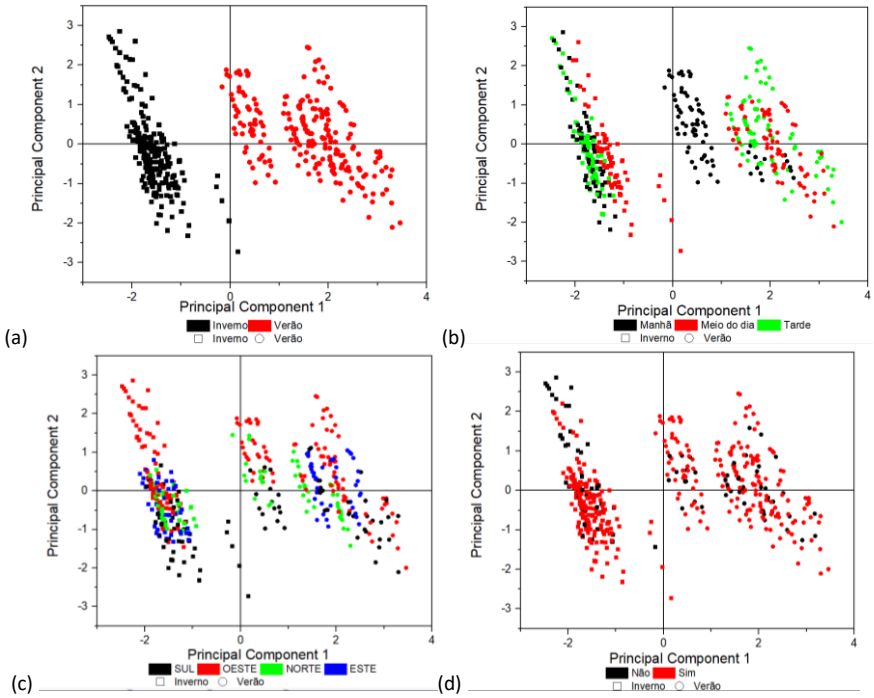


Figura 4 – Gráfico de pontuação de componentes (scores) colorido consoante fatores categóricos estudados: a) Medições de inverno (preto) e verão (vermelho); b) Medições no início da manhã (preto), a meio do dia (vermelho) e ao final da tarde (verde); c) Medições em paredes orientadas a sul (preto), oeste (vermelho), norte (verde) e este (azul); d) Medições em locais sem revestimento (preto) e com revestimento (vermelho)

4 CONCLUSÕES

Nesta comunicação foram apresentados os critérios gerais que podem ser utilizados na seleção de sistemas de revestimento para a mitigação da RAS e da RSI em estruturas de betão, bem como os resultados parciais de um estudo *in situ* relativo à avaliação do desempenho de um sistema de revestimento em termos da sua capacidade de controlar a humidade no betão. As conclusões preliminares que se podem extrair do estudo, considerando todas análises já efetuadas aos dados recolhidos *in situ*, podem ser resumidas da seguinte forma:

- Os valores de humidade relativa no betão, registados antes da aplicação do revestimento, são considerados suficientes para sustentar o desenvolvimento deletério da RAS e da RSI, tanto no pilar como na sapata;
- Os valores de humidade relativa no betão, registados antes da aplicação do revestimento, são por vezes inferiores ao que é, geralmente, considerado como o limiar para o desenvolvimento deletério da RAS (80 %) e da RSI (90-92 %), pelo que há períodos do ano em que estas reações podem abrandar ou mesmo parar na estrutura; pelo menos nas profundidades avaliadas, e mais no pilar do que na sapata;
- Os resultados, dos locais avaliados antes e após a aplicação do sistema de revestimento, sugerem que o revestimento terá resultado numa diminuição do teor de humidade do betão, nos locais e profundidades avaliados;
- Os resultados das campanhas realizadas em julho e dezembro de 2023 sugerem que o sistema de revestimento aplicado terá resultado numa diminuição do teor de humidade no betão, nos locais e profundidade avaliados, efeito esse mais evidente nas medições realizadas no inverno;
- A decisão final sobre a utilidade da aplicação deste revestimento nos elementos estruturais em apreço será tomada após a análise de todos os dados, incluindo os dados de monitorização estrutural.

REFERÊNCIAS

Batista, A. L. (2022). Acompanhamento dos processos de deterioração das barragens portuguesas afetadas por reações expansivas do betão. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas,* Série III, n.º 18**,** 43-64.

Custódio, J*., et al.* (2023). Mitigação de efeitos estruturais de reações expansivas no betão. *Segundo Seminário "A investigação nos laboratórios do estado e a construção de uma sociedade segura e mais resiliente" - FCCLE2023.* LNEC, Lisboa, Portugal.

Custódio, J*., et al.* (2022). Performance evaluation of a coating protection system for concrete structures affected by internal expansive reactions. *MATEC Web of Conferences,* 361.

Custódio, J*., et al.* (2024). Performance of a polymeric coating material applied to a concrete structure affected by internal expansive chemical reactions. *Procedia Structural Integrity,* 54**,** 271-278.

Fournier, B. & Bérubé, M.-A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering,* 27**,** 167-191.

Gonçalves, A. & Custódio, J. (2010). As reacções expansivas internas no betão. Prevenção dos riscos. Workshop – Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas. *Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas – REABILITAR 2010.* Lisboa, Portugal.

Houndonougbo, T. (2024). *Efficacité et durabilité des revêtements en polymères pour la protection des structures en béton atteintes de réaction sulfatique interne (RSI) : de l'éprouvette a la structure.* PhD Thesis, Université Gustave Eiffel.

Leemann, A. (2022). Alkali silica reaction - sequence, products and possible mechanisms of expansion. *16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction – ICAAR 2020-2022.* Lisbon, Portugal.

Leemann, A*., et al.* (2024). Alkali silica reaction in concrete - Revealing the expansion mechanism by surface force measurements. *Cement and Concrete Research,* 176**,** 107392.

LNEC (2021). *LNEC Specification E 461:2021 Concrete. Methodologies to prevent expansive chemical reactions of internal origin (in Portuguese),* Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

Martin, R.-P*., et al.* (2012). Alkali aggregate reaction and delayed ettringite formation: common features and differences. *14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction – ICAAR 2012.* France.

Poyet, S*., et al.* (2007). Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution. *Materials and Structures,* 40**,** 229-239.

Poyet, S*., et al.* (2006). Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 18**,** 588-596.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO: ESTUDO DA ADERÊNCIA DE AZULEJOS PORTUGUESES DO SÉCULO XVII AO SUBSTRATO DE ASSENTAMENTO.

Eudes Rocha[a] ; Maurílio Moraes[b] ; Pablo Goes[c] ; Anne Marie Pessis [d] ;Paulo Martin [e]

[a] (UPE - Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 50720-001, Recife, Brasil), eudes.rocha@upe.br
[b](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) maurilio.moraes@ufpe.br
[c](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) pablo.goes@ufpe.br
[d](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) annepessis@gmail.com
[e](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) paulo.maior@ufpe.br

RESUMO

A preservação da memória e educação, sobretudo patrimonial são importantes medidas para se criar um senso de identidade cultural e coesão social. É inquestionável que os azulejos portugueses são referências de identidade cultural e patrimonial, mas que enfrenta desafios em sua conservação, devido a danos como o desplacamento dos corpos cerâmicos dos substratos de assentamento. Este problema é frequentemente ocasionado pela dilatação térmica diferencial e movimentação dinâmica entre os materiais, porém o desplacamento também pode ser ocasionado pela cinética química dos minerais. O estudo analisou azulejos históricos da Igreja de Nossa Senhora do Pilar (século XVII, Recife, Brasil) usando técnicas de luz polarizada, DRX e FRX. Os azulejos portugueses policromados mostraram degradação por exposição ambiental. Os Fragmentos (Amostra 1 e Amostra 2) revelaram duas camadas: chacota (base áspera) e vidrado (superfície lisa). A análise química e mineralógica identificou principalmente Cálcio e Sílica, com fases como Quartzo, Feldspato, Calcita e Akermanita. A microscopia mostrou sericitização, um processo que aumenta as tensões hidráulicas na chacota, causando fissuras. As amostras apresentaram perfis distintos, com a Amostra 1 mais vulnerável a alterações. Concluiu-se que fatores ambientais e cinética química dos minerais devem ser considerados para análise da degradação dos azulejos históricos, sugerindo a necessidade de métodos de manutenção que considerem essas variáveis.

Palavras-chave: Aderência, azulejos históricos, FRX, DRX

1 INTRODUÇÃO

A preservação do patrimônio edificado e, neste caso, os históricos azulejos portugueses, é uma ação fundamental para que uma sociedade possa alcançar um bom nível de sustentabilidade social e ambiental. Segundo Brito (2024) a reutilização de estruturas existentes, por meio de *retrofit*, por exemplo, reduz a necessidade de novas construções e, consequentemente, o consumo de recursos naturais. Da mesma forma Bonduki (2010), salienta que a restauração de edificações e seus componentes construtivos, sobretudo em áreas históricas, incentiva os processos de requalificação urbana e o turismo cultural que além de colaborar para a revitalização de centros urbanos, são importantes fontes de renda e emprego para as comunidades locais permitindo um desenvolvimento econômico sustentável.

Os azulejos portugueses são símbolos da identidade cultural e contribui para a memória coletiva e o sentimento de pertencimento das comunidades. Em Portugal esses artefatos são valorizados e estudados e, no Brasil, também se destacam assumindo um papel importante na formação da cultura nacional e práticas construtivas. Verifica-se, portanto, que a restauração de edifícios históricos, incluindo azulejos, pode servir como um catalisador para regeneração urbana, atraindo investimentos e promovendo a coesão social contribuindo para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. Contudo para se preservar e restaurar azulejos históricos é necessário compreender seus mecanismos de degradação e o desempenho dos materiais constituintes. Entre os tipos de danos acometidos nas peças azulejares históricas, cabe destacar o desplacamento dos corpos cerâmicos dos substratos de assentamento.

A principal forma de avaliação da resistência dos revestimentos ao desplacamento utilizada é a determinação da sua resistência de aderência a tração simples diretamente da superfície onde a peça analisada foi assentada (Sagave, 2001). Os principais fatores que podem ocasionar esta manifestação patológica são a dilatação térmica diferencial e a movimentação dinâmica diferencial entre os materiais que compõem o sistema (Daudt, et al, 2021). A dilatação térmica ocorre porque a cerâmica, o substrato e o material colante podem possuir diferentes coeficientes de dilatação térmica, esse efeito foi identificado em estudos como o realizado por Geyer (1994) que analisa a causa do desplacamento através da influência dos efeitos termodinâmicos sobre a aderência dos revestimentos.

Já a movimentação dinâmica diferencial pode-se dar por aplicação de carregamentos não distribuídos linearmente nas estruturas, ação de vento, recalques diferenciais ou acomodação geral dos diferentes sistemas de uma edificação (Lourenço *et al.*, 2017; Winnefeld *et al.*, 2012). Entre as pesquisas sobre o mecanismo de aderência, cabe destacar o trabalho de Costa (2013) que aponta como principais fatores do desplacamento a falta de tratamento da superfície, a porosidade do corpo azulejar e o desempenho da argamassa utilizada.

No entanto, existe uma lacuna nas análises que abordam o dano de desplacamento dos corpos cerâmicos, que são os fatores da cinética química dos minerais e seus efeitos na aderência de azulejos, especialmente das peças históricas.

Sendo assim, este artigo analisa a matéria-prima que foi utilizada para a fabricação da chacota, tendo em vista que os minerais que a constituem passam por alterações com o tempo e que pode afetar a aderência entre o substrato e os corpos azulejares.

A aderência é a propriedade responsável pela fixação dos azulejos em substratos e tem como princípio a capacidade de absorver tensões normais e tangenciais na superfície de interface entre a argamassa e a base do corpo azulejar (chacota) (Carvalho Jr, 1999). Porém a eficiência dessa aderência pode ser afetada pela metamorfose, que ocorre ao longo do tempo, dos minerais que constituem a chacota.

Por fim, verifica-se que o estudo da interação entre azulejos e substrato dentro de prédios históricos pode fornecer informações importantes sobre como as condições ambientais, climáticas e de manutenção podem ter impactado a durabilidade desses revestimentos.

1.1 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO PILAR

O estudo de aderência foi realizado em fragmentos de azulejos históricos coletados na igreja de Nossa Senhora do Pilar, construída na segunda metade do século XVII (Figura 1), e situada em Recife, Brasil. A edificação foi construída em 1680 sobre os alicerces do Forte de São Jorge, situada em terras do istmo que une a cidade de Recife à Cidade de Olinda.

Figura 1. Igreja de Nossa Senhora do Pilar, no atual bairro do Recife, área central do Recife, PE, em processo de restauração da faixada externa.

Durante o século XVII, os habitantes de Recife e Olinda experimentavam temperaturas elevadas ao longo do ano, com uma média anual que variava entre 24°C e 28°C. E de acordo com Vieira (2010), as chuvas eram mais intensas durante os meses de inverno, devido à influência dos ventos alísios que traziam umidade do Oceano Atlântico.

A estação chuvosa proporcionava um clima mais fresco, mas também desafiava as comunidades com enchentes e inundações. As áreas urbanas, como Recife e Olinda, com suas construções coloniais, enfrentavam desafios de infraestrutura devido às fortes chuvas, o que moldou a arquitetura local para se adaptar a essas condições climáticas (Santos, 2016).

2 MATERIAIS (AMOSTRAS) E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Em vistoria realizada no interior da igreja, identificaram-se as regiões em que os danos nos azulejos se mostravam mais avançados, em particular a nave da igreja.

Na nave da igreja, identificam-se reminiscências da presença de painéis azulejares portugueses com padrão em tapete policromado (Figura 2), do tipo camélia, revestindo sua cúpula e parte das paredes. A edificação permaneceu em ruínas por um período, o que acelerou a degradação e o vandalismo das peças cerâmicas (Freitas, 2015).

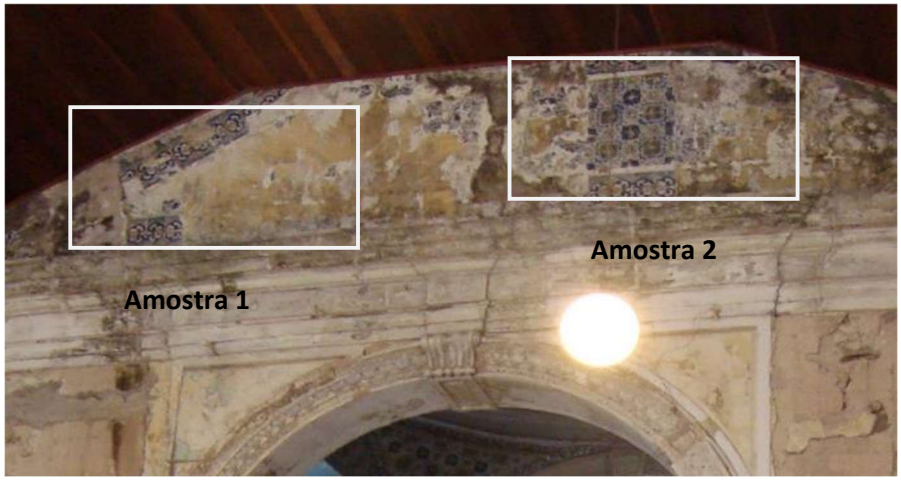


Figura 2. Detalhe da nave da igreja Nossa Senhora do Pilar e indicação do local com desplacamento de peças azulejares.

Para este estudo foram utilizados dois fragmentos de azulejos portugueses desprendidos do painel interno, que foram doados pela administração da capela Nossa Senhora do Pilar e fragmentos de argamassa de assentamento também localizados no painel. Para investigar as condições dos materiais, primeiramente, procedeu-se o registro e descrição dos fragmentos identificados como Amostra 1 e Amostra 2. Inicialmente o estudo se deu em escala macroscópica, construindo um registro de imagens digital que permitiu, visualizar as camadas presentes no corpo azulejar. A primeira camada, mais evidente é o vidrado, onde está estampada as cores do revestimento; A segunda camada, identificada por chacota, é objeto desse estudo. Por fim analisou-se o substrato de assentamento, responsável pela interação e aderência da chacota com a parede no interior do edifício.

As amostras obtidas são descritas a seguir:

2.1.1 Amostra 1

Na análise da amostra 1, a escala de estudo macroscópica apresenta os aspectos metrológicos do fragmento. A espessura identificada foi de 1,5 cm, com a estrutura composta por duas camadas. A primeira camada apresenta uma base áspera (chacota), enquanto a segunda camada exibe uma superfície lisa (vidrado). O padrão estilístico da amostra é notável pelas pinturas que abrangem o espectro de cor visível, destacando-se em tons de azul (680 – 620 THz) e amarelo (530 – 510 THz), Figura 3. Também foram observados defeitos mecânicos na forma de fissuras na superfície do vidrado.

Figura 3. Fragmento (Amostra 1) de azulejos associado a 2ª metade do século XVII da Capela Nossa Senhora do Pilar, a esquerda o detalhe transversal mostrando a transição entre o vidrado e a chacota. No centro é apresentada o padrão tapete policromado, que teve sua cor determinada pela

medida de frequência eletromagnética que tem como unidade de medida o terahertz (THz), a esquerda os detalhes onde se observada as fissuras que se distribui por toda a chacota e vidrado em um padrão radial e não ocorre na argamassa de assentamento.

Entretanto, é importante destacar que essas fissuras não são registradas na argamassa de assentamento. Diante dessa observação, é levantada a hipótese de que o desplacamento é resultado de problemas patológicos específicos ocorridos na chacota.

2.1.2 Amostra 2

A amostra 2, apresenta um fragmento de azulejo com espessura de 1,8 cm, uma estrutura composta por duas camadas distintas. A primeira camada exibe uma base áspera, composta por chacota, enquanto a segunda camada possui uma superfície lisa, caracterizada pelo vidrado. A pintura aplicada na superfície do vidrado destaca-se pelas tonalidades de cor azul (620 – 680 THz) e amarela (530 – 510 THz) e o branco, que é colocado como base para as demais cores.

Figura 4. Fragmento (Amostra 2) de azulejo associado a 2ª metade do século XVII da Capela Nossa Senhora do Pilar. A direita é apresentada o padrão tapete policromado, que teve sua cor determinada pela medida de frequência eletromagnética que tem como unidade de medida o terahertz (THz).

A segunda etapa dos procedimentos foi as análises químicas dos fragmentos de azulejos objetivando a quantidade de elementos presentes e a identificação das fases minerais, contribuído com dados quantitativos e qualitativos.

2.2 MÉTODOS

Após a descrição das amostras analisadas nesta pesquisa, partiu-se para caracterização químico-mineralógica, com o propósito de identificar os elementos químicos e as fases minerais presentes nas amostras extraídas. Inicialmente as amostras foram caracterizadas quimicamente por meio da Fluorescência de Raios X (FRX), posteriormente identificou-se as fases mineralógicas através da técnica de Difração de Raios X(DRX) e finalmente, identificou-se as propriedades físicas e morfológicas dos minerais utilizando a microscopia com luz polarizada.

A técnica de fluorescência de raio-x utilizada nesta pesquisa foi da energia dispersiva (ED-XRF), e foi realizada pelo equipamento portátil X-Met5100 da Oxford. A difração de Raios X foi realizada pelo equipamento Bruker D2 PHASER. A microscopia empregou luz polarizada, o uso dessa técnica permite analisar como a luz interage com as propriedades específicas físicas, revelando informações valiosas sobre sua estrutura e composição (Nardy, 2008), obtendo dados que apresentam características

qualitativas (morfologia, anisotropia, alterações físico-químicas) e dados quantitativos (assembleia mineral) dos materiais estudados (Gastal e Gomes, 2014). O equipamento empregado foi o microscópio óptico petrográfico, modelo Opticam 0600P. O equipamento foi escolhido por possuir duas placas polarizadas, interpostas no caminho do feixe de luz, permitindo a análise das propriedades físicas de cada um dos minerais presentes na amostra estudada diante da luz polarizada (Goulart, 2004).

Finalmente a escala granulométrica adotada neste trabalho e a Escala geométrica Udden-Wentworth, proposta pelo sedimentólogo americano Johan Udden, 1898 e modificada pelo geólogo, Chester K. Wentworth, em 1922.

3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 FRX DOS FRAGMENTOS HISTÓRICOS

A Tabela 1, apresenta os resultados das análises químicas quantitativas (FRX) realizadas nas amostras de azulejos da Capela Nossa Senhora do Pilar. Os fragmentos dos azulejos revelaram que o Cálcio e a Sílica são os compostos dominantes.

As amostras 1 e 2 apresentam baixo teor do elemento ferro (Fe), o que explica a coloração branca dos biscoitos, diante desta pode-se indicar que a matéria utilizada na produção da chacota dos azulejos do século XVII, que revestem o interior da Capela Nossa Senhora do Pilar, são de origem calcária.

Tabela 1. Fluorescência por Raio X das 10 amostras do Século XVII, provenientes da Igreja Nossa Senhora do Pilar, Recife.

Amostra	Ca	Si	Al	Fe	K	Ti	Pb	Sr	Mn	Zr	Rb	Zn
Amostra 2	33,08%	41,49%	12,20%	7,22%	3,58%	1,08%	1,14%	0,10%	0,00%	0,04%	0,02%	0,04%
Amostra 1	40,06%	36,06%	11,70%	6,93%	2,40%	1,02%	1,44%	0,12%	0,05%	0,05%	0,05%	0,12%

3.2 DRX DOS FRAGMENTOS HISTÓRICOS

Ao realizar a análise qualitativa das amostras, a partir dos difratogramas, Figura 5. Foram identificadas as fases minerais constituintes nas chacotas das amostras: Quartzo, (SiO_2), Ortoclásio ($KAlSi_3O_8$), Ortoclasio ($KalSi_3O_8$), Calcita ($CaCo_3$), Scawtita ($Ca_7(Si_3O_9)2CO_3{\cdot}2H_2O$), Andradita (Ca $Fe^{3+}{}_2SiO4$), Akermanita, (Ca, Mg (Si_2O_7)).

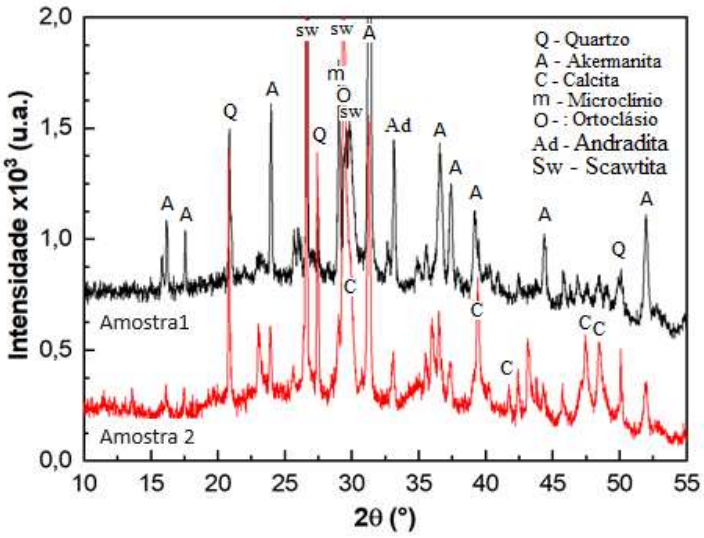


Figura 5. Difratograma das amostras 1 e 2.

3.3 MICROSCOPIA ÓTICA

Na terceira etapa do estudo buscou-se entender as propriedades físicas básicas, dos minerais que constituem a chacota, que interagem e podem afetar a aderência dos corpos azulejares.

3.3.1 Amostra 1

A análise da amostra 1 revelou características interessantes na escala microscópica. A amostra é principalmente composta por minerais incolores, que possuem a capacidade de absorver radiação eletromagnética gerada pela luz natural, os minerais são quartzo e feldspato.

Esses minerais na chacota variam na dimensão areia fina a média, a matriz argilosa constitui a maior parte da chacota, (Figura 6).

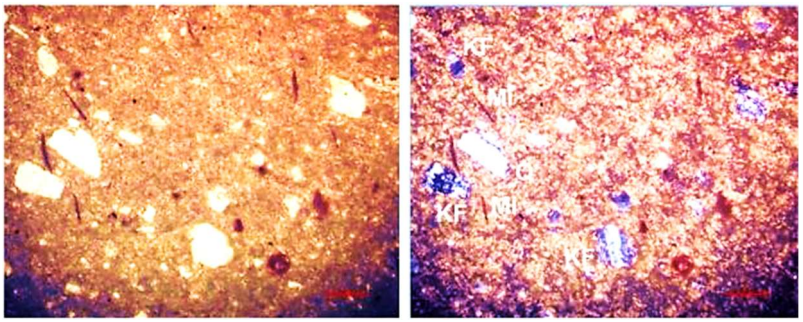


Figura 6. Fotomicrográfica da amostra 1. Na da esquerda, com luz natural, e na direta com luz ortoscópica. A assembleia mineral é composta por (Q) quartzo, (KF) feldspato.

A matéria prima utilizada na preparação da chacota, é predominantemente uma argila compacta composta por grãos de dimensões variadas, o que sugere um material pouco estável, sendo esses minerais reativos a radiação solar.

Os agregados sólidos de maior dimensão sãos mais passivos de alteração físico-química, grãos com dimensão entre 0,06 e 0,2 mm, (Figura 7).

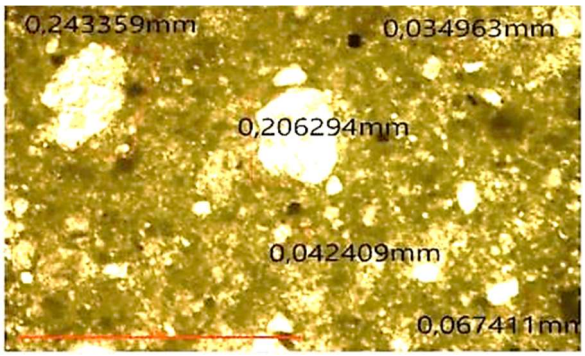


Figura 7. Fotomicrográfica, ilustra visualmente variáveis morfológicas, proporcionando uma compreensão mais clara da morfologia dos grãos na amostra 1.

A morfologia dos grãos na chacota desempenha um papel essencial na determinação da textura do material. Na Amostra 1, observa-se que os grãos apresentam esfericidade baixa e arredondamento variando de anguloso a subarredondados, sendo mais frequentemente angulosos (Araújo, 2022). Essas características morfológicas evidenciam que a matéria-prima escolhida para a produção da chacota é jovem, com uma eficácia menor, Figura 8 (A).

Outro aspecto verificado na chacota, Amostra 1, é ser constituída por grãos minerais anisotrópicos, onde o índice de refração varia entre os tons cinza claro á cinza escuro, também ocorrem grãos de anisotropia cinza azulado e extinção ondulante. Há em menor quantidade grãos que não apresentam mudanças no seu índice de refração (mineral isotrópico), logo não absorve toda a radiação eletromagnética produzida pela luz natural, Figura 8 (B).

A matriz mostrou-se homogênia na fração argila, predominando cristais agregados com morfologia micrítica que dificulta sua identificação.

Cabe destacar que os cristais de feldspato apresentam nas suas bordas uma reação que modifica sua morfologia, diminuindo sua granulometria de areia para argila, Figura 8(C).

A mudança na morfologia registrada, nas bordas dos grãos de feldspato (Plagioclásio), é denominada sericitização. Essa alteração é bastante comum e envolve a formação de argila a partir dos grãos de feldspato, Figura 8 (D).

A sericitização desempenha um papel significativo no aumento das tensões hidráulicas no interior da chacota. Quando essas tensões ultrapassam o limite de resistência do material, ocorre a formação de microfissuras que, com o tempo, evoluem para fraturas. Essa dinâmica é essencial para compreender os processos de deterioração e mudanças estruturais ocorridas nas chacotas durante os anos.

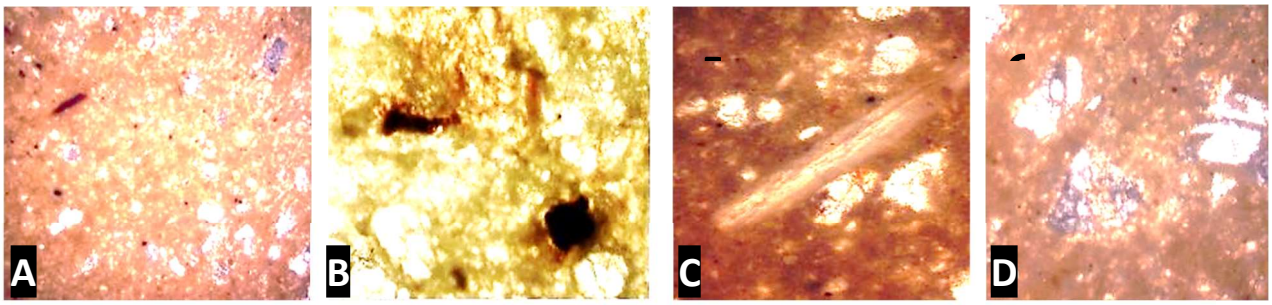


Figura 8. Fotomicrográfica, com destaque para morfologia dos grãos (A), minerais isotrópicos (B), alteração na morfologia (C) e processo de sericitização (D).

3.3.2 Amostra 2

Na Amostra 2, a chacota apresenta uma composição composta por cristais incolores nas frações de areia fina e média, envolvidos por uma matriz silte argilosa, resultando em uma textura compacta(Figura 9). Os cristais minerais predominantes apresentam anisotropia com índice de refração na cor cinza claro. Também ocorrem cristais de anisotropia variando entre incolor e cinza azulado.

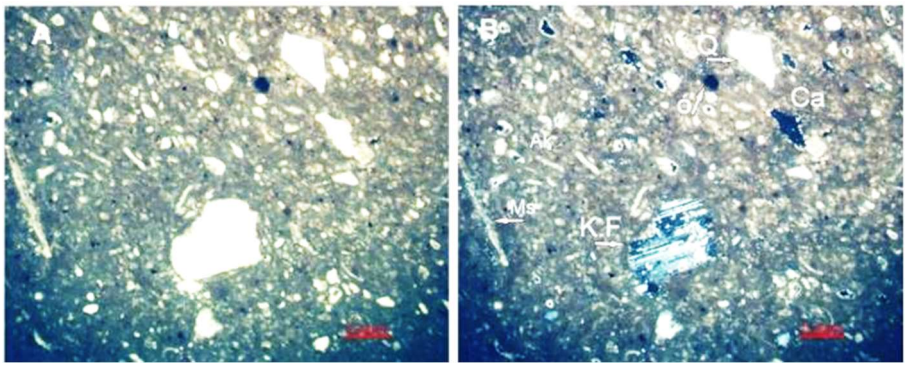


Figura 9. Fotomicrográfica da amostra 2, há esquerda com luz natural e a direta com luz polarizada, assembleia mineral presente: (Q) Quartzo, (K.F) Feldspato, (Ca) Caulinita, (Ms) mica, (Ak) Akermanita.

A morfologia dos minerais na chacota da amostra 2, apresentam esfericidade baixa com arredondamento anguloso, Figura 10.

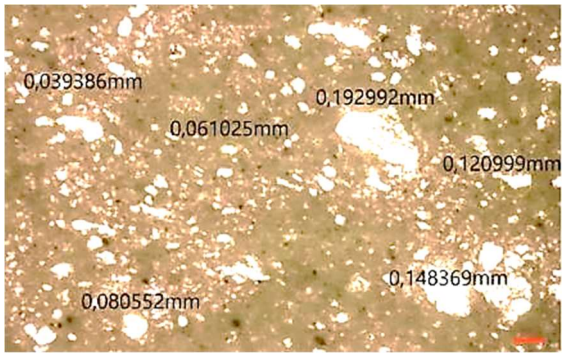


Figura 10. Fotomicrográfica ilustrando amostra 2, com medida da esfericidade dos grãos.

Os grãos de feldspato apresentam morfologia com fase inicial de alteração, do tipo sericitização, tendo os cristais suas bordas ainda preservadas, Figura 11(A).

Os grãos de quartzo têm sua esfericidade baixa e constitui mais de 70 % dos grãos presentes na chacota, Figura 11 (B), é identificado grãos de mica na matriz, Figura 11 (C).

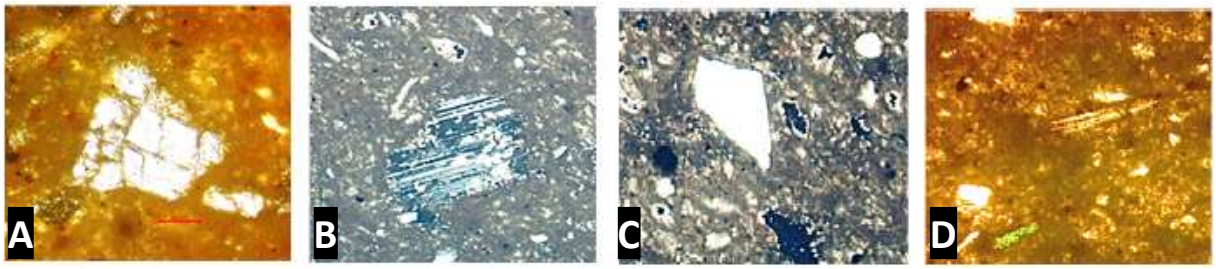


Figura 11. Fotomicrográfica da amostra 2, detalhe do mineral feldspato com processo de sericitização (A e B) em estágio inicial, grãos de quartzo(C) e mica (D).

3.4 DISCUSSÕES

Ao comparar as análises dos dois corpos azulejares históricos de um mesmo painel, foi possível identificar dois perfis técnicos distintos, descritos na 0.

A chacota da Amostra 1 exibiu predominância de grãos angulosos de Feldspato (Plagioclásio), com esfericidade baixa, na fração de areia média, revelou-se imatura, logo com maior potencial para mudanças físicas, estimuladas pelo ambiente.

Já a chacota da Amostra 2 que apresenta predomínio de grãos subarredondados de Quartzo e esfericidade média na fração areia média, mostrou-se melhor, logo com menor potencial para mudanças físicas, estimuladas pelo ambiente.

Tabela 2. Características dos dois fragmentos de chacota analisados com diferenças minerais e morfológicas.

Amostra	FRX	DRX	Luz polarizada			Textura	Espessura
	Elementos químicos	Minerais	Arredondamento	Minerais	Esfericidade		
Amostra 1	Q; KF, Mi; Ca; Gr; Ak	Quartzo, Feldspato, Caulinita, Calcita Akermanita, Granada	Anguloso a subarredondado	Quartzo, Feldspato, Caulinita, Calcita Akermanita, Granada	Média a baixa	Compacta de grãos na fração areia média e fração argila.	1,5 cm
Amostra 2	Q; Ca; KF; Ak	Quartzo, Feldspato, Calcita, Caulinita, Akermanita	Anguloso	Quartzo, Feldspato, Mica, Akermanita	Baixa	Compacta com predomínio da fração areia fina e argila.	1,8 cm
Legenda: Q – quartzo; KF – feldspato; Ca – Caulinita + calcita; Ak – akermanita; Mi – mica; Gr- granada.							

4 CONCLUSÕES

A análise por Microscopia de Luz Polarizada (MPL) se mostrou uma importante ferramenta na identificação das propriedades físicas das amostras analisadas. Ela confirmou o processo de transformação do mineral Feldspato (Na, Ca) Al (Si, Al) Si_2O_8) para a fase mineral Caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$).

Esse processo é ativado pelo aumento da umidade relativa devido ao aumento das chuvas e absorção da luz natural, evidenciando a influência de fatores ambientais na evolução mineralógica da chacota. Também se considera que os eventos climáticos ocorridos no século XVII, vivenciados pelas cidades de Recife e Olinda, foram fundamentais para a geração das manifestações patológicas na chacota do interior da capela Nossa Senhora do Pilar.

Ao longo do tempo, o mineral Feldspato (Plagioclásio), pode passar por uma série de processos de alteração que modificam suas propriedades físicas e químicas. Essas alterações podem ocorrer devido à exposição a agentes atmosféricos como a luz solar, umidade elevada e ambientes salitres.

A hidratação é um dos processos comuns de alteração do Feldspato. Nesse fenômeno, o mineral reage com a água, resultando na formação de minerais secundários, como argilas.

Essas alterações também contribuem para o surgimento de manifestações patológicas na chacota, tais como fissuras e desplacamento.

Por outro lado, a alteração mineral tem a capacidade de promover eventos cinéticos no interior das chacotas, que são a causa das microfissuras e fraturas como problemas patológicos de baixa degradação e em um avançado estágio promove os desplacamento ao diminuir a aderência entre o substrato e o corpo azulejar.

A compreensão dos mecanismos que proporcionam o surgimento de manifestações patológicas permite a elaboração de planos de manutenção mais eficientes para as edificações, desta forma, é possível reduzir a quantidade de intervenções necessárias na construção proporcionando a redução tanto de insumos naturais que seriam utilizados nessas reformas quanto na geração de resíduos sólidos que poderiam ser indevidamente descartados ou enviados a aterros sanitários.

Desse modo o estudo colabora apresentando técnicas e interpretações que possibilitam a compreensão sobre os fenômenos patológicos inerentes em chacotas cerâmicas históricas permitindo ações mais incisivas e duradouras no que concerne a preservação destes artefatos. Acredita-se que a partir da divulgação de técnicas e estudos que colaborem para estratégias de conservação da azulejaria portuguesa estaremos contribuindo para a criação de uma rotina sustentável não apenas na esfera ambiental, mas também nas esferas econômicas e sociais.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos ao INAPAS (Instituto Nacional de Arqueologia, Paleontologia e Ambiente do Semiárido) pelo financiamento deste projeto, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível. Agradecemos também ao IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa, cuja contribuição foi essencial para o desenvolvimento e a conclusão deste estudo.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, P. M. S, Morfoscopia de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio – serra da canastra (mg) Universidade Federal de Uberlândia instituto de geografia curso de bacharelado em geografia, 2022, pp 16- 22.

BONDUKI, Nabil, Intervenções urbanas na recuperação de centros históricos. Brasília, DF: Iphan/ Programa Monumenta, 2010, 376 p.

BRITO, Marcelo, A preservação do patrimônio cultural no século XXI: resgate e desafios para uma “nova gestão” do IPHAN para a reconstrução do Brasil. Revista Restauro, v.8, n.15, 2024.

CARVALHO JR., Antônio Neves. Técnicas de revestimento; Apostila do Curso de Especialização em Construção Civil. 1.ed. Belo Horizonte: DEMC- EE.UFMG, p.54,1999.

COSTA, Marcondes, L; SANJAD, Thais ABC; PAIVA, Rosildo, S. *Mineralogia e química de azulejos Alemães e Portugueses de prédios históricos na região Amazônica e sua susceptibilidade natural à degradação tropical (intemperismo)*. Acta amazônica, v. 43, p. 323-330, 2013.

GASTAL. Maria Do Carmo; GOMES. Márcia Elisa B. *Guia para Microscopia de Minerais em Lâminas Delgadas*, p: 14-113, 2014.

GEYER, Rejane Maria Tubino. Influência do choque térmico na aderência de azulejos ao substrato. 1994, pp 27.

GOULART, Evaristo Pereira. Técnicas instrumentais para a caracterização mineralógica e microestrutural de materiais cerâmicos arqueológicos Canindê *Revista do Museu de Arqueologia de Xingó*, Universidade Federal de Sergipe, n;4, p. 249-271, 2004.

NARDY, Antônio José Ranalli; MACHADO, Fábio Braz. *Mineralogia Óptica*, cap; VI. P:84, 2008.

SAGAVE, André Matte. Desenvolvimento de Método de Ensaio de Aderência ao Cisalhamento de Peças Cerâmicas de Revestimento, 2001, pp 11.

SANTOS, Leandro Diomério João. Genesis and evolution of the sandbank in the neighborhood of Recife Antigo, Revista da Casa da Geografia de Sobral Recife – Pernambuco, v. 18, n. 1, 2016, p118-13.

SIMÕES, J. M. Dos Santos. *Azulejaria em Portugal nos Séculos XV e XVI*. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1969.

TEROL, Maryléne. *Azulejos em Lisboa*. Ed. Hervas, Paris, 2002

VIERIRA, Glenda Salgado. Decadência e expansão no Litoral Norte de Olinda (1654 – 1710); A freguesia de Maranguape, UFPE, Programa de Pós- graduação em Arqueologia, Recife, 2010, p 69-123.

SABBATINI, F. H. Patologia das argamassas aspectos – físicos, Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, São Paulo, 1986, pp 69 – 76.

PILEGGI, Aristides. *Cerâmica no Brasil e no Mundo.* Ed. Livraria Martins, São Paulo,1958.

DAUDT, J. et al. Análise comparativa entre os métodos de tração simples e de cisalhamento para avaliação de desempenho mecânico de um composto polimérico de dispersão aquosa para assentamento de pisos e revestimentos de paredes.2021. XVI Congresso latino-americano de patologia de construção (CONPAT, 2021)

LOURENÇO, T., MATIAS, L., FARIA, P. (2017), Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. Construction and Building Materials. 148:419-428.

WINNEFELD, F. KAUFMANN, E. HACK, E. HARZER, S. WETZEL, A. ZURBRIGGEN, R. (2012), Moisture induced lenght changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strenght. Construction and Building Materials. 30:426-438

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NO BARROCO PERNAMBUCANO: O CASO DA CAPELA DA JAQUEIRA, EM RECIFE (PE)

Joyce Silva[a]; Júlia Santos[a]; Eudes Rocha[b]; Adolpho Araújo[b]

[a]Mestranda (Universidade de Pernambuco, R. Benfica, 455, 50720-001, Recife, Brasil), jkss@poli.br; jos1@poli.br.

[b]Doutor e docente (Universidade de Pernambuco, R. Benfica, 455, 50720-001, Recife, Brasil), eudes.rocha@poli.br; aguia@poli.br.

RESUMO

O estudo das manifestações patológicas em edificações permite a identificação e análise dos danos que afetam tanto a estética quanto a funcionalidade das construções, especialmente edificações históricas que representam a identidade e a memória coletiva de uma comunidade. A pesquisa enfatiza a Igreja de Nossa Senhora da Conceição das Barreiras, conhecida como Capela da Jaqueira, no Recife, Pernambuco. Construída na segunda metade do século XVIII, a capela possui tombamento pelo IPHAN, apresenta características barrocas, pinturas a óleo e azulejos portugueses. Objetivando identificar as características construtivas originais, foram coletadas amostras de argamassas analisadas por meio de Fluorescência de Raios X (FRX), comprovando o uso de cal como principal componente da argamassa original. As inspeções visuais das fachadas e do interior da edificação indicaram que, embora a capela apresente um estado de conservação regular, intervenções indevidas foram realizadas evidenciando áreas com materiais diferenciais, rachaduras, infiltrações e biodeterioração nas fachadas, além de problemas no interior como degradação das pinturas e azulejos. Neste sentido, destaca-se a importância de conhecer e respeitar materiais e técnicas originais ao adaptar a edificação às necessidades atuais, garantindo estratégias sustentáveis na preservação da construção histórica.

Palavras-chave: Manifestações patológicas; Patrimônio religioso; Materiais.

1 INTRODUÇÃO

A cidade do Recife, capital pernambucana, é conhecida por seu rico patrimônio histórico cultural e destaca-se pela combinação de influências portuguesas, holandesas e brasileiras em sua arquitetura. O estilo rococó, que emergiu na França por volta de 1730 e chegou ao Brasil em 1753, trouxe uma nova abordagem estética, particularmente na decoração interna das igrejas (Oliveira e Ribeiro, 2015). Caracterizado pela leveza e ornamentos mais delicados em comparação ao barroco, o rococó promoveu um regionalismo intenso, permitindo a identificação de características singulares em cada região do país (Silva, 2022).

Neste contexto, a Capela da Jaqueira, construída na segunda metade do século XVIII no local do antigo Engenho e atual bairro da Jaqueira, reflete não apenas os valores estéticos do estilo no litoral pernambucano, mas também, o conjunto de técnicas construtivas e materiais disponíveis localmente. Em vista disso, a preservação do patrimônio histórico exige o envolvimento de profissionais capacitados no compromisso de difundir as diversas autenticidades construtivas, relegando a conservação do bem, e considerando os desafios a que estão inerentes.

Diferenciar entre a deterioração natural e problemas patológicos surgidos por ausência de manutenção ou mau uso da edificação é fundamental, contudo, a correta interpretação das anomalias nem sempre garante o sucesso das intervenções. Bolina, *et al.* (2019) defendem que é essencial

identificar as alternativas de recuperação mais adequadas para cada tipo de defeito, pois medidas corretivas – e até mesmo preditivas – inadequadas podem agravar os problemas existentes ou mascará-los.

Panakaduwa, *et al.* (2024) focaliza as questões relacionadas à modernização de edifícios históricos, e aponta que a principal delas reside em encontrar um equilíbrio entre a eficiência energética e a preservação dos valores históricos. Desta forma, os autores supracitados salientam ainda que uma abordagem holística de modernização, que inclua tecnologia, experiência, incentivos, colaboração e compromisso das partes interessadas é indispensável.

Visando analisar o estado de conservação da Capela da Jaqueira, considerando os materiais empregados em sua construção e os últimos acontecimentos históricos a que esteve submetida, a pesquisa objetiva analisar os aspectos visuais da edificação considerando a autenticidade da edificação. Promover a sustentabilidade no contexto da preservação do patrimônio cultural é uma ação cada vez mais emergente, e deve estar inserida nos debates relacionados à compatibilidade e comportamento dos materiais históricos – além de subsidiar as decisões intervencionistas nas edificações.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Entre o século XVIII e primeira metade do XIX, precedente ao desenvolvimento do centro urbano de Recife, o solo fértil às margens dos rios da cidade e a emergente produção de açúcar culminou no surgimento de sítios de engenho conhecidas como arrabaldes (Halley, 2013). Ao longo do rio Capibaribe, esses engenhos se instalavam com suas fachadas voltadas para a água, visando a potencialidade das artérias fluviais que ligam a região ao porto, favorecendo o transporte de mercadorias (Villaça, 2001).

No sentido dos Engenhos de Casa Forte, Monteiro, Apipucos e Dois Irmãos, no trecho denominado de Ponte do Uchôa, a Capela de Nossa Senhora da Conceição foi erguida na segunda metade do século XVIII – onde ficou popularmente conhecida como “Capela da Jaqueira”, dada abundância da frutífera no entorno (Silva, 2022). Representando a influência do catolicismo colonial, Diniz (2019) aponta que o capitão português Henrique Martins deixou a capela da Jaqueira endividada após sua morte e já no século XIX, Bento José da Costa – então homem mais rico de Recife – adquiriu e reconstruiu a capela, transformando-a em um símbolo do seu status social. Entre os eventos significativos sediados no local, está o casamento de sua filha com Domingos José Martins, um dos heróis da revolução pernambucana de 1817 (Guerra, 1970).

Guerra (1970) assinalou o descaso a que a Capela esteve relegada em meados do século XX, sendo alvo de fortes degradações, vandalismo e até mesmo de saqueamentos após transformação urbana da Zona Norte da cidade. Neste cenário, Diniz (2019) descreve os conflitos que surgiram entre o Serviço de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN) e a herdeira e inventariante de Bento José da Costa, durante o processo de tombamento da edificação, como motivação para o abandono a que esteve submetida. No entanto, é possível perceber na Figura 1 que a capela foi abrigada pelo projeto de paisagismo do parque, elaborado pelo arquiteto Roberto Burle-Marx em 1954, iniciando o processo de proteção e recuperação de sua integridade e originalidade sob responsabilidade do órgão de preservação do patrimônio nacional (Guerra, 1970).

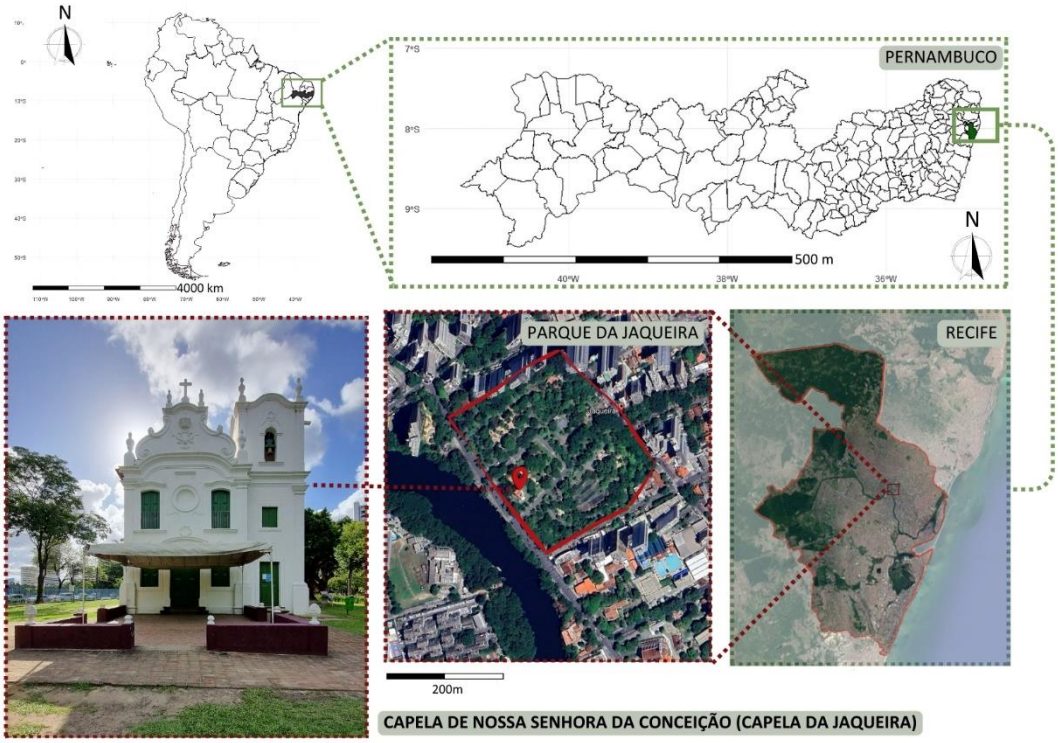


Figura 1 – Localização do estudo de caso (Fonte: Os autores (2024), adaptado via *R.4.3.3* e *Google Earth)*

Com o passar dos anos, os engenhos foram loteados, transformando-se nos bairros de mesmo nome. Atualmente, a área de preservação do Parque da Jaqueira é apresentada por Barbosa, *et al.* (2021) como um "espaço democrático" em que são realizadas múltiplas atividades associadas ao espaço natural de contemplação e socialização, alinhadas a aspectos socioambientais que por sua vez, contribuem com a conservação ambiental e qualidade de vida da população. Às margens do rio Capibaribe, e no interior do perímetro do parque, destaca-se a preservação de uma capelinha branca cuja simplicidade na fachada "contrasta com a suntuosidade do seu interior, um convite para momentos de oração e contemplação" (Silva, 2022) e encontra-se aberta para visitação, com eventos e missas sediados regularmente.

2.2 MÉTODO DE PESQUISA

Com base no conhecimento histórico sobre a edificação e seu entorno, esta pesquisa fundamenta uma análise dos aspectos construtivos da Capela da Jaqueira, utilizando um referencial abrangente de diversos períodos. A literatura disponível embasa diversas discussões acerca das tipologias construtivas da época, bem como dos materiais comumente empregados na região, e junto aos registros selecionados, facilitam na compreensão das técnicas utilizadas na época e seu comportamento diante dos processos de conservação ao longo do tempo.

Aprofundando na caracterização dos materiais utilizados na construção original da Capela, foram realizadas coletas de amostras de argamassa no interior da edificação, especificamente na torre sineira. As amostras foram coletadas em duas partes distintas: uma do térreo (A1) e outra do pavimento superior (A2), a fim de atestar se existe diferença significativa nos materiais e etapas construtivas. As amostras, detalhadas na Figura 2, foram analisadas por dispersão de energia (FRX-DE) com o equipamento X-MET 5100 da *Oxford Instruments*. O método para quantificar os elementos na

amostra foi o Soil_LE_FP, que determina elementos usando parâmetros fundamentais – e o tempo de leitura de cada medida foi de 60 segundos, com 3 medidas para cada amostra.

Figura 2 – Detalhamento das amostras A1 e A2 (Fonte: Os autores, 2024)

Partindo da caracterização, os resultados das inspeções visuais *in loco* no mês de julho deste ano serão apresentados junto aos registros fotográficos – realizados por meio de sistema de câmera dupla de Iphone 13 (grande-angular e ultra-angular) de 12MP, com ângulo de visão máximo de 120°. A análise externa se subdivide entre as fachadas Nordeste e Noroeste; Sudeste e Sudoeste, junto às discussões relacionadas às origens e mecanismos de deterioração embasadas por referencial teórico do tema em questão.

As inspeções no interior se limitaram aos ambientes do térreo – com exceção do altar e sacristia – devido à inacessibilidade ao pavimento superior e outros ambientes durante as visitas, e deram ênfase ao comportamento estético dos materiais e notórias intervenções irregulares na edificação. Todo o processo da pesquisa evidencia o caráter do barroco e rococó pernambucano, indagando a manifestação do conhecimento sobre a arquitetura local enquanto se propõe a debater sobre estado de conservação da edificação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DE MATERIAIS E PROSPECÇÃO

A Capela da Jaqueira é uma das mais importantes edificações históricas da região. Ao longo dos anos passou por diversas intervenções que buscaram preservar sua estrutura e adaptar seu uso às necessidades contemporâneas. Embora não existam documentos originais sobre sua construção, análises comparativas de detalhes arquitetônicos do frontispício com outras igrejas contemporâneas sugerem, segundo Ayrton Carvalho, professor da antiga Escola de Belas Artes da Universidade do Recife, que seu projeto e execução sejam atribuídos ao Mestre Pedreiro Francisco Nunes Soares, que também trabalhou na fachada da Igreja do Mosteiro de São Bento de Olinda entre 1761 e 1763 (Silva, 2022).

A fachada destaca-se por seu design arquitetônico simples. A estrutura principal da igreja inclui a nave, a capela-mor e a sacristia, conectadas por um corredor lateral que dá acesso também ao nível superior e a torre sineira (Figura 3). Na frente da igreja, há um adro com piso de tijoleira, cercado por um muro baixo com pináculos decorativos (IPHAN, 2005).

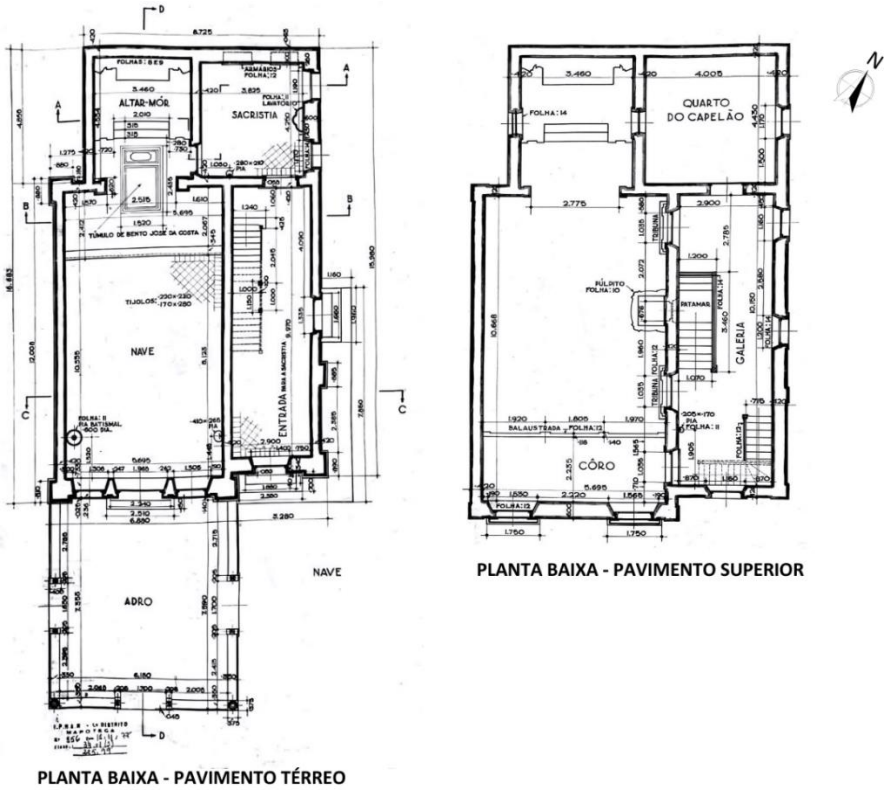


Figura 3 – Planta baixa dos pavimentos térreo e superior (Fonte: Os autores, 2024)

A decoração interna da Igreja da Jaqueira é um exemplo notável do rococó pernambucano, com talha, azulejos e pinturas ornamentando os forros da nave e da capela-mor. O retábulo, com suas colunas torsas e douramento integral, apresenta influências do barroco joanino, enquanto as rocalhas o situam no período rococó (Oliveira e Ribeiro, 2015). No entanto, as pinturas dos forros, datadas do final do século XVIII, são anônimas. Já o douramento da sacristia, executado por Sepúlveda, em 1751, é também uma das obras-primas do barroco pernambucano, destacando-se pela sua qualidade e técnica (Silva, 2022).

Durante o período colonial barroco no Brasil, a pedra calcária foi amplamente utilizada nas cidades litorâneas tanto como material construtivo quanto decorativo. Em regiões ricas em calcário, como o Nordeste, esse material predominava nas edificações, sendo empregado em estruturas e elementos ornamentais (Brasil, 2000). Além do calcário, segundo Carvalho (1942), o arenito também foi utilizado em construções históricas em Olinda e Recife, extraído dos arrecifes do Recife e utilizado junto ao calcário em diversas construções.

Com o desenvolvimento das olarias, o uso de tijolos e telhas canudo tornou-se comum nas construções. As igrejas começaram a empregar tijolos nas alvenarias, especialmente nas paredes mais altas e com grandes aberturas, enquanto as rochas continuaram sendo usadas nas fundações, ombreiras, vergas e ornamentos (Carvalho, 1942). Para a composição dessas alvenarias, as argamassas predominantemente até o século XIX, eram compostas principalmente de cal, com variações incluindo argila. Essas misturas eram usadas tanto para assentamento quanto para revestimento (Vasconcellos, 1971). As argamassas de cal eram o principal aglomerante hidráulico, capazes de endurecer na água e resistir a ambientes agressivos, como a atmosfera marítima (Massazza, 1988).

Para fundamentar a caracterização dos materiais originais da Igreja da Jaqueira, a análise de Fluorescência de Raios X (FRX), conforme apresentado no Quadro 1, revelou poucas diferenças na

composição das amostras de argamassa do térreo e do pavimento superior. A presença dominante de cálcio (Ca) em ambas as amostras comprova o uso de cal como um dos principais componentes da argamassa, típico das construções históricas. A argamassa em pó do térreo apresentou uma maior concentração de cálcio (87,32%) em comparação ao fragmento de argamassa do pavimento superior (82,63%), enquanto a diferença de ferro (Fe) está possivelmente relacionada a diferentes fontes de areia ou materiais argilosos utilizados na preparação da argamassa.

Quadro 1 – Resultados da análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

Amostra do térreo										
Ca	**Si**	**Fe**	**K**	**Ti**	**Co**	**Ba**	**Sr**	**Zr**	**Se**	**Rb**
87,32%	5,90%	2,52%	2,08%	1,21%	0,59%	0,12%	0,09%	0,09%	0,05%	0,03%
Amostra do pavimento superior										
Ca	**Si**	**Fe**	**K**	**Co**	**Ti**	**Sr**	**Zr**	**Se**		
82,63%	8,8%	3,89%	2,95%	0,70%	0,68%	0,17%	0,11%	0,08%		

Fonte: Os autores (2024)

A compreensão detalhada dos materiais e métodos empregados proporciona embasamento para a restauração e conservação de edificações históricas, destacando a importância de combinar conhecimentos históricos com técnicas modernas para garantir a sustentabilidade e integridade das estruturas patrimoniais. O uso de tecnologias avançadas, como a FRX, são pontes importantes para a caracterização das argamassas históricas. A aplicação de materiais adequados e sustentáveis, junto com diretrizes de ecodesign, reduz os impactos ambientais e melhora a compatibilidade entre materiais antigos e novos (Medeghini et al., 2024).

3.2 INSPEÇÃO DAS FACHADAS

A inspeção do estado de conservação nas fachadas foi realizada poucos meses após a última pintura na fachada, permitindo melhor visibilidade no início da manifestação dos danos tendentes do comportamento natural dos materiais empregados na edificação. Entre eles, a pintura em cal natural já começa o processo de destacamento entre as volutas e pináculos do frontão, conforme apontado por Kanan (2008), a técnica de caiação não forma uma película, o que faz com que a parede naturalmente busque a superfície, evitando a retenção de umidade e eliminando problemas de condensação interna.

A respeito dos mecanismos mecânicos, foi identificada uma rachadura entre as cornijas da coluna da Igreja e o volume recuado do campanário, destacada no mapeamento esquemático dos danos nas fachadas Nordeste e Sudeste na Figura 4. Todavia, também foram verificados danos provenientes da drenagem das águas pluviais das cobertas – um desafio construtivo presente em edificações históricas e persistente até os dias atuais. No topo da lateral da torre sineira foram projetadas pingadeiras que sacam da fachada destinando as águas pluviais diretamente ao soco das colunas estruturais, iniciando um processo de escurecimento do revestimento pela presença constante de umidade.

Conforme apontado por Gallois (2016), não há uma correlação direta entre a origem da degradação, a sua manifestação nos materiais e por fim, a solução ideal na intervenção de conservação, salientando que, ao longo do tempo, a ação da água por meio da capilaridade pode estimular mecanismos biodeteriorantes que podem desenvolver outros problemas estruturais, estéticos e até mesmo de saúde. A exemplo disto, a vegetação avançando na cornija lateral, logo abaixo de um outro dreno em PVC – adaptado em alguma intervenção irregular – demonstra uma das expressões deste mecanismo.

Figura 4 – Mapeamento dos danos - fachadas Nordeste e Sudeste (Fonte: Os autores, 2024)

Ainda sob a biodeterioração, observou-se um prequeno trecho de desplacamento do revestimento, além de camadas de biofilme começando a proliferar na parte sombreada entre as fachadas Noroeste e Sudoeste. A presença de grandes jaqueiras neste trecho estimulam a biodeterioração na parede externa à sacristia, onde na Figura 5 é possível analisar um comportamento de infiltração por drenos mal instalados neste local. Embora notório descascamento da camada argamassada de reboco para sanar o problema, a infestação de raízes infiltradas no revestimento se proliferam quanto mais houver umidade e calor, segundo Tinoco (2019).

Figura 5 – Mapeamento dos danos - fachadas Noroeste e Sudoeste (Fonte: Os autores, 2024)

Os acabamentos dos beirais, conhecidos como eira, beira e tribeira não vinham acompanhados de calhas na época, e por este motivo, as águas das cobertas mais altas são diretamente despejadas nas paredes da edificação – gerando manchas de umidade escurecidas – como visto na Figura 5. Irregularidades do acabamento no trecho inferior da fachada indicam que apenas pinturas e limpezas foram realizadas nas últimas intervenções, sugerindo a profunda ação da umidade a ponto de destacar o revestimento argamassado.

Os gestores da Igreja destacam as reformas recentes às quais a edificação foi submetida, incluindo a recuperação do telhado após mais de quatro décadas sem manutenções. Relatos destacam que goteiras e infiltrações generalizadas eram frequentes, danificando elementos artísticos no interior da edificação. Conforme apontado por Pedrosa (2023), as diversas espécies de aves que sobrevoam a região arborizada estão associadas ao desenvolvimento de vegetação na coberta da edificação – problema que persistiu mesmo após a intervenção de retelhamento.

3.3 INSPEÇÃO DO INTERIOR

O mapeamento esquemático de danos, apresentado na Figura 6, evidenciou a utilização de material diferencial para preenchimento de rasgos nas paredes decorrentes da instalação de ventiladores. Destaca-se que, conforme o Art. 4º da Portaria nº 420 de 2010 do IPHAN, qualquer intervenção em bens tombados necessita de autorização prévia do órgão. O uso de materiais incompatíveis pode causar danos estruturais e estéticos. Destaca-se, portanto, a importância de empregar materiais e técnicas de reparo que respeitem as características originais dos edifícios, incluindo cores e texturas (Lara C., 2020). Este princípio de compatibilidade de materiais também se aplica às tintas modernas utilizadas indevidamente em repinturas de patrimônio cultural edificado.

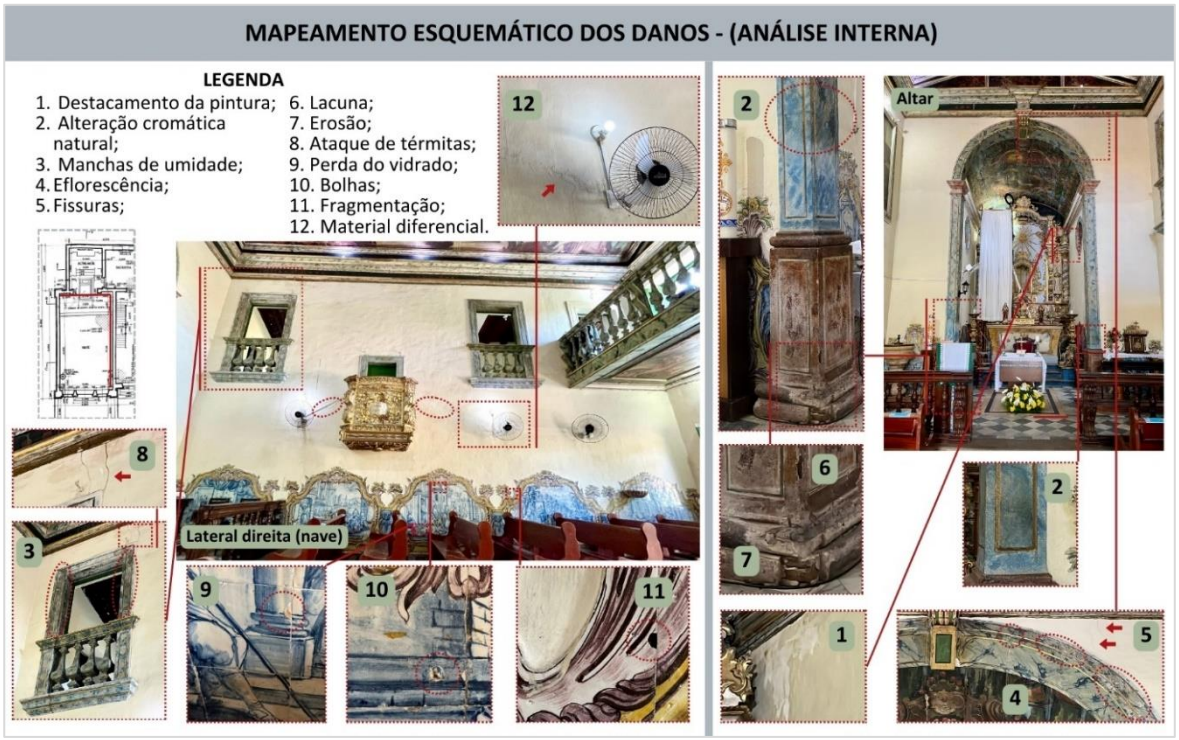
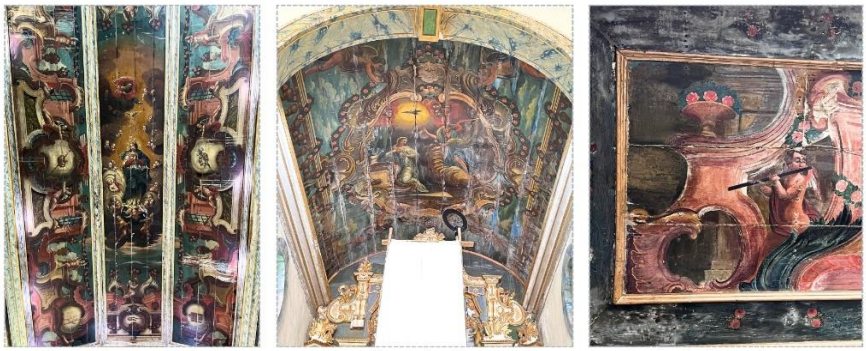


Figura 6 – Mapeamento fotográfico dos danos – nave central (Fonte: Os autores, 2024)

Os acabamentos em pedra trabalhados na técnica de marmorização têm uma tendência natural de alteração cromática com o tempo, e foi constatado comportamento diferenciado da coloração nas

colunas da arcada do altar. No arco superior foi identificada também a eflorescência, se apresentando em filetes por entre as juntas das peças. Uma pequena lacuna foi identificada na quina da base de uma das colunas; e no trecho inferior, a erosão – que segundo Tinoco (2019, p.7), "é o resultado de um processo de desagregação das partículas das superfícies, bordas, cantos ou detalhes dos elementos que ocorrem lenta e gradualmente", além de estar associada às intempéries, como o acúmulo de águas provenientes das infiltrações na coberta.

A janela superior esquerda da lateral direita da nave apresentou um escurecimento anômalo devido às fortes infiltrações no telhado, bem como marcas de ataque de térmitas às quais as esquadrias estiveram sujeitas - apesar disso, os gestores afirmam que o problema foi controlado. Não apenas as cantarias e as esquadrias, mas também as suntuosas pinturas dos forros amadeirados da Igreja foram principalmente danificados com a infiltração proveniente da falta de manutenção nos telhados – como é possível ver na Figura 7 manchas esbranquiçadas permeando as peças amadeiradas.



Forro da nave central "*Assunção da Virgem Maria*" | Forro do altar "*Anunciação*" | Trecho do forro do subcoro "Os Esponsais da Virgem com São José"

Figura 7 – Pinturas dos forros danificadas (Fonte: Os autores, 2024)

Os painéis azulejares que circundam a nave apresentam várias manifestações patológicas, algumas decorrentes da ação natural do tempo, outras devido à intervenção humana ou fatores ambientais. Cisneiros Muniz (2009), em seus estudos e ensaios laboratoriais, diagnosticou diversos danos em azulejos datados dos séculos XVII e XVIII em Recife e Olinda, alguns dos quais são observáveis no objeto de estudo deste trabalho. Entre os problemas identificados estão:

- Perda do vidrado: Pode ser causada pela cristalização dos sais trazidos pela umidade ou pela baixa resistência a impactos externos e superficiais.
- Fissuras: No vidrado, resultam de pressões mecânicas desiguais entre os diferentes materiais da chacota ou de mudanças de temperatura.
- Bolhas: Resultado de uma queima muito rápida durante o processo de fabricação, fazendo com que os gases fiquem presos no esmalte, resultando em bolhas que podem estourar através do vidrado.
- Inchaço: Bolhas na superfície da argila, que geralmente surgem durante a queima, são causadas pela presença de material carbonáceo retido na argila.
- Fragmentação: No vidrado, é resultante principalmente de fatores mecânicos (antrópicos).

A alteração cromática dos painéis azulejares é notória, e essa anomalia se manifesta como uma mudança na tonalidade ou opacidade em comparação à sua cor original (Rocha, 2023). Para Muniz *et al.* (2017), isso deve-se a utilização de materiais de limpeza inadequados, exposição a intempéries além de oxidação entre o vidrado e o biscoito. Além disso, os restos de adesivo nos azulejos são considerados elementos espúrios, já que são resíduos indesejados que alteram a aparência e a integridade da superfície dos azulejos – como é possível notar na Figura 8.

Figura 8 – Mapeamento fotográfico dos danos – nave central (Fonte: Os autores, 2024)

Ao examinar internamente as paredes que fazem fronteira com a área externa, é possível observar manchas de umidade, variações cromáticas naturais e desplacamento do revestimento. Esses fatores degradantes são exacerbados pela exposição às intempéries naturais, dado que a fachada, orientada para o sudoeste, está sujeita à chuva e à insolação poente parcial.

4 CONCLUSÕES

A Capela da Jaqueira, com seu rico patrimônio histórico e cultural, é um testemunho da diversidade arquitetônica e estética que marca a história do Recife. A análise das técnicas construtivas e dos materiais utilizados, junto com a identificação das anomalias presentes, evidencia a importância de intervenções cuidadosas e bem fundamentadas para a preservação desse patrimônio. Os dados obtidos através da caracterização de materiais e das inspeções visuais proporcionam um breve panorama, porém detalhado, sobre o estado de conservação regular da capela.

A investigação revelou tanto a robustez quanto as fragilidades da edificação, destacando a necessidade de abordagens que respeitem as características originais e utilizem materiais compatíveis. A integração entre conhecimento histórico e tecnologia moderna mostrou-se essencial para a compreensão e conservação das edificações históricas. As técnicas avançadas de análise, como a Fluorescência de Raios X, auxiliam na tomada de decisões mais precisas e informadas, promovendo a sustentabilidade e a integridade das estruturas patrimoniais.

A ausência de maior variedade de manifestações patológicas estruturais no interior da igreja permite evidenciar as práticas irregulares na modernização das instalações e seu potencial disforme visual – não anulando a possibilidade de desenvolvimento de danos operacionais nesta estrutura. Manifestações exteriores (nas fachadas) são, em geral, características de danos predisponentes – comportamento natural dos materiais – e de consequências na disposição dos elementos originais.

Em suma, a preservação da Capela da Jaqueira depende de um equilíbrio entre manutenção regular, intervenções compatíveis e o uso de tecnologias adequadas. A continuidade desse esforço é fundamental para garantir que as futuras gerações possam apreciar e aprender com esse importante símbolo da história pernambucana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INAPAS (Instituto Nacional de Arqueologia, Paleontologia e Ambiente do Semiárido) e a Universidade de Pernambuco – UPE pelo apoio e financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Almeida, F. (2005). Manual de Conservação de Cantarias. 1ª ed. Brasília: IPHAN/Programa Monumenta. http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Man_ConservacaoCantarias_2edicao_m.pdf

Aragão, I. R. (2019). O Imaginário da cidade de São Cristóvão: Patrimônio, turismo cultural e elementos em pedra calcária, no Centro Antigo. Revista Turismo & Cidades 1 (1). São Luís:39-56. https://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/turismoecidades/article/view/11697

Barbosa, M. V., Costa, A. M. M., Santos, L. C., Santana, V. V., Souza, A. C. P. E. (2021). Parque urbano: Percepção ambiental na unidade de conservação parque da Jaqueira, Recife-Pernambuco. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 10, n. 1, p. 402–416. https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e12021402-416

Bolina, F. L., Tutikian, B. F., Helene, P. (2019). Patologia de Estruturas. São Paulo: Oficina de Textos. 320p.

Carvalho, A. (1942). Algumas notas sobre o uso da pedra na arquitetura religiosa no Nordeste. In: *Revista do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional*. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde e Educação. p. 277 – 294.

Cisneiros Muniz, Suely (2009). Cronologia histórica e patologias dos azulejos em Pernambuco, entre os séculos XVII e XVIII . Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CFCH. Arqueologia, Recife. 340 folhas: il., fig., tab.

Diniz, R. P. (2019). Relações de poder e tensão no tombamento da Jaqueira em Pernambuco-PE. Revista Mosaico, v. 12, p. 337-351. https://doi10.18224/mos.v12i1.7029

Gallois, C. J. S. (2016). Gestão da conservação da pedra no patrimônio construído – Questões e propostas. Geonomos. Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. https://doi10.18285/geonomos.v24i2.851

Guerra, F. (1970). Velhas igrejas e subúrbios históricos. 2. ed. rev. e ampl. Recife: Fundação Guararapes.

Halley, B. M. (2013). Dos moinhos de açúcar aos sítios de arrabaldes: A formação dos bairros continentais na cidade do Recife. Revista de Geografia, v.30, n.3. https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229080

Kanan, M. I. (2008) Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal – Brasília, DF: Iphan / Programa Monumenta. Cadernos Técnicos: 8, 172 p.

Lara C., M. Lenin & Sanz-Arauz, David & Martínez, Inés. (2020). Historic mortars in the constructions of Quito of the 16th, 17th and 18th centuries". Ge-Conservacion. 17. 71-81. 10.37558/gec.v17i1.687.

Massazza, F. (1988). Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: HEWLETT, P. C. LEA'S Chemistry of Cement and Concrete. 4. ed. Toquío: Elsevier. Cap. 10, p. 487-501.

Medeghini, L. *Et al.* (2024). How the materials knowledge of Roman mortars could be helpful for the production of future materials: The case of the Aqua Traiana aqueduct (Rome, Italy). Cement and Concrete Research, v. 179, n. 107478. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884624000590

MUNIZ, E. F.; MONTEIRO, G. A.; SOUZA, R. B.; LUCENA, R. A.; MAIOR, P. M. S.; LAVALLE, H. Cronologia de azulejos históricos: Danos e caracterização química dos revestimentos de fachadas do Museu da Abolição no Recife, Pernambuco. CLIO Arqueológica, v. 32, n. 2, p. 253-288, 2017. Programa de Pós-graduação em Arqueologia da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2017.

Oliveira, M. A. R.; Ribeiro, E. S. (2015). Barroco e rococó nas igrejas de Recife e Olinda. Roteiros do Patrimônio. Vol. 1. Brasília, DF, IPHAN.

Panakaduwa, C., Coates, P., Munir, M. (2024). Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review. Energy & Buildings. V.313, n.114226. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114226

Pedrosa, L. F. (2023). Estado de conservação da Capela de Nossa Senhora da Conceição (Capela da Jaqueira) – PE. Projeto de Final de Curso para bacharel em Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco, Recife.

Rocha, E. A. (2023). Proposição de um método para estudo da degradação de azulejos portugueses em monumentos históricos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 186 f: il.

Silva, I. B. (2022). Capela da Jaqueira do Recife: História e patrimônio cultural. Relatório técnico (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em História. Recife. 86p.

Vasconcellos, S. (1971). Arquitetura no Brasil: Sistemas construtivos. 4° Edição revista. Belo Horizonte: editora da UFMG, 1971.

Villaça, F. (2001). Espaço intra-urbano no Brasil – São Paulo: Studio Nobel: FAPESP: Lincoln Institute.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM AZULEJOS DO SÍTIO HISTÓRICO DE OLINDA (PE): ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DANOS DE PAINEL INTERNO E DE FACHADA

Joana Beatriz Silva[a] ; Eudes Rocha[b] ; Pablo Goes[c] ; Paulo Martin [d]

[a] (UPE - Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 50720-001, Recife, Brasil), jbos@poli.br

[b](UPE - Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 50720-001, Recife, Brasil), eudes.rocha@upe.br

[c](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) pablo.goes@ufpe.br

[e](UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 50670-901, Recife, Brasil) paulo.maior@ufpe.br

RESUMO

Em função do processo de colonização brasileira e, consequentemente, do contato com os portugueses, pode-se encontrar com facilidade painéis azulejares em edifícios religiosos antigos, casarios, sobrados, casarões e praças de cidades importantes e históricas do nordeste brasileiro. Devido ao longo tempo de uso e à exposição a diversos mecanismos de degradação, é bastante comum encontrar manifestações patológicas nessas peças antigas, principalmente as remanescentes do período colonial. Pelo fato de existirem problemas patológicos diferentes entre azulejaria interna e externa, por causa da diferença de exposição nos ambientes, e por não haver muitos estudos comparativos entre esses problemas, sentiu-se a necessidade de explorar esse tema. O objetivo desse trabalho é identificar, caracterizar e mapear anomalias presentes em azulejos antigos na cidade de Olinda-PE, evidenciando e comparando os problemas patológicos que ocorrem nos azulejos internos e azulejos de fachada. Para isso, realizou-se um breve estudo sobre os edifícios religiosos e casas da região, visitas técnicas, análise visual dos problemas patológicos, registro fotográfico e mapeamento de danos dos painéis estudados. Os resultados encontrados podem servir como base para futuros estudos patológicos no ramo da azulejaria histórica, quantificar as anomalias presentes nos azulejos internos e de fachada, auxiliar em possíveis intervenções de restauro no futuro e, consequentemente, preservar a cultura nordestina. Dessa forma, vale salientar a importância da manutenção e conservação desse bem patrimonial que é tão relevante para a história do país, mantendo as características, valor histórico e autenticidade dessas peças que resgatam o passado e contribuem para a educação das gerações atuais e futuras.

Palavras-chave: azulejos históricos; mapa de danos; patologia azulejar.

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Olinda possui um importante patrimônio histórico, religioso, arquitetônico e cultural para o Brasil com suas famosas ladeiras, inúmeras igrejas, largos e conventos históricos, Carnaval de rua, museus, ateliês de artes plásticas, casarios antigos, mercados públicos e mirantes. Por esses e outros motivos, o sítio histórico de Olinda foi tombado em 1968 pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). Segundo o IPHAN (2010), o sítio histórico de Olinda possui títulos importantes como Monumento Nacional, Patrimônio Natural e Cultural da Humanidade, Capital Brasileira da Cultura e entre outros títulos que representam o legado da cidade.

Um dos artefatos de grande relevância e que contribuiu, de certa forma, para a valorização histórica e arquitetônica da cidade de Olinda é o azulejo. Essa peça tão pequena e tão rica pode ser facilmente encontrada no interior de igrejas e conventos, e em fachadas de antigos casarios e sobrados pelo sítio histórico da cidade.

Durante as construções na época colonial, utilizou-se muito a prática da decoração através da azulejaria, material de fácil higienização, por isso é possível encontrar em abundância coleções de azulejos dos séculos XVII e XVIII pela região nordeste (Freitas, 2015).

Apesar da facilidade de uso, aplicação e limpeza, se as peças não forem conservadas e preservadas adequadamente, combinadas com a ação de agentes externos e degradação pelo tempo, a qualidade e durabilidade das peças são afetadas e começam a surgir manifestações patológicas. Rocha *et al*. (2018) dizem que os processos de desgastes das estruturas são influenciados por agentes físicos, químicos e biológicos presentes no ambiente. O mesmo acontece com os azulejos e as consequências disso são aparecimento de manchas, fissuras, alteração cromática, perda do vidrado, trinca e outros problemas.

De acordo com Freitas (2015), no Brasil há poucas pesquisas sobre azulejos históricos e isso afeta no entendimento dos diagnósticos e no processo de intervenções cautelosas. Portanto, por esse e outros motivos, é importante realizar estudos práticos com levantamento de danos, fornecendo informações valiosas para a conservação do material. Segundo Macedo *et al*. (2018), estudos como esse provocam um pensamento mais a fundo de como devemos tratar nossos edifícios, mantê-los e conservá-los e também como os profissionais devem atuar nos diagnósticos e recuperações com qualidade. Por isso a pesquisa é relevante na área de manutenção, principalmente para edifícios mais antigos, no qual devem-se realizar trabalhos práticos com informações pertinentes ao material, modo construtivo, comportamentos e características, para que os profissionais da área possam intervir de forma correta e os problemas patológicos sejam tratados da melhor maneira e as possíveis causas sejam eliminadas. É evidente que há diferença entre as manifestações patológicas encontradas num ambiente interno e externo, até porque os agentes degradantes que atuam ali são diferentes, entretanto não é comum encontrar estudos práticos que façam essa comparação ou que provem que há disparidade entre os problemas encontrados. Por esses motivos, houve a necessidade de estudar e aprofundar nesse tema de patologias em azulejos históricos, com ênfase no mapeamento de danos e na comparação de manifestações patológicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para o estudo comparativo das manifestações patológicas internas e externas foram escolhidos 02 painéis.

O painel azulejar interno escolhido foi o da Catedral de São Salvador do Mundo, mais conhecida como Igreja da Sé, que retrata a fuga para o Egito (Figura 1). A igreja localizada no sítio histórico de Olinda foi fundada em 1540, mas só foi elevada à catedral em 1576. Segundo Muniz *et al*. (2017), existiam na catedral outros painéis azulejares idênticos ao "Fuga para o Egito", retratando cenas religiosas em azul cobalto e branco. Essas peças representavam a grande produção portuguesa de 1740, mas foram retiradas após uma intervenção no século passado, e só sobrou o painel escolhido no estudo.

Figura 1 – Painel "Fuga para o Egito" na Catedral da Sé, Olinda.

Os azulejos desse painel datam da primeira metade do século XVIII, estão pintados em azul sobre fundo branco, são do estilo barroco e têm origem portuguesa. O painel possui 326 peças de azulejo com dimensão 14,3 x 14,3 cm, com vidrado de estanho, resistentes e porosos, segundo Muniz *et al.* (2017). Além disso, vale salientar que a Catedral da Sé se encontra numa região bem próxima ao mar, com bastante influência da maresia, umidade e salinidade.

Para o painel azulejar externo foi escolhida a fachada de um casario residencial localizado na rua Bernardo Vieira de Melo, nº 68 - Carmo - Olinda (Figura 2).

Figura 2 - Fachada do casario selecionado

2.2 MÉTODOS

Para o estudo foram consideradas as 12 seguintes anomalias:

- Alteração cromática: Muniz *et al*. (2017) explicam que a alteração cromática é uma mudança na cor original da peça ocasionada por reações químicas de elementos que constituem o azulejo ou vernizes de proteção;
- Desordem: A desordem num painel azulejar pode ser compreendida como um aspecto de bagunça visual. Segundo Muniz *et al*. (2017), a desordem nada mais é que o assentamento de forma desordenada, com as peças colocados fora da posição original no painel e Freitas (2015) complementa dizendo que a desordem é um assentamento caótico dos azulejos no silhar;
- Esfoliação: Segundo Freitas (2015), esfoliação é um tipo de desagregação caracterizada pelo desprendimento do vidrado e da base cerâmica, como se fosse uma descamação e essa anomalia está relacionada com o tipo de material que foi utilizado na fabricação da peça, que geralmente não tinha muita qualidade, além das alterações físicas causadas por esforços mecânicos e ação da umidade ao longo dos anos. Nesse tipo de manifestação a base cerâmica é afetada, sofrendo alterações;
- Fissuras do vidrado e gretamento: Muniz *et al*. (2017) explicam que fissuras no vidrado são microfissuras na superfície vitrificada que se cruzam e formam teias ou “craquelê”;
- Furos e bolhas: Muniz *et al*. (2017) afirmam que os furos são áreas delimitadas por poros e é o tipo de degradação anterior à queda de vidrado. Já as bolhas são pequenas quantidades de ar que elevam a superfície do vidrado;
- Lacunas e desplacamento: Rocha (2022) diz que esse descolamento da parede é causado pela perda do rejunte, perda da argamassa de assentamento e cristalização de sais;
- Lascamento e perda do vidrado: Muniz *et al*. (2018) afirmam que perda do vidrado é o destaque de uma parte ou totalidade do esmalte da peça, sem afetar a base cerâmica;
- Manchas: Rocha (2022) afirma que manchas superficiais podem ser compreendidas como sujidades na superfície e que não comprometem o corpo cerâmico;
- Perda: Rocha (2022) explica que a perda é justamente a ausência de uma parte da peça azulejar. Quando esta perda é significativa ou dificulta a compreensão dos desenhos ou cenas retratadas nos paineis azulejares podemos identificar este dano como lacunas.
- Recomposição de pintura: Muniz *et al*. (2017) diz que a recomposição de pintura é uma tentativa falha de restaurar a pintura da peça cerâmica e é um tipo de reparo inadequado para os azulejos;
- Trinca: Muniz *et al*. (2017) informam que trincas são fissuras ou rupturas no corpo cerâmico azulejar;
- Vegetação: Está relacionado com o crescimento de musgos, fungos ou vegetação que se desenvolvem sobre a superfície do azulejo, formando biofilmes ou mesmo nas juntas das peças geralmente provocando danos estéticos e de integridade nas peças azulejares.

Após ter selecionado os painéis interno e externo, foi realizado um registro fotográfico dividido em pequenas partes para facilitar a análise de problemas patológicos em cada peça azulejar. O painel interno foi dividido em 17 mini painéis para que o levantamento fotográfico pudesse registrar melhor os detalhes de cada peça. Essa divisão em mini painéis sequenciados foi realizada da seguinte maneira (Figura 3).

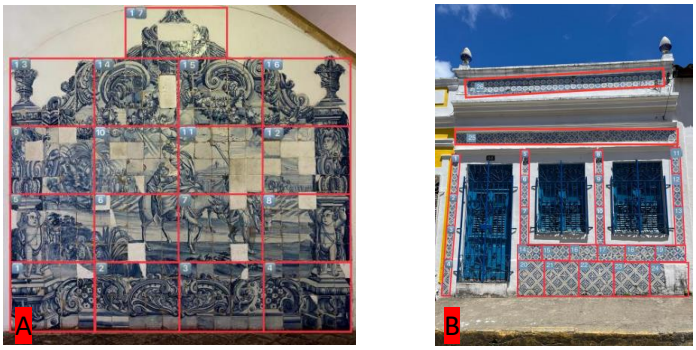


Figura 3 – Divisão numérica do painel azulejar interno (a) e externo (b).

O passo seguinte foi a elaboração dos mapas de danos com auxílio dos mini painéis e do software Autocad. O levantamento patológico foi realizado peça por peça, separadas por uma malha para delimitar os azulejos. Durante a elaboração, foram constatadas 12 manifestações patológicas presentes nos azulejos e foi criada uma legenda para cada um desses problemas encontrados, conforme os mapeamentos abaixo (Figura 4 e 5). Segundo Rocha; Carneiro e Monteiro (2023), essa metodologia é apropriada para estudos em edifícios antigos, atualizando a base de dados, evidenciando os problemas patológicos encontrados e permitindo uma observação visual direta dos danos.

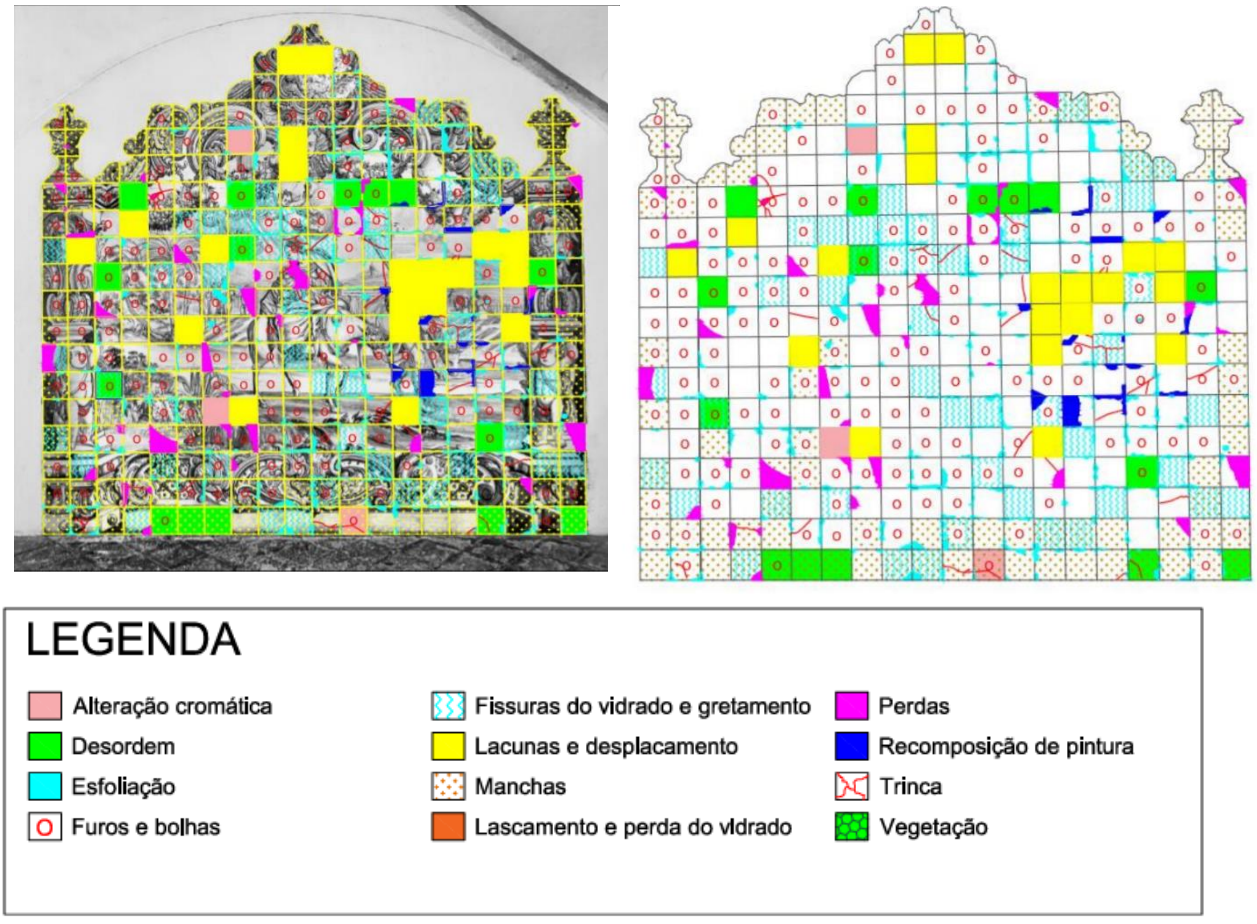


Figura 4 – Mapa de danos do painel interno.

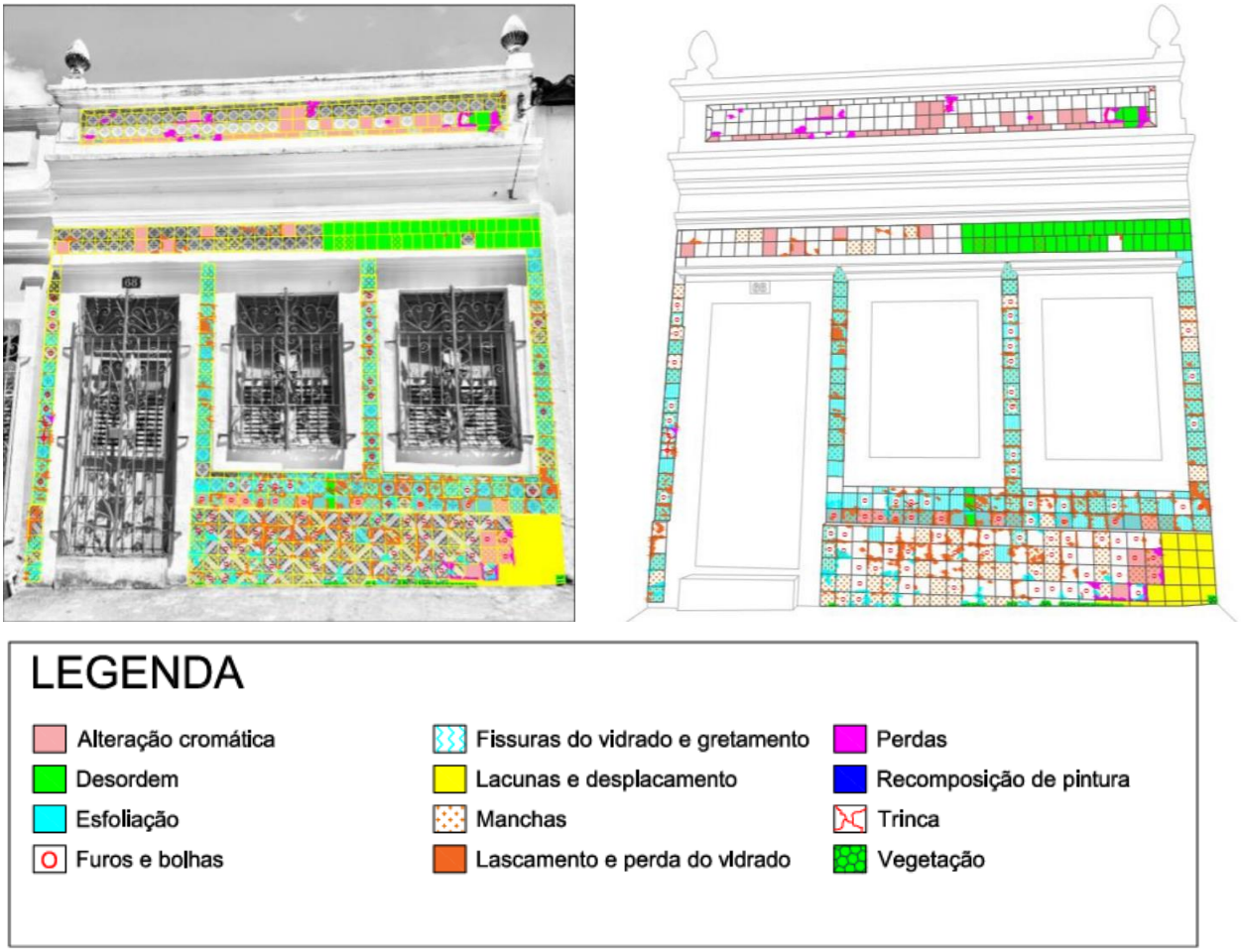


Figura 5 – Mapa de danos do painel externo

3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Antes de apresentar os resultados encontrados, é de suma importância ter ciência de que um bom mapeamento de danos deve ser precedido de uma investigação criteriosa sobre toda a história daquele painel azulejar. Diante do mapeamento de problemas patológicos levantado, foi possível quantificar todas as anomalias presentes em ambos os painéis, interno e externo. Na tabela 01, encontra-se esse quantitativo de peças que apresentaram tal manifestação patológica separadas pelo local.

Analisando a tabela 1, é possível perceber que há disparidades ao equiparar o quantitativo de manifestações patológicas que aparecem no painel interno da Catedral da Sé e no painel externo da fachada do casario. Por exemplo, no painel interno existem problemas com recomposição de pintura e já no painel externo não há essa manifestação. Em compensação no painel externo existe a presença de vegetação e no painel interno não acontece isso. Entretanto, para realizar um comparativo eficiente entre os painéis, se faz necessário transformar todos esses dados em porcentagem. A figura 6 representa as distribuições de manifestações patológicas em porcentagem.

Tabela 1 - Quantitativo de peças com problemas patológicos encontrados. DRX dos fragmentos históricos

Problemas patológicos	**Catedral da Sé** (Painel interno com326 peças no total)	**Fachada do casario** (Painel externocom 496 peças no total)
Alteração cromática	3	61
Desordem	15	47
Esfoliação	185	50
Furos e bolhas	158	79
Fissuras do vidrado e gretamento	47	110
Lacunas e desplacamento	20	20
Manchas	82	126
Lascamento e perda do vidrado	0	173
Perdas	35	30
Recomposição de pintura	18	0
Trinca	27	12
Vegetação	0	16

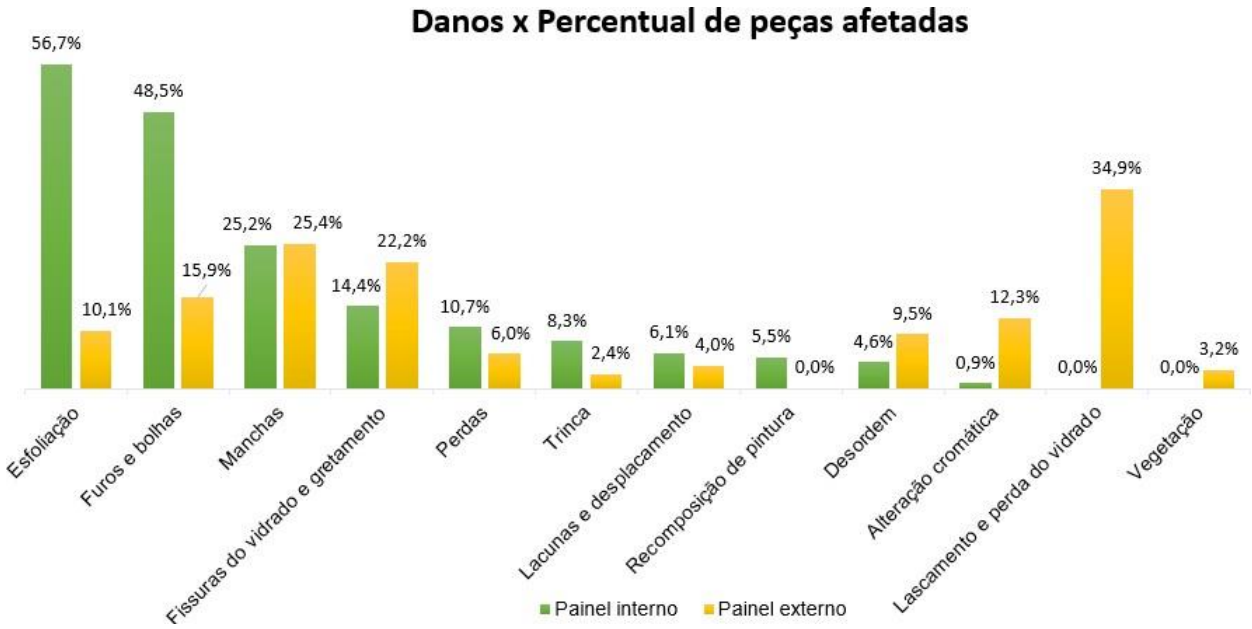


Figura 6 – Gráfico de Danos x Percentual de peças afetadas

A partir da análise e comparação dos dados do gráfico e com auxílio da tabela 1, observa-se que o aparecimento das manifestações patológicas em ambientes opostos é bastante variável. Isso ocorre

principalmente por causa dos agentes degradantes que atuam em cada lugar. De acordo com o gráfico, os problemas mais evidentes foram a esfoliação no painel interno com 56,7%, furos e bolhas no painel interno com 48,5% e lascamento e perda de vidrado no painel externo com 34,9%. O painel de fachada ou externo, por exemplo, está sujeito à muita chuva, sol, poluição atmosférica, maresia, maior variação de temperatura, vandalismo e entre outros fatores exteriores. Essa informação também é inferida ao analisar as colunas em amarelo, que traz um maior índice de lascamento e perda do vidrado, manchas, fissuras do vidrado e gretamento, alteração cromática, que são manifestações patológicas ocasionadas principalmente por umidade, dissolução de sais, agentes biológicos, infiltração, má conservação, exposição às intempéries, raio UV, ação antrópica e outros agentes que atuam mais em ambientes externos. Da mesma maneira ocorre com o painel interno, que teve como principais problemas a esfoliação, furos e bolhas, manchas e perdas, que são causadas por choques mecânicos, problemas na fabricação, sujidades, problemas no suporte, tensões. Vale ressaltar que não houve no painel interno o aparecimento de vegetação e de lascamento ou perda do vidrado que são manifestações patológicas causadas, principalmente, por agentes externos. Através do mapeamento ainda foi possível criar um outro comparativo (Tabela 2) contendo a relação da cronologia dos painéis e o quantitativo de peças danificadas. Nesse levantamento foram consideradas peças danificadas tanto por uma só manifestação patológica quanto por várias ao mesmo tempo. Cabe ressaltar que nesta análise não foram consideradas as gravidades das manifestações patológicas presentes nas peças azulejares, ficando esta tarefa para ser identificada em estudos futuros.

Tabela 2 – Comparativo de peças danificadas.

	Painel interno (Catedral da Sé)	**Painel externo** (Fachada do casario)
Período da produção	Século XVIII	Século XIX
Quantidade de peças danificadas	308	382
Percentual de problema	94,50%	77,00%

Segundo a tabela 2, o painel com azulejos mais novos, da fachada do casario, está menos danificado mesmo com toda atuação de agentes externos mais degradantes como sol, chuva e ação antrópica. Isso pode ter ocorrido por causa da qualidade das peças, pela própria idade dos painéis, pela ação do intemperismo químico e físico, pelo tipo de material utilizado na fabricação dos azulejos e entre outros fatores. Vale salientar que durante o estudo de caso não foi aprofundado o estudo do processo de fabricação dos azulejos e nem da caracterização das peças, assim como não foi realizado nenhum ensaio nos painéis. Além disso, os resultados encontrados representam uma amostra muito pequena em relação ao todo, portanto os danos encontrados são pontuais e respectivos ao estudo desenvolvido.

4 CONCLUSÕES

Nesse estudo, o azulejo foi abordado integrando suas forças e fraquezas, explicitando sua história, composição, características, valores e os problemas. Foi objetivo da pesquisa realizar um estudo de caso comparando as manifestações patológicas azulejares encontradas em ambientes internos e externos e caracterizar essas anomalias detectadas. O estudo através do mapeamento de danos permitiu identificar 12 manifestações patológicas, sendo elas alteração cromática, desordem, esfoliação, fissuras do vidrado e gretamento, furos e bolhas, lacunas e desplacamentos, lascamento e perda do vidrado, manchas, perda, recomposição de pintura, trinca e vegetação. Após o mapeamento de danos, foram verificadas as quantidades de peças com determinada manifestação patológica,

caracterizadas em relação ao surgimento, causas e fotografias e em seguida foram comparadas quanto ao local de aparecimento. Como esperado, esses problemas patológicos se desenvolveram de forma diferente nos dois painéis estudados. O uso do mapeamento de danos mostrou-se bastante eficaz trazendo resultados estatísticos que já eram previstos e confirmando a ideia inicial de que as anomalias atuam de forma diferente quando estão em espaços e sob agentes diferentes.

A quantificação dos danos aqui apresentada retrata a extensão das manifestações patológicas identificadas, entretanto deve ser analisada sob a ótica da gravidade das anomalias para que se possa intervir nos azulejos, principalmente naqueles que apresentem uma situação de reparo ou recuperação emergencial. Para isto sugerimos, em estudos futuros, a utilização de técnicas de caracterização microestrutural, a fim de averiguar a composição química e mineralógica dos azulejos, bem como a execução de ensaios de percussão, visando identificar peças soltas e, finalmente, a utilização de métodos como o GUT (gravidade – urgência – tendência) para classificação das anomalias e suas respectivas consequências perante o estado de conservação do painel azulejar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INAPAS (Instituto Nacional de Arqueologia, Paleontologia e Ambiente do Semiárido) e a Universidade de Pernambuco – UPE pelo apoio e financiamento desta pesquisa. Agradecemos também ao IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa, cuja contribuição foi essencial para o desenvolvimento e a conclusão deste estudo.

REFERÊNCIAS

Freitas, Y. M. Azulejos portugueses dos séculos XVII e XVIII em Pernambuco: Patologias e caracterização tecnológica. 2015. 197 p. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

IPHAN. Rotas do patrimônio: Olinda – Sítio histórico. Programa Monumenta – BID, Olinda, 2010.

Macedo, J. V. S.; Rocha, E. A.; Cardoso, A. S.; Monteiro, E. C. B. Danos em edificações históricas: Análise comparativa entre duas igrejas em Olinda-PE. 6ª Conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios, 2018. Rio de Janeiro. Anais [...] Recife, 2018.

Muniz, E. F.; Monteiro, G. A.; Souza, R. B.; Lucena, R. A.; Maior, P. M. S.; Lavalle, H. Cronologia de azulejos históricos: Danos e caracterização química dos revestimentos de fachadas do Museu da Abolição no Recife, Pernambuco. CLIO Arqueológica, v. 32, n. 2, p. 253-288, 2017. Programa de Pós-graduação em Arqueologia da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2017.

Muniz, S. C. Cronologia histórica e patologias dos azulejos em Pernambuco entre os séculos XVII e XVIII. 2009. 340 p. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

Rocha, E. A.; Carneiro, A. M. P.; Monteiro, E. C. B. Termografia de infravermelho e mapa de danos na inspeção de uma igreja histórica em Olinda (PE). Revista CPC, São Paulo, v. 18, n. 35, p.95-139, jan./jul. 2023. São Paulo, 2023.

Rocha, E. A.; Macedo, J. V. S.; Correia, P.; Monteiro, E. C. B. Adaptação de mapa de danos para edifícios históricos com problemas patológicos: Estudo de caso da Igreja do Carmo em Olinda PE. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 51-63. Recife, 2018.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DE REAÇÕES QUÍMICAS EXPANSIVAS INTERNAS – BARRAGEM DE CAHORA BASSA

João Custódio[a]; António Santos Silva[b]; Dória Costa[b]; Ângelo Miquithaio[c]

[a]LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, jcustodio@lnec.pt

[b]LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

[c]HCB, Hidroelétrica de Cahora Bassa, Songo, Moçambique

RESUMO

Atualmente existe, em Portugal e no mundo, um número significativo de infraestruturas em betão, em que se incluem barragens, pontes, viadutos, etc., que se encontram afetadas por processos de degradação com origem em reações químicas expansivas internas, mais especificamente reações álcalis-sílica (RAS) e reações sulfáticas de origem interna (RSI; fenómeno também comummente designado por formação retardada de etringite ou ataque por sulfatos internos induzido pelo calor). Face à importância social e económica daquelas infraestruturas e às consequências gravosas que podem advir deste tipo de reações, é imperativo que se desenvolvam metodologias que permitam aprofundar o conhecimento acerca do desempenho de estruturas afetadas por essas patologias.

Dada a complexidade e multiplicidade de fatores envolvidos no desenvolvimento da RAS e da RSI, atualmente ainda é difícil efetuar uma avaliação completa do desempenho de uma estrutura de betão afetada por reações expansivas internas, assim como, uma previsão da sua deterioração futura. Isto é fundamental para determinar o período durante o qual a estrutura desempenhará a sua função de forma eficaz e segura, e é essencial para o planeamento atempado de eventuais ações de mitigação ou reabilitação.

Com este artigo pretende-se contribuir para a discussão em curso deste tema pela comunidade científica e, por isso, apresenta-se a metodologia adotada para a realização do diagnóstico e prognóstico de reações expansivas no betão de uma barragem em Moçambique, a barragem de Cahora Bassa. A barragem de Cahora Bassa faz parte de um aproveitamento hidroelétrico localizado no rio Zambeze, próximo da aldeia de Songo, na província de Tete. A barragem foi construída entre setembro de 1972 e março de 1975. O processo de expansão do betão da barragem foi detetado no final da década de 1980, cerca de 15 anos após o primeiro enchimento da albufeira, devido ao comportamento estrutural invulgar, relacionado com a existência de deslocamentos verticais progressivos. O presente artigo inclui uma breve síntese da informação disponível sobre esta barragem, à data da sua construção, sendo também apresentada, de forma sucinta, a análise de alguns dos resultados obtidos na campanha de ensaios laboratoriais, realizados em carotes de betão extraídas na barragem, em 2017, e no agregado utilizado no betão da barragem.

Palavras-chave: Diagnóstico; Prognóstico; Reações químicas expansivas internas; Betão; Durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe, em Portugal e no mundo, um número significativo de infraestruturas em betão, em que se incluem barragens, pontes, viadutos, etc., que se encontram afetadas por processos de degradação com origem em reações químicas expansivas internas, mais especificamente reações álcalis-sílica (RAS) e reações sulfáticas de origem interna (RSI; fenómeno também comummente designado por formação retardada de etringite ou ataque por sulfatos internos induzido pelo calor).

Em Portugal, estas reações estão presentes em várias dezenas de infraestruturas. Relativamente a pontes e viadutos, o primeiro caso foi detetado no início da década de 1990 no Viaduto Duarte Pacheco, em Lisboa. Atualmente, existem mais de 50 obras de arte nas quais se confirmou a presença da RAS e da RSI, com diferentes graus de desenvolvimento. Destas, os casos mais emblemáticos dizem respeito à rede viária da albufeira da Aguieira, que engloba sete obras de arte, construídas entre 1976 e 1979 – Ponte sobre o Rio Criz I, Ponte sobre o Rio Criz II, Ponte de São João das Areias, Ponte sobre o Rio Mondego em Cunhedo, Ponte sobre a Ribeira de Mortágua e Ponte sobre o Rio Dão em Santa Comba Dão. O desenvolvimento gravoso da RAS e da RSI no betão destas obras de arte motivou a realização de intervenções de fundo para manter a função, o tempo de vida útil de projeto e a segurança das mesmas. As ações de reabilitação desenvolveram-se entre 2013 e 2017. Numa das obras, a ponte sobre o Rio Dão em Foz do Dão, a reabilitação não se apresentou como uma solução viável face à elevada profundidade do rio onde se encontram implantados os pilares e as fundações, tendo sido necessário proceder-se à sua desativação e à construção de uma nova Ponte, inaugurada em 2015, para assegurar a continuação da função que a anterior desempenhava (Custódio *et al.*, 2023). No que diz respeito a barragens, existe uma predominância da RAS relativamente à RSI, estando a presença da RAS associada ao tipo de formações geológicas presentes no local de implementação das barragens. Atualmente, das 60 barragens de betão, com observação contínua acompanhada pelo LNEC, cerca de 20 barragens estão afetadas por reações expansivas, tendo os primeiros casos sido detetados na década de 1980, nomeadamente na barragem do Alto Ceira e na barragem de Pracana. A barragem do Alto Ceira foi substituída em 2013, já que não era viável a sua reabilitação. Há três barragens que apresentam valores médios das extensões acumuladas no tempo superiores a 1000×10^{-6} (Santa Luzia – barragem de abóboda concluída em 1942, Pracana – barragem de contrafortes concluída em 1951, e Fagilde – barragem de gravidade concluída em 1984). A barragem de Fagilde constitui o único caso em que a RSI é largamente predominante em relação à RAS. A barragem de Pracana sofreu importantes obras de reabilitação na década de 1980, as quais permitiram reduzir as taxas de expansão anuais nos contrafortes para cerca de 1/8, apresentando atualmente valores médios de cerca de 7×10^{-6}/ano (Batista, 2022).

Dada a complexidade e multiplicidade de fatores envolvidos no desenvolvimento da RAS e da RSI, atualmente ainda é difícil efetuar uma avaliação completa do desempenho de uma estrutura de betão afetada por estas reações, assim como, uma previsão da sua deterioração futura. Isto é fundamental para determinar o período durante o qual a estrutura desempenhará a sua função de forma eficaz e segura, e é essencial para o planeamento atempado de eventuais ações de mitigação ou reabilitação.

Com este artigo pretende-se contribuir para a discussão em curso deste tema pela comunidade científica e, por isso, apresenta-se a metodologia adotada para a realização do diagnóstico e prognóstico de reações expansivas no betão de uma barragem em Moçambique, a barragem de Cahora Bassa. O presente artigo inclui uma breve síntese da informação disponível sobre esta barragem, à data da sua construção, sendo também apresentada, de forma sucinta, a análise de alguns dos resultados obtidos na campanha de ensaios laboratoriais, realizados em carotes de betão extraídas na barragem, em 2017, e no agregado utilizado no betão da barragem.

2 BARRAGEM DE CAHORA BASSA

2.1 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

O aproveitamento hidroelétrico de Cahora Bassa, no qual está integrada a barragem, localiza-se no rio Zambeze, nas proximidades do Songo, província de Tete, em Moçambique (Figura 1). O aproveitamento é essencialmente constituído pela barragem, pela central subterrânea, escavada no maciço rochoso da margem direita, que inclui as tomadas de água, a montante, e as chaminés de equilíbrio e as galerias de restituição, a jusante.

Figura 1 – Vista aérea da barragem de Cahora Bassa (HCB - Hidroelétrica de Cahora Bassa)

A barragem é constituída por uma abóbada de betão de dupla curvatura, com uma altura máxima, medida a partir do nível inferior das fundações (cota 167 m), de 164 m. O coroamento tem um desenvolvimento de 303 m, uma relação corda/altura de 1,54 e uma espessura que varia, na consola central, desde 4 m no coroamento até 23 m na base. O coroamento e o nível de pleno armazenamento situam-se às cotas 331 m e 326 m, respetivamente. A barragem é dotada de um descarregador central de superfície, do tipo *volet*, e de um descarregador de meio-fundo com 8 portadas. No corpo da barragem existe uma galeria periférica, que se desenvolve junto à inserção da estrutura na fundação (o trecho horizontal mais baixo tem piso à cota 171 m), e sete galerias de visita horizontais, às cotas 326 m (galeria aberta sob o coroamento, interrompida no trecho central pelo descarregador de superfície), 296 m, 271 m, 248,5 m, 224,75 m, 203,5 m e 183,5 m. Existe ainda uma galeria de fundação, sub-horizontal, com trecho mais baixo à cota 145 m (Figura 2). A albufeira tem um volume de cerca de 66000 hm^3. As capacidades máximas de descarga do descarregador de superfície e de cada orifício do descarregador de meio fundo são de 600 m^3/s e 1600 m^3/s, respetivamente, perfazendo uma capacidade total de descarga de 13400 m^3/s (Dias *et al.*, 2022).

A barragem foi construída entre setembro de 1972 e março de 1975. O primeiro enchimento da albufeira teve início em 7 de dezembro de 1974, antes da sua conclusão. Desde então, o nível da água tem-se mantido aproximadamente constante e próximo do máximo (326 m). Poucos anos após o início da exploração da barragem, foram identificados sinais de um comportamento estrutural diferente do esperado, relacionados com a existência de deslocamentos verticais progressivos dirigidos para cima, medidos por nivelamento geométrico de precisão, e de deformações crescentes, monitorizadas por meio de extensómetros do tipo Carlson (Dias *et al.*, 2022). Estudos específicos, então realizados no LNEC em amostras de betão extraídas no corpo da barragem, concluíram que este estava afetado pela RAS (LNEC, 1995; 1997; 2003).

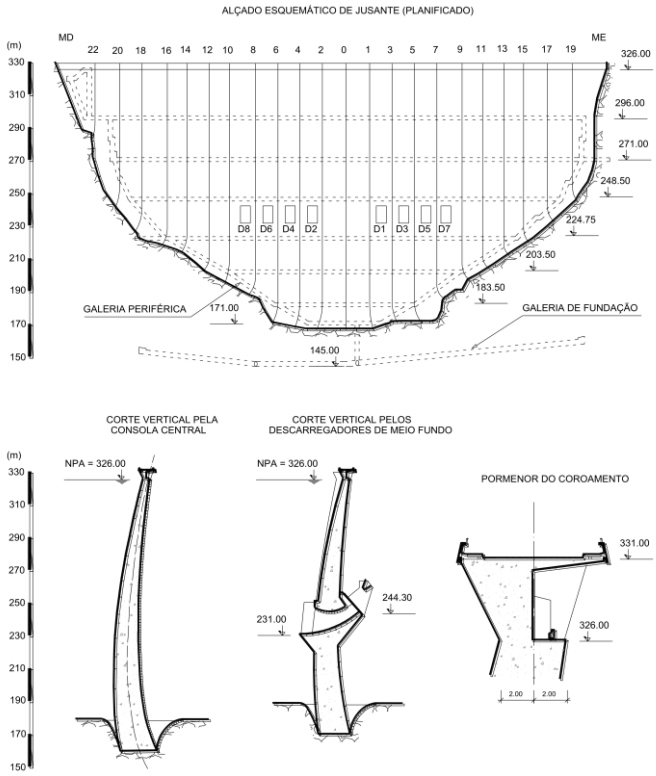


Figura 2 – Alçado esquemático de jusante (planificado), cortes verticais e pormenor do coroamento da barragem de Cahora Bassa (Dias et al., 2022)

2.2 CARACTERÍSTICAS DO BETÃO E DOS SEUS CONSTITUINTES

2.2.1 Cimento

Aquando da construção do complexo hidroelétrico, os trabalhos desenvolvidos acerca do cimento e do betão das obras de Cahora Bassa foram de três tipos: (i) estudos preliminares feitos antes do início das obras; (ii) estudos preliminares e de esclarecimento de algumas questões que se foram levantando durante as obras e que se realizaram quer no LNEC, em Lisboa, quer especialmente, e em maior parte, no laboratório do estaleiro; e (iii) ensaios de controlo do betão e dos seus constituintes, realizados no laboratório do estaleiro, no laboratório da fábrica de cimento, no LNEC e no Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM) (LNEC, 1978).

Relativamente ao ligante utilizado, este foi constituído unicamente por cimento Portland normal, fornecido pela fábrica da Beira-Dondo, tendo sido produzido especialmente para a construção da barragem. O seu controlo foi realizado num laboratório instalado no estaleiro, com o qual colaboraram o LNEC e o LEM e, também, na própria fábrica, na Beira, para se fazer a receção por silos de armazenamento, antes do seu transporte para a obra. As características do cimento, avaliadas por ensaios de receção, estão resumidas no Quadro 1. O cimento utilizado na obra sofreu diversas alterações de fabrico e composição antes e durante a construção, pelos seguintes motivos: (i) apresentar valores do calor de hidratação superiores aos limites impostos no Caderno de Encargos da obra de Cahora Bassa; (ii) apresentar uma percentagem muito elevada de aluminato tricálcico e grande desproporção entre os silicatos (C_3S = 51 %; C_2S = 16 %; C_3A = 14 %; C_4AF = 10 %) o que para além de comprometer o calor de hidratação tornava o cimento vulnerável à ação de águas dissolventes e levantava dúvidas quanto à possibilidade de poder vir a desenvolver processos expansivos; (iii) apresentar uma grande irregularidade na sua composição ao longo do tempo (LNEC, 1978).

Quadro 1 – Resumo dos valores médios e desvios padrão dos resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos de receção das amostras quinzenais do cimento utilizado na barragem de Cahora Bassa, realizados no LNEC, considerando apenas os anos de construção da barragem (LNEC, 1978)

Propriedades		Valores especificados	1972 a 1975	
			Valor médio	Desvio padrão
Massa volúmica (g/cm³)		≥ 3,05	3,11	0,04
Pasta normal, água (%)		-	25,9	1,0
Tempo de presa (h:min)	Início	≥ 01:00	03:24	00:49
	Fim	≤ 08:00	04:47	00:55
Expansibilidade	Le Châtelier, mm	≤ 4	1,5	0,7
	Em autoclave, %	-	0,32	0,24
Resíduo de peneiração (%)	Peneiro de 88 µm	≤ 10,0	8,4	2,4
	Peneiro de 44 µm	-	14,0	2,5
Superfície específica (cm²/g)	Wagner	≥ 1500	1735	153
	Blaine	-	3667	333
Calor de hidratação (cal/g)	3 dias	≤ 60	55	4,8
	7 dias	≤ 75	67	5,1
	28 dias	-	78	5,2
Análise química (%)	Resíduo insolúvel	≤ 2,0	0,6	0,2
	Perda ao fogo	≤ 4,0	2,3	0,6
	SiO_2	-	20,8	0,6
	Al_2O_3	-	6,7	0,4
	Fe_2O_3	-	3,8	0,4
	CaO total	-	62,3	0,7
	MgO	≤ 4,0	1,7	0,3
	SO_3	≤ 3,0	2,0	0,4
	CaO livre	-	2,4	0,7
	K_2O	-	0,51	0,09
	Na_2O	-	0,10	0,05
	$Na_2O_{eq,}$	-	0,43	-
Composição química potencial (%)	C_3S	-	30	4,5
	C_2S	-	37	4,6
	C_3A	-	11	1,4
	C_4AF	-	11,5	1,2
Tensão de rotura por flexão (kgf/cm²)	3 dias	≥ 25	34	5,5
	7 dias	≥ 35	45	5,2
	28 dias	≥ 50	61	4,6
	3 meses	-	73	3,9
Tensão de rotura por compressão (kgf/cm²)	3 dias	≥ 130	146	29,3
	7 dias	≥ 180	209	32,7
	28 dias	≥ 275	305	41,7
	3 meses	-	415	46,2
Número de resultados		-	74	

Por análise do Quadro 1 observa-se que é um cimento com baixos valores de perda ao fogo e de resíduo insolúvel, indicando que este seria constituído unicamente por clínquer e gesso. O teor de silicato tricálcico é baixo e o teor de silicato bicálcico é elevado, o que é normal nos cimentos da época. O teor de aluminato tricálcico e o teor de aluminoferrato tetracálcico são também elevados. O valor elevado do teor de aluminato tricálcico torna viável o desenvolvimento da reação sulfática interna, RSI, caso o betão tenha estado sujeito a temperaturas altas durante as primeiras idades e, posteriormente, a condições de humidade elevada. O teor de óxido de sódio equivalente do cimento é relativamente baixo, face aos padrões atuais; contudo, uma vez que se veio a verificar que o agregado utilizado é na realidade reativo aos álcalis do betão, esse teor constitui uma forma de mitigar o desenvolvimento deletério da reação.

No que diz respeito às características físicas, observa-se que o cimento apresentava uma presa relativamente lenta, uma expansibilidade baixa, e um calor de hidratação próximo dos então

especificados para cimentos pozolânicos normais (calor de hidratação máximo de 55 cal/g aos 3 dias, 65 cal/g aos 7 dias e 80 cal/g aos 28 dias).

Analisando agora as características mecânicas do cimento, constata-se que estas evidenciavam uma certa dispersão, mas que, em termos de valores médios, para padrões atuais refletem semelhanças com o esperado num cimento da classe mais baixa de resistência, ou seja, 32,5 N, sendo os valores obtidos ligeiramente superiores aos valores limite para resultados individuais dessa classe.

Tratava-se então de um cimento Portland com um teor de C_2S mais elevado do que o atual e com uma resistência mais baixa. No entanto, os valores são normais para a época, cumprindo em geral as especificações requeridas, pelo que é de esperar um comportamento típico do cimento então produzido.

2.2.2 Agregado

O agregado utilizado no fabrico do betão da barragem teve como origem o material proveniente das escavações efetuadas para o desvio do rio e para as obras definitivas do aproveitamento. As análises petrográficas realizadas permitiram determinar que se tratava de um gnaisse granitoide porfiroblástico, cujas características variavam desde um tipo mais granítico até um tipo mais gnáissico.

A reatividade potencial do agregado aos álcalis do betão foi avaliada por via química, através do método definido na norma ASTM C 289-63T, tendo-se obtido uma redução média da alcalinidade, Rc, de 75 mmol/l, e uma concentração em sílica, Sc, de 20 mmol/l (Figura 3). Este resultado permitiu concluir, à luz dos conhecimentos de então, que se tratava de um agregado inócuo (não reativo). Durante o período anterior à construção também se realizaram pesquisas de sulfatos e sulfuretos na rocha, tendo-se chegado a resultados negativos.

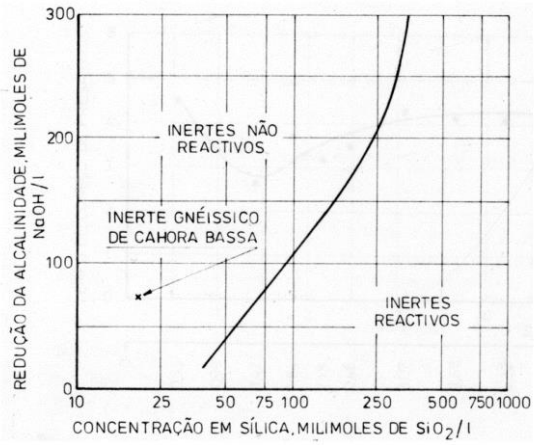


Figura 3 – Resultado do ensaio de avaliação da reatividade potencial dos agregados de Cahora Bassa aos álcalis do betão (LNEC, 1978)

Após a extração do agregado, este foi britado, classificado e lavado para permitir obter 4 classes de agregados grossos (150-75, 75-38, 38-15 e 15-5, em milímetros) e 2 classes de agregados finos (5-2,5 e 2,5-0 em milímetros). Toda a peneiração foi realizada com lavagem simultânea, por esse motivo o agregado não continha praticamente partículas inferiores a 74 µm. As características granulométricas do agregado foram controladas diariamente entre 27/09/1971 e 30/06/1975.

2.2.3 Água

Os resultados dos ensaios realizados à água do rio Zambeze mostraram que esta podia ser utilizada no fabrico do betão (LNEC, 1978).

2.2.4 Adjuvante

O adjuvante utilizado no fabrico do betão para a barragem foi do tipo plastificante, com propriedades de retardador de presa, uma vez que continha fosfatos e gluconatos. O adjuvante não possuía propriedades de introdutor de ar. Os ensaios de caracterização ao adjuvante foram realizados no LNEC e no LEM, entre Outubro de 1972 e Abril de 1974. Foram também realizados ensaios no laboratório do estaleiro para avaliar o efeito que a dosagem de adjuvante tinha no tempo de início de presa e na resistência à compressão do betão. Os resultados evidenciaram um retardamento da presa, em relação à do betão sem adjuvante, até 2h40min com a adição de adjuvante numa dosagem de 0,4 % em relação à massa de cimento. Foram ainda realizados ensaios no estaleiro para verificar a constância nas qualidades das diferentes remessas de adjuvante. Estes ensaios consistiram na determinação da tensão de rotura e da trabalhabilidade de betões com diferentes dosagens de cimento, com e sem adjuvante (LNEC, 1978).

2.2.5 Betão

Na construção da barragem foram utilizadas 29 composições de betão diferentes. Destes 29 betões, 13 tiveram agregados de máxima dimensão nominal de 150 mm, 5 foram produzidos com 75 mm, 9 tiveram agregados de máxima dimensão nominal de 38 mm e apenas 2 foram fabricados com agregados de máxima dimensão nominal de 15 mm. Nas obras acessórias foram ainda utilizadas outras 19 composições de betão, das quais 4 tinham agregados de máxima dimensão nominal de 75 mm, 14 de 38 mm e 1 de 15 mm. No Quadro 2 apresentam-se as proporções dos constituintes do betão dominante utilizado no corpo da barragem, fabricado com agregados de máxima dimensão nominal de 150 mm. A utilização de tal número de composições de betão deveu-se principalmente à grande variabilidade da qualidade do cimento, o que obrigou à utilização de dosagens de cimento entre 215 kg/m^3 e 265 kg/m^3. Em determinadas zonas da barragem, por razões de natureza construtiva, foram utilizados betões com agregados de máxima dimensão inferior a 150 mm e com dosagens de cimento mais elevadas, como foi o caso da zona do descarregador de meio-fundo, onde foi utilizado um betão com agregado de dimensão máxima de 38 mm e dosagem de cimento de cerca de 350 kg/m^3 e, também, em certas peças pré-fabricadas na zona dos apoios das comportas, onde a máxima dimensão do agregado foi de 15 mm (LNEC, 1978).

Quadro 2 – Composições dominantes dos betões empregues no corpo da barragem de Cahora Bassa (LNEC, 2021a)

Constituintes		Quantidade
Agregado grosso	150-75 mm	545 – 580 kg/m^3
	75-38 mm	450 – 460 kg/m^3
	38-15 mm	350 kg/m^3
	15-5 mm	260 – 285 kg/m^3
Agregado fino	5-2,5 mm	75 – 125 kg/m^3
	2,5-0 mm	390 – 460 kg/m^3
Cimento	Dosagem	215 – 265 kg/m^3
Água	Razão A/C	0,46 – 0,60
Adjuvante	Dosagem	0-0,4 %

3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Em janeiro e outubro de 2013, técnicos do LNEC deslocaram-se à barragem para escolha dos locais de extração das amostras, tendo sido selecionados 12 locais para recolha de amostras. A extração de carotes no corpo da barragem foi efetuada entre maio e julho de 2017. Foram efetuados 26 furos e extraídas 26 carotes, a que corresponde um total de 50 troços individuais de carote. No Quadro 3

apresentam-se alguns dos ensaios realizados às amostras de betão, retiradas do corpo da barragem, e de agregado, recolhido num silo do Aproveitamento Hidroelétrico de Cahora Bassa.

Quadro 3 – Análises e ensaios realizados ao betão e ao agregado

Descrição	Amostra
Ensaio de determinação da resistência à compressão	Betão
Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral	Betão
Ensaio de determinação do módulo de elasticidade secante à compressão	Betão
Ensaio de determinação da expansibilidade residual do betão devida à RAS	Betão
Análise petrográfica do betão por microscopia ótica	Betão
Análise mineralógica do betão por difratometria de raios X	Betão
Análise microestrutural do betão ao MEV/EDS	Betão
Ensaio de determinação do teor de álcalis	Betão
Ensaio de determinação da reatividade potencial dos agregados aos álcalis	Agregado
Ensaio de determinação do teor de álcalis	Agregado

3.1 Análise Petrográfica e Caracterização Microestrutural ao MEV/EDS

A análise petrográfica teve em consideração a Especificação LNEC E 388:1993. A análise petrográfica foi efetuada num microscópio ótico com polarização da marca Zeiss, modelo Axioplan e as fotos obtidas por uma máquina fotográfica digital Sony (DSC-S800). A caracterização microestrutural foi realizada no microscópio eletrónico de varrimento (MEV) da marca JEOL JSM 6400, no modo de eletrões secundários (para os provetes em superfícies de fratura) e no modo de eletrões retrodifundidos (para os provetes em superfície polida). Estas observações foram, em simultâneo, complementadas com a informação da composição química através de um sistema o analisador de raios X (EDS) Inca X-Sight da marca Oxford Instruments, tendo-se utilizado tensões de feixe eletrónico de 15 keV.

3.2 Análise mineralógica por difratometria de raios X

Os provetes de betão selecionados para as análises foram desagregados, tendo-se preparado dois tipos de subamostras ou frações. Uma das frações, que corresponde à amostra tal qual, foi denominada de global, e foi obtida pela moagem da amostra já desagregada, de modo que todas as partículas assumam um tamanho suficiente para passarem numa malha de peneiro com abertura de 106 µm. A outra fração, que é mais concentrada na pasta do ligante, foi denominada de fração fina (FFina) e foi obtida a partir do material fino que se soltou durante a desagregação. As análises de DRX foram realizadas num difratómetro PW 3710 da marca Philips, tendo-se utilizado a radiação Kα do cobalto, nas seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e 74º 2θ; velocidade de varrimento de 0.05º 2θ/s; tensão e corrente de filamento, respetivamente, de 35 kV e 45 mA.

3.3 Análises Químicas

A determinação do teor de álcalis do betão e do agregado foi efetuada de acordo com, respetivamente, o método interno LNEC LABTEC MI 115:2007 e com a norma portuguesa NP 1382:1976.

3.4 Ensaios de Expansão

Avaliação da reatividade potencial do agregado aos álcalis do betão foi efetuada de acordo com os métodos RILEM AAR-3.1 e RILEM AAR-4.1. A avaliação expansão residual do betão devida à RAS foi efetuada por um método baseado nos métodos prescritos nas normas e recomendações existentes para o estudo da reatividade potencial de agregados aos álcalis do betão.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios de determinação da tensão de rotura por compressão foram realizados sobre provetes cilíndricos de betão, com diâmetro de 283 mm e relação altura/diâmetro igual a 2,0, de acordo com a NP EN 12504-1:2009. Os ensaios de determinação da tensão de rotura à tração por compressão diametral foram realizados sobre provetes cilíndricos de betão, com diâmetro de 283 mm e relação altura/diâmetro de 1,8, de acordo com a NP EN 12390-6:2011. Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade secante à compressão foram realizados sobre provetes cilíndricos de betão, com diâmetro 283 mm e relação altura/diâmetro compreendida entre 1,7 e 2,0, de acordo com a NP EN 12390-13.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL AO MEV/EDS

A caracterização petrográfica do betão revelou que os agregados grossos e finos têm composição mineralógica semelhante e são constituídos essencialmente por rochas quartzo-feldspáticas existindo, em ambos, formas de sílica potencialmente reativas aos álcalis e minerais potencialmente fornecedores de álcalis, em particular de potássio (Quadro 4). Deve salientar-se a ubiquidade e a proporção de texturas mirmequíticas produzidas por processos de exsolução associados à existência de quartzo vermicular e goticular nas interfaces dos feldspatos com o quartzo. A deformação do quartzo traduz-se não apenas na extinção ondulante dos cristais, mas também na presença de lamelas de deformação, subgranulação e fraturação, por vezes muito acentuada, dos agregados cristalinos. A caracterização petrográfica evidenciou ainda, em algumas amostras, sinais de um processo de degradação dos bordos dos elementos do agregado e a presença de fissuras na pasta e em interfaces agregado/pasta preenchidas com gel do tipo do resultante da reação álcalis-sílica (RAS) mas, também, de poros e fissuras preenchidas por etringite secundária (RSI).

Quadro 4 – Resumo das observações efetuadas na análise petrográfica relativamente à presença de minerais potenciadores da RAS

Agregado	Formas de sílica potencialmente reativas aos álcalis do betão	Minerais potencialmente fornecedores de álcalis
Grosso	Exsoluções vermiculares e goticulares (mirmequites), quartzo deformado	Feldspatos alcalinos, em particular feldspato potássico
Fino	Exsoluções (mirmequites), quartzo deformado	Feldspatos alcalinos, em particular feldspato potássico

Os exames ao microscópio eletrónico de varrimento confirmaram a presença de produtos expansivos decorrentes da RAS e da RSI no betão. A presença da RAS manifestou-se pela ocorrência em poros, de microfissuras e em interfaces agregado/pasta de produtos amorfos (geles) e cristalinos com uma morfologia e composição típicas. Já a RSI foi evidenciada pela presença de etringite de morfologia deletéria (maciça) em poros, em microfissuras na pasta e em interfaces agregado/pasta. Em termos relativos, os produtos da RAS foram detetados em maior abundância que os da RSI.

4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Em termos gerais, os betões analisados apresentam composições mineralógicas qualitativas muito semelhantes. Como seria de esperar, os minerais detetados em maior proporção foram os componentes principais dos agregados, nomeadamente quartzo e feldspatos e em menor proporção mica e clorite. Em termos dos compostos da pasta, os minerais detetados foram a portlandite, calcite, carboaluminato de cálcio hidratado, monossulfoaluminato de cálcio hidratado, etringite e silicatos anidros do clínquer Portland, compostos estes usuais em betões de cimento Portland. Deve referir-se

que as proporções de portlandite e calcite detetadas indiciam existir uma fraca carbonatação do betão, e que nas amostras mais concentradas na pasta do ligante (frações finas) é evidente a maior presença dos compostos da pasta do ligante.

4.3 ANÁLISES QUÍMICAS

O teor de álcalis solúveis em ácido ou em água quente no betão foi em média de 5,6 kg/m^3 e 3,7 kg/m^3, respetivamente. Os valores obtidos para o teor de álcalis solúveis em ácido variaram entre 4,6 kg/m^3 e 6,6 kg/m^3, enquanto os solúveis em água quente variaram entre 2,2 kg/m^3 e 6,1 kg/m^3. Independentemente do tipo de teor considerado, os valores obtidos em ambos os casos são consentâneos com a presença no betão de agregados com minerais ricos em álcalis (e.g. feldspatos alcalinos). Assim, o betão analisado apresenta em todos os locais um teor de álcalis considerado como suficiente para o desenvolvimento deletério da RAS.

4.4 ENSAIOS DE EXPANSÃO

Os resultados de expansão obtidos pelo método RILEM AAR-4.1 e pelo método RILEM AAR-3.1 são apresentados, respetivamente, no Quadro 5 e no Quadro 6.

Quadro 5 – Expansão observada durante o ensaio RILEM AAR-4.1, realizado para avaliar a reatividade do agregado aos álcalis do betão

Ensaio	Expansão (%)							
	13 semanas	15 semanas	20 semanas	28 semanas	32 semanas	52 semanas	78 semanas	104 semanas
AAR-4.1	0,022	0,023	0,026	0,027	0,032	0,041	0,059	0,077

Quadro 6 – Expansão observada durante o ensaio RILEM AAR-3.1, realizado para avaliar a reatividade do agregado aos álcalis do betão

Ensaio	Expansão (%)					
	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses	18 meses	24 meses
AAR-3.1	0,009	0,014	0,022	0,023	0,026	0,033

De acordo com a RILEM, considera-se atualmente que ainda não existe um critério universalmente aplicável para a interpretação dos resultados do método RILEM AAR-4.1 e do método RILEM AAR-3.1.

Apesar disso, a RILEM sugere que, para o método RILEM AAR-4.1, poderá considerar-se que, se os agregados forem aplicados em obra, o betão não deverá ser passível de desenvolver RAS deletéria para o betão se a expansão for igual ou inferior a 0,03 % após 15 ou 20 semanas de ensaio. A RILEM refere ainda que se pode aumentar o nível de confiança do resultado do ensaio se este for prolongado para além das 20 semanas. A RILEM sugere também que, para agregados a utilizar em betões de barragens, os valores de referência no ensaio RILEM AAR-4.1 deverão ser de 0,02 % às 15 semanas ou de 0,03 % às 20 semanas ou num período superior, por exemplo a 1 ano.

No caso do método RILEM AAR-3.1, de acordo com a RILEM, a mistura de agregados é considerada como não reativa se após 12 meses de ensaio a expansão for inferior a 0,05 %, e reativa se for superior a 0,10 %. Quando o valor de expansão aos 12 meses se situar entre 0,05 % e 0,10 %, a combinação de agregados é considerada potencialmente reativa. No entanto, para agregados de reação lenta e retardada aos álcalis, a RILEM sugere que o valor de referência aos 12 meses de 0,05 % deve descer para 0,04 % ou mesmo 0,03 %. Para agregados a utilizar em betões de barragens, de acordo com a RILEM, os valores de referência no ensaio RILEM AAR-3.1 deverão ser de 0,03 % a um 1 ano ou de 0,04 % aos 2 anos de ensaio.

Em Portugal, a Especificação LNEC E 461 (LNEC, 2021b) refere que, no caso dos granitos, é sempre necessário avaliar a reatividade álcalis-sílica do agregado, e o nível de prevenção aplicável, sendo por isso obrigatória a realização do ensaio acelerado de prismas de betão (ACPT - RILEM AAR-4.1) ou do ensaio de prismas de betão (CPT - RILEM AAR-3.1). Se o agregado ou a combinação de agregados avaliados com o ACPT resultarem numa expansão, dos prismas de betão, inferior ou igual a 0,02 % às 13 semanas ou a 0,03 % às 20 semanas, são classificados como Classe II (Classe II – agregado, ou mistura de agregados, potencialmente reativo ou de reatividade incerta aos álcalis); no entanto, se a expansão for superior, então o CPT também deve ser realizado. Se o agregado ou combinação de agregados avaliado com o CPT resultar numa expansão, dos prismas de betão, inferior ou igual a 0,03 % aos 12 meses ou 0,04 % aos 24 meses, são considerados como Classe II (agregado, ou mistura de agregados, potencialmente reativo ou de reatividade incerta aos álcalis); pelo contrário, se a expansão for superior, são classificados como Classe III (agregado, ou mistura de agregados, com elevada probabilidade de ser reativo aos álcalis). Sendo, em ambos os casos, necessário adotar medidas preventivas, que são selecionadas de acordo com a metodologia definida na especificação LNEC E 461.

Dos resultados obtidos no ensaio AAR-4.1, observa-se que, às 13 e 20 semanas de ensaio, a expansão média foi, respetivamente, de 0,022 % e 0,026 %. Os resultados do ensaio AAR-3.1 mostram que, aos 12 e 24 meses de ensaio, a expansão média foi, respetivamente, de 0,023 % e 0,033 %. De acordo com as recomendações da RILEM, no caso do método RILEM AAR-3.1, o agregado seria classificado como não reativo, ou seja, se utilizado no betão de uma estrutura não deveria ser passível de desenvolver RAS deletéria. Contudo, de acordo com a Especificação LNEC E 461, o agregado seria considerado como pertencente à Classe II (agregado potencialmente reativo ou de reatividade incerta aos álcalis).

De acordo com a Especificação LNEC E 461:2021, no caso dos agregados da Classe II e da Classe III para betão a utilizar em barragens, uma estrutura classificada na categoria de risco R3 - risco elevado (e.g., estruturas críticas ou com tempo de vida longo, onde se considera inaceitável o risco de degradação) e na categoria ambiental de serviço A2 (betão exposto à humidade exterior), resulta no nível de prevenção P3 (nível especial). Neste nível de prevenção, P3, devem ser aplicadas pelo menos duas das quatro medidas preventivas possíveis: M1 (controlo da alcalinidade da solução dos poros do betão), M2 (controlo do teor de sílica reativa), M3 (controlo da humidade no betão) ou M4 (modificação das propriedades do gel formado). No nível de prevenção P3, no caso de não ser possível utilizar duas das medidas M1 a M4, deve ser utilizada uma medida, mas a composição de betão deve ser classificada como de muito baixo potencial para desenvolver reação álcalis-sílica deletéria (secção §3.5 da Especificação LNEC E 461).

Os resultados obtidos no ensaio de expansão residual, realizados às carotes de betão, são apresentados na Figura 4. Os valores de expansão dos provetes avaliados variaram entre 332×10^{-6} e 903×10^{-6}, o que significa que a expansibilidade residual potencial devida à RAS, no betão amostrado, é considerada como desprezável a moderada. Estes valores são coerentes com os valores de expansão livre máxima a longo prazo, de cerca de 1400×10^{-6}, estimados por modelação numérica realizada no Departamento de Barragens de Betão do LNEC (Dias et al., 2022).

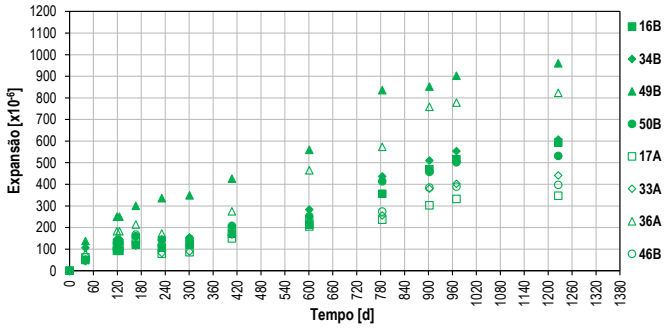


Figura 4 – Resultados obtidos no ensaio de determinação da expansão residual do betão devida à RAS

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os valores da resistência à compressão do betão da barragem variam em função do local de amostragem, estando compreendidos entre 36,0 MPa e 46,6 MPa, sendo o valor médio de 43,0 MPa. Comparando os valores de resistência à compressão obtidos em carotes retiradas para o presente estudo com os valores estimados a partir da resistência de cubos produzidos durante a betonagem da barragem, verifica-se que os valores de tensão de rotura podem considerar-se aceitáveis para as várias zonas avaliadas.

Os valores de resistência à tração variam em função do local de amostragem e estão compreendidos entre 2,9 MPa e 3,2 MPa, sendo o valor médio de 3,0 MPa. Comparando os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos em carotes retiradas para o presente estudo com os valores estimados a partir da resistência de cubos produzidos durante a betonagem da barragem, verifica-se que os valores de tensão de rotura podem considerar-se aceitáveis para as várias zonas avaliadas, visto que estão dentro da gama estimada.

Os valores do módulo de elasticidade variam em função do local de amostragem e estão compreendidos entre 30,9 GPa e 40,6 GPa, sendo o valor médio de 35,6 GPa. Os maiores valores foram obtidos para o betão amostrado na galeria periférica à cota 220,00 m e na galeria à cota 224,75 m. O local em que o betão apresentou um módulo de elasticidade mais baixo foi na galeria à cota 296,00 junto à margem esquerda. Comparando os valores de módulo de elasticidade obtidos em carotes retiradas para o presente estudo com os valores estimados a partir da resistência de cubos produzidos durante a betonagem da barragem, verifica-se que o módulo de elasticidade é ligeiramente inferior à gama prevista apenas num local (galeria à cota 248,50 m junto à margem direita), nos restantes locais o módulo de elasticidade está dentro ou acima da gama estimada.

5 CONCLUSÕES

Este artigo analisou e discutiu de forma muito sucinta um subconjunto dos dados produzidos a partir da caracterização e ensaio de 50 carotes de betão extraídas na barragem de Cahora Bassa, em Moçambique. Dos resultados apresentados nas secções anteriores podem ser retiradas as seguintes conclusões:

(i) A reatividade potencial do agregado aos álcalis do betão foi avaliada por via química, através do método definido na norma ASTM C 289-63T, tendo o resultado permitido concluir, à luz dos conhecimentos de então, que se tratava de um agregado inócuo (não reativo). Este facto ilustra a falta de fiabilidade desse método, que foi revogado pela ASTM em 2016.

(ii) O agregado utilizado no betão tem constituintes potencialmente reativos aos álcalis e minerais que podem libertar álcalis na solução dos poros do betão.

(iii) Os teores de álcalis medidos no betão sugerem que o agregado utilizado forneceu álcalis à solução dos poros do betão, sendo esses teores suficientes, para permitir a ocorrência deletéria da RAS, caso estejam reunidas as restantes condições essenciais ao seu desenvolvimento (e.g., teor crítico de sílica reativa no agregado, e água em quantidade suficiente no betão).

(iv) O teor de óxido de sódio equivalente do cimento, utilizado no betão da barragem, é relativamente baixo para os padrões atuais; no entanto, uma vez que o agregado utilizado é de facto reativo aos álcalis, e pode fornecer álcalis à solução dos poros do betão, este teor ajudou a mitigar o desenvolvimento de RAS no betão, embora não o tenha conseguido suprimir completamente.

(v) O betão da barragem de Cahora Bassa encontra-se afetado por reações expansivas internas, dos tipos álcalis-sílica (RAS) e sulfática interna (RSI). Mas, a principal causa da fissuração observada no betão poderá atribuir-se à RAS, visto que foram observados produtos da RAS em praticamente todas a amostras analisadas, ao passo que a etringite de morfologia deletéria foi apenas detetada pontualmente em duas amostras. Dado que nestas últimas foram também detetados produtos da RAS, e em maior abundância do que os da RSI, o surgimento pontual de RSI deletéria pode derivar simplesmente das condições locais tornadas favoráveis à formação da etringite devido ao prévio desenvolvimento da RAS (e.g. diminuição local da alcalinidade da solução dos poros do betão). Note-se também que os teores médios de sulfatos e de álcalis do cimento eram relativamente baixos, pelo que, ainda que o teor de C3A fosse algo elevado, no caso de o betão ter estado exposto a temperaturas elevadas (> 65 °C) durante a fase inicial do endurecimento não seria também expectável um potencial expansivo significativo devido a esta reação.

(vi) Os resultados dos ensaios de determinação da reatividade potencial, do agregado aos álcalis do betão, evidenciam a necessidade de se ter em conta cuidadosamente os limites de expansão atualmente recomendados para o ACPT e o CPT, especialmente para agregados de reação lenta/tardia e para agregados que libertam álcalis.

(vii) Os ensaios de expansão residual do betão devida à RAS mostraram que a reatividade residual é heterogénea no corpo da estrutura. Os ensaios realizados até ao momento indicam que o betão avaliado apresenta uma expansão residual moderada.

(viii) Apesar do desenvolvimento da RAS no betão da barragem, as inspeções de rotina, realizadas no âmbito do controlo contínuo de segurança da barragem, mostram que, na barragem de betão com cerca de 50 anos de idade, não existem fissuras que comprometam o seu desempenho.

REFERÊNCIAS

Batista, A. L. (2022). Acompanhamento dos processos de deterioração das barragens portuguesas afetadas por reações expansivas do betão. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas,* Série III, n.º 18**,** 43-64.

Custódio, J.*, et al.* (2023). Mitigação de efeitos estruturais de reações expansivas no betão. *Segundo Seminário "A investigação nos laboratórios do estado e a construção de uma sociedade segura e mais resiliente" - FCCLE2023.* LNEC, Lisboa, Portugal.

Dias, I. F.*, et al.* (2022). Analysis, interpretation and prediction of the structural behavior of Cahora Bassa dam (Mozambique), affected by concrete swelling. *16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction – ICAAR 2020-2022.* Lisbon, Portugal.

LNEC (1978). Cimento e o betão das obras de Cahora Bassa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

LNEC (1995). Estudo do betão da barragem de Cahora Bassa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

LNEC (1997). Caracterização química e microestrutural de amostras de betão da barragem de Cahora-Bassa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

LNEC (2003). Barragem de Cahora Bassa. Avaliação da reatividade residual potencial aos álcalis do betão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

LNEC (2021a). Barragem de Cahora Bassa. Caracterização das propriedades e dos processos expansivos do betão. Relatório final.

LNEC (2021b). *Especificação LNEC E 461:2021 Betões. Metodologias para prevenir reações químicas expansivas de origem interna,* Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

SEISMIC STRENGTHENING OF ANCIENT BRICK MASONRY WALLS USING NSM STEEL BARS: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION

Armando Demaj [a]; João Gomes Ferreira [b]; Ana Isabel Marques [c]; António Sousa Gago [b]

[a]Epoka University, Rr. Tirane- Rinas, Km. 12, 1032 Tirana, Albania, ademaj@epoka.edu.al

[b]CERIS, IST, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal; joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt, antonio.gago@tecnico.ulisboa.pt

[c]Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1700-066 Lisbon, Portugal; aimarques@lnec.pt

ABSTRACT

This paper describes a study on the seismic behavior of ancient masonry structures by focusing on the constituting elements, such as masonry units, mortar, and their interfaces. During earthquakes, masonry walls develop in-plane shear forces and deformations, requiring an effective strengthening strategy to enhance their strength and ductility. A novel solution using near surface mounted (NSM) twisted stainless steel bars (TSB) and traditional concrete reinforcing steel bars (SB) was developed to achieve this goal. The technique involves cutting slots in brick walls to insert the bars, fixed with pre-mixed mortar, offering a low-impact, cost-effective method that preserves the architectural integrity of heritage buildings. An extensive experimental campaign was carried out to test this solution on thirty-three masonry wallettes, forty-five triplets, as well as on the constituting materials such as bricks, mortars and reinforcement bars. Two types of walls found in buildings built during 1920-1950 were considered. The tests, such as material characterization tests, axial compression and diagonal compression tests on walletes, and triplet tests, were conducted on both unreinforced and reinforced specimens. Results from these tests indicated that the proposed strengthening method significantly enhances the shear strength and ductility of brick masonry walls if a proper reinforcing layout is adopted.

Key-words: Seismic rehabilitation of ancient buildings, shear strength, twisted steel bars, brick masonry walls, triplet test

1 INTRODUCTION

Ancient buildings with load-bearing brick masonry walls are an important part of our cultural heritage, but they often face significant challenges regarding seismic activities. Unreinforced masonry (URM) structures are particularly vulnerable to earthquake-induced damage and collapse, requiring effective seismic retrofitting solutions.

The behavior of masonry structures under seismic loads is complex, as it depends on the characteristics of the individual masonry components (bricks, mortar, and their interface) as well as the overall structural configuration. Both global and local seismic behaviors of masonry walls must be analysed to consider the vulnerabilities that can lead to significant damage or collapse during earthquakes.

Global seismic behavior refers to the overall response of the building, which is influenced by factors such as the wall-to-wall and wall-to-floor connections, the distribution of masses and stiffness, and the presence of openings. Local seismic behavior, on the other hand, is related to the response of individual masonry elements, such as the in-plane and out-of-plane behavior of walls, which can be affected by factors like the masonry bond pattern, the quality of the mortar, and the presence of reinforcement. Ancient buildings with load-bearing brick masonry walls are a significant part of the cultural heritage in many regions. Constructed using traditional methods and materials, these structures reflect the architectural styles and construction practices of their time. Understanding their historical context and construction techniques is crucial for their preservation. In Portugal, ancient masonry buildings can be categorized into several typologies, each with distinct characteristics. One of the classifications (Silva et al. 2014) categorizes them as follows:

Pombalino buildings (1755-1880), built after the 1755 Lisbon earthquake, are provided with a timber frame structure with masonry infill walls. The timber frame, known as the "Pombalino cage," provided improved seismic resistance compared to traditional masonry construction. *Gaioleiro buildings* (1880-1930) marked a transitional phase, characterized by timber floors (and concrete slabs in the wet zones) resting on load-bearing walls made of solid clay bricks, perforated clay bricks, or irregular stones. Initially bonded with hydrated lime mortar, later structures used cement-lime-sand or cement-sand mortars. *Mixed Concrete-Masonry* ("*Placa*") buildings (1940-1960) featured exterior stone masonry walls, interior brick masonry walls, and reinforced concrete slabs. These slabs acted as rigid diaphragms, providing good horizontal restraint, although the vertical masonry elements often lacked sufficient flexural and shear capacity, making them vulnerable to seismic loads.

The earthquakes of the past have shown that two types of failures are prevailing in the walls subjected to in-plane loads; failure by flexure, and failure by shear (FEMA 1998, Calderini et al. 2009). These two types of failures are characterized by three main failure mechanisms (Figure 1) when masonry walls are subjected to seismic actions: rocking, shear cracking, and sliding failures (Magenes et al. 1997).

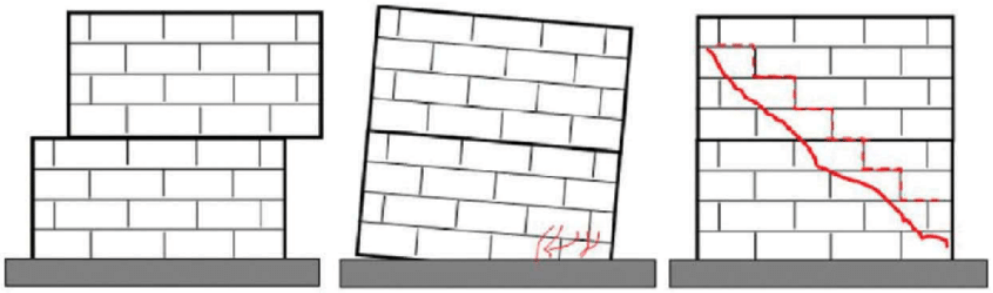


Figure 1– Failure mechanisms of a masonry wall – sliding shear (left), rocking (center), diagonal shear cracking (right) (Cakir et al. 2015)

In recent years, numerous reinforcement techniques for solid clay brick masonry walls have been developed and studied, including reinforced plasters (Marques 2020), FRCM and FRM composites (Del Zoppo et al. 2019), shotcrete (Lin et al. 2014), GFRP jacketing (Mustafaraj et al. 2018), and NSM steel bars (Borri et al. 2011, Ismail et al. 2011), some of which have been validated through experimental tests. Various authors have performed in-plane initial shear strength test to study various types of walls used in the building stock of Lisbon (Atkinson et al. 1989, Binda et al. 1997, Milosevic et al. 2013, Marques 2020). Some authors have already studied the overall effect of a reinforcing solution similar to that analyzed in this study on the in-plane and out-of-plane behavior of brick masonry walls (Ismail et al. 2011, Ismail et al. 2012). Other authors have studied alternative reinforcing solutions, namely based on fabric reinforced cementitious matrix used as a wall render (Guerreiro et al. 2017, 2018a, b, 2020, Marques et al. 2022).

In the framework of the project "RESIST-2020 – Seismic Rehabilitation of Ancient masonry-Concrete Buildings", this study proposes a strengthening solution to address the deficiencies in tensile and shear strength and ductility of masonry walls made of solid clay bricks. It focuses on the buildings constructed during the transition period from masonry to reinforced concrete, which occurred between 1920 and 1950 (Sousa et al. 2006, Ferrito et al. 2016). The proposed solution involves using near-surface mounted (NSM) twisted steel bars (TSB) or conventional concrete reinforcing steel bars (SB), embedded in purpose-cut slots filled with premix mortar. The methodology implemented in this study is based on extensive experimental tests such as determination of the mechanical properties of the constituent materials, diagonal compression tests, and in-plane shear strength tests.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 MATERIAL CHARACTERIZATION (BRICKS, MORTAR, REINFORCEMENT BARS, EMBEDDING GROUT)

The material characterization involved extensive testing to determine the mechanical properties of the constituent materials used in the construction of the masonry assemblages, including bricks, bedding mortars, and reinforcement bars.

The bricks used in this study were solid clay bricks obtained from demolition works of ancient buildings along with newly produced ones provided by several manufacturers. The bricks used in the preparation of the masonry models were old bricks OT2 and newly produced bricks TM_R. Bricks OT2 were used in the construction of cement-based mortar masonry models, whereas TM_R bricks were used for the preparation of the blended cement-lime mortar masonry assemblages (Table 1).

Table 1 – Mechanical properties of bricks (standard deviation and COV in parenthesis)

Brick Type	Load at failure	Compressive strength	Normalized compressive strength	Static modulus of elasticity
	[kN]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
OT2	903.7 (90.0, 0.10)	29.8 (3.0, 0.10)	25.3 (2.5, 0.10)	10884 (2489, 0.23) *
TM_R	919.8 (68.2, 0.07)	31.1 (2.3, 0.08)	26.5 (2.0, 0.08)	4416 (583, 0.13)

* Static modulus of elasticity of original bricks from demolition works (Marques 2020)

Two types of masonry assemblages were constructed in the framework of this study. They differ in the bedding mortar used in their construction. The first set was prepared using old OT2 bricks and cement mortar with a volumetric ratio of 1:5, whereas in the construction of the second set, new bricks (TM_R) and a blended mortar of 1:3:12 (cement : hydrated lime : sand) were used. The reinforcing solution

proposed in this work involved embedding reinforcing bars in pre-cut slots using a premixed embedding grout. The grout used was a very high-strength, injectable, cementitious, non-shrink grout composed of a liquid and a powder component. All mortars were subjected to laboratory testing for the determination of the mechanical properties (Table 2).

Table 2 – Summary of mechanical properties of bedding mortars and embedding grout (90-day)

Mortar type [cement:lime:sand]	**Dynamic modulus of elasticity (by Resonance) [kN/mm^2]**	**Flexural strength [N/mm^2]**	**Compressive strength [N/mm^2]**
1:0:5	15.8 (0.60, 0.04)	3.35 (0.29, 0.09)	13.80 (0.75, 0.05)
1:3:12	3.5 (0.07, 0.02)	0.46 (0.01, 0.02)	0.88 (0.03, 0.03)
Embedding grout	20.0 (0.20, 0.01)	7.26 (3.62, 0.50)	58.65 (6.92, 0.12)

The reinforcement of the masonry assemblages was carried out using two types of reinforcement bars: near-surface mounted (NSM) twisted stainless-steel bars (TSB) and conventional steel bars (SB).

The cement-based mortar masonry wallettes and triplets were reinforced using 6 mm diameter TSB, while the blended mortar masonry walls, wallettes, and triplets were reinforced using 12 mm diameter TSB. The twisted steel bars have considerable axial strength combined with flexibility, and when embedded in mortar, they generate high tensile stress (Table 3).

Table 3 – Reinforcement steel bar properties

Bar type	**Nominal diameter** [mm]	**Maximum force F_m (SD, COV)** [kN]
TSB Φ6	6	11.4 (0.06, 0.01)
TSB Φ12	12	31.9 (0.22, 0.01)
SB Φ12	12	74.3 (0.32, 0.00)

2.2 EXPERIMENTAL SETUP

The experimental program included the testing of masonry wallettes and triplets under various loading conditions, such as diagonal compression and in-plane shear. The setup and instrumentation were designed to capture the behavior of the masonry assemblages and the effectiveness of the strengthening techniques.

2.2.1 Diagonal compression tests

The diagonal compression test, carried out to determine the shear strength of masonry wallette specimens, was performed in following the standard ASTM 519/519M-10 (ASTM 2010). An MFL press with a 5000 kN capacity was used and a displacement-controlled load at a rate of 0.005 mm/s was applied to the specimen priorly rotated at 45º.

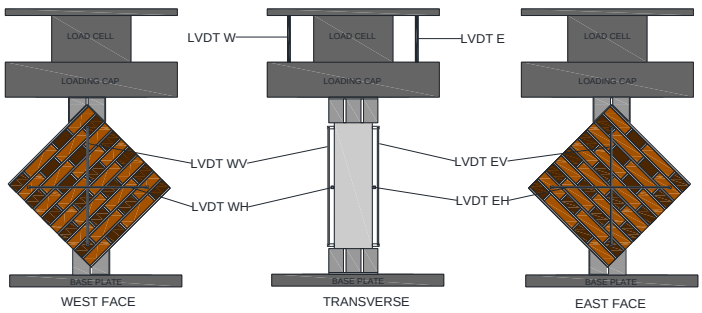


Figure 2 – Instrumentation details for the Diagonal Compression Tests (Demaj et al. 2023)

The vertical and horizontal deformations were measured using four LVDTs (two on each side). The lengthening of the horizontal diagonal was measured using LVDT WH and LVDT EH. To capture the post-peak deformation of the specimen after the removal of the instrumentation for protection purposes, two extra LVDTs located on the top of load cap were used.

2.2.2 Triplet tests

The determination of the initial shear strength was done in accordance with the standard EN1052-3 (CEN 2002), through which the cohesion intercept and the coefficient of internal friction is obtained. For the measurement of the displacements that take place along the mortar-brick interfaces, two Linear Variable Differential Transformers (LVDT) were utilized on one face of the triplet specimen (Figure 3). The LVDT measures the relative displacement that the middle brick undergoes while the vertical load is applied by the load press with respect to the two confining bricks. The precompression load as per the standard is applied through hydraulic actuators.

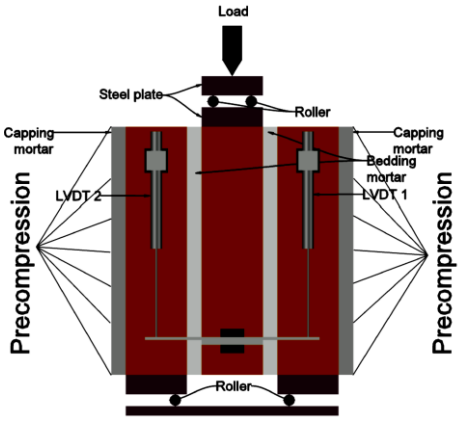


Figure 3 – Instrumentation for the Triplet Tests (Demaj et al. 2022)

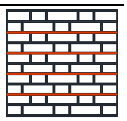
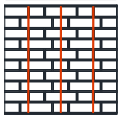
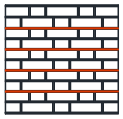
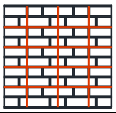
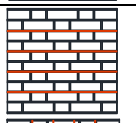
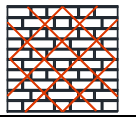
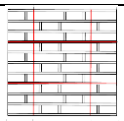
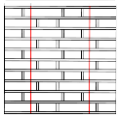
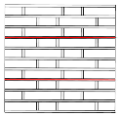
2.3 TESTED SPECIMENS

2.3.1 Masonry Wallettes

The experimental program involved the fabrication of masonry wallettes and their reinforcement with different types of steel bars in diverse layouts. Fourteen wallettes, each measuring 86 × 86 × 25 cm, were built for the diagonal compression tests. These wallettes were made using original solid clay bricks measuring 230 × 110 × 70 mm³, sourced from demolition works of an ancient building in the city center of Lisbon. The wallettes were constructed using a cement-based mortar with a 1:5 cement-to-sand volumetric ratio. This mortar composition was based on information from the Municipal Archive of Lisbon (AFML 2024). A Flemish bond, similar to that used in the buildings under study, was employed in the construction of the wallettes. The mortar mix, applied as bedding mortar, had a layer thickness of approximately 1.5 cm. The wallettes were reinforced using Φ6 mm TSB and Φ12 mm concrete reinforcing steel rebars.

Similarly, another set of masonry wallettes, each measuring 76 × 76 × 25 cm, was fabricated using a Flemish bond (two stretchers and a header), replicating the bond used in the ancient "*placa*" buildings. These wallettes were built using a blended cement-hydrated lime mortar with a volumetric ratio of 1:3:12 (cement:hydrated lime:sand) as the bedding mortar, with a layer thickness of about 1.5 cm (three unreinforced and nine to be reinforced). Twisted steel bars (TSB) with a 12 mm nominal diameter were used for reinforcing this set of masonry wallettes. Detailed information on the reinforcement layouts is provided in Table 4.

Table 4 – Details of the reinforced cement mortar masonry wallettes (Demaj et al. 2022)

Wallette Designation	Reinforcement Type	Bar Diameter	Sides of reinforcement	Reinforcement orientation	Bars/slot	Layout
			Cement-mortar			
WA-1, 2, 3	Unreinforced	-	-	-	-	-
UR-1, 2, 3	Unreinforced	-	-	-	-	-
1H2-TSBΦ6	TSB	6 mm	1	Horizontal	2	
1V1-TSBΦ6			1	Vertical	1	
2H1-TSBΦ6			2	Horizontal	1	
2HV1-TSBΦ6			2	Horizontal and vertical	1	
2H1-SBΦ12	Traditional rebar	12 mm	2	Horizontal	1	
2HV1-SBΦ12			2	Horizontal and vertical	1	
2DD1-SBΦ12			2	Diagonal both directions	1	
			Cement-lime blended mortar			
WAF-01, 02, 03	Unreinforced	-	-	-	-	-
URF-01, 02, 03	Unreinforced	-	-	-	-	-
2HV1_F-1, 2, 3	TSB	12 mm	2	Horizontal and vertical	1	
2V1_F-1, 2, 3			2	Vertical	1	
2H1_F-1, 2, 3			2	Horizontal	1	

2.3.2 Triplet Specimens

The in-plane shear strength of the two types of masonry walls (cement and cement-hydrated lime mortar) was determined through triplet tests performed on the two sets of triplets (Table 5).

Table 5 - Masonry triplets designation and reinforcement details (Demaj et al. 2022)

Binder type	Designation	Type of reinforcement	# of specimens	Type of brick	Mortar ratio cem:lime:sand
Cement	S	No reinforcement	9	Old	1:0:5
	H6	6mm TSB	9	Old	1:0:5
	R12	12mm SB	9	Old	1:0:5
Cement-hydrated lime	SF	No reinforcement	9	New	1:3:12
	H12F	12 mm TSB	9	New	1:3:12

3 EXPERIMENTAL TEST RESULTS AND ANALYSIS

3.1 UNREINFORCED MASONRY WALLETTES

3.1.1 Diagonal Compression Test

In terms of shear behavior, the masonry wallettes with cement mortar and those with cement-hydrated lime blended mortar exhibit distinct characteristics. The cement mortar wallettes primarily demonstrated failure through vertical or diagonal cracking, evident from Figure 4a-c, with crack patterns indicating a cohesive failure mechanism. Stress-strain diagrams (Figure 4d) for these wallettes displayed nearly linear behavior until reaching the ultimate load, reflecting their monolithic-like response.

(a) UR-01 (b) UR-02 (c) UR-03 (d) stress-strain

Figure 4 – Crack patterns of the cement-mortar unreinforced wallettes in diagonal compression (Demaj et al. 2022)

Conversely, the wallettes with cement-hydrated lime blended mortar exhibited stepped cracking during failure, as depicted in Figure 5a, b, and c. This mode of failure indicated weaker bonding between bricks and mortar layers, influencing their shear strength significantly lower than that of cement mortar wallettes. The stress-strain relationship (Figure 5d) for blended mortar wallettes showed a linear response until maximum load, indicative of their less cohesive behavior under shear stress. Table 6 details parameters like shear strength and modulus of rigidity, reflecting the influence of mortar composition on overall performance.

(a) URF-01 (b) URF-02 (c) URF-03 (d) stress-strain

Figure 5 – Crack patterns of the unreinforced wallettes with cement-lime mortar in diagonal compression test (Demaj et al. 2023)

Table 6 – Axial Compression Test result of both types of masonry wallettes (Demaj et al. 2022, 2023)

Wallette	Ultimate Load [kN]	Shear Strength [N/mm^2]	Modulus of Rigidity [N/mm^2]	Energy absorption at ultimate load x10^{-3} [N.mm/mm^3]	Energy absorption at 20% degradation of ultimate load x10^{-3} [N.mm/mm^3]
UR	**398**	**1.29**	**2150**	**0.67**	**2.80**
(Std Dev, COV)	(76, 0.191)	(0.25, 0.197)	(176, 0.082)	(0.11, 0.158)	(2.62, 0.936)
URF	**58.15**	**0.21**	**1122**	**0.50**	**0.55**
(Std. dev., COV)	(22.98, 0.4)	(0.08, 0.38)	(371.72, 0.33)	(0.54, 1.08)	(0.53, 0.96)

3.2 REINFORCED MASONRY WALLETTES

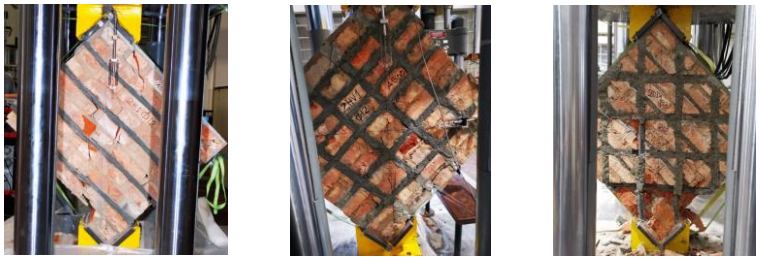
3.2.1 Cement mortar masonry wallettes

All reinforced specimens showed a linear behavior up to the ultimate load with a decrease as soon as the first diagonal crack appears following a decrease in the vertical load as the diagonal cracks propagate. The shear strength results (Figure 8a) show that the reinforcement bars of all layouts have not been demanded to resist the axial tension stresses, hence no increase in specimen's strength is observed when compared to the unreinforced one.

(a) 2HV1-01 (b) 1H2-01 (c) 2H1-01 (d) 1V1-01

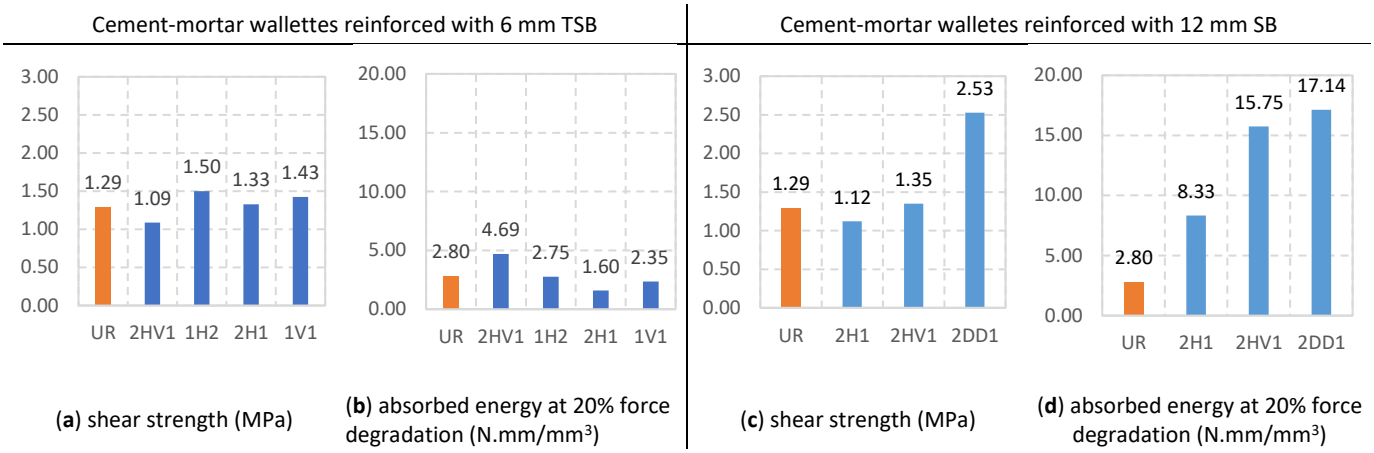
Figure 6 – Crack patterns of 1:5 mortar wallettes reinforced with TSB in diagonal compression test (Demaj et al. 2022)

Although this reinforcement type has no considerable effect on the strength, in terms of absorbed energy at 20% force degradation the grid layout demonstrated a substantial increase (Figure 8b), hence contributing to the specimen's ductility. Similarly, increasing the diameter of the reinforcement bar did not contribute substantially to the increase in the shear strength of the specimens for the same layout configurations (Figure 8c). The only layout that shows a substantial increase in shear strength and ductility is the grid layout oriented at 45° in the direction of tensile stresses, hence allowing the bars to behave in pure tension. However, this solution is not very practical, but may be applied to masonry walls with higher shear strengths. In terms of ductility, all layouts showed an increase due to the bars preventing the cracks from opening (Figure 8d).



(a) 2H1 (b) 2HV1 (c) 2DD1

Figure 7 – Crack patterns of 1:5 mortar wallettes reinforced with SB in diagonal compression test (Demaj et al. 2022)



(**a**) shear strength (MPa)

(**b**) absorbed energy at 20% force degradation (N.mm/mm³)

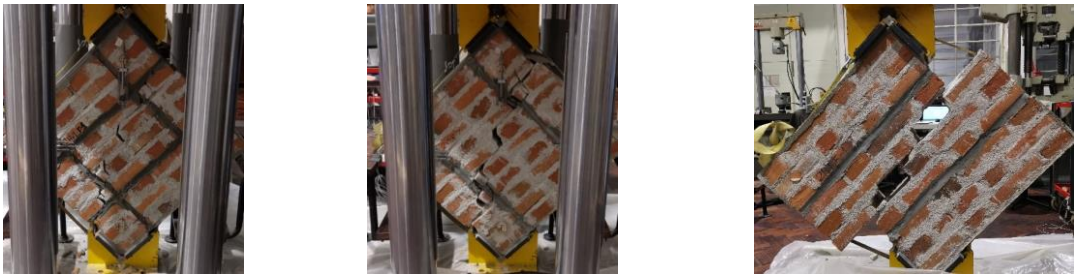
(**c**) shear strength (MPa)

(**d**) absorbed energy at 20% force degradation (N.mm/mm³)

Figure 8 – Comparison of unreinforced and reinforced cement mortar wallettes (Demaj et al. 2022)

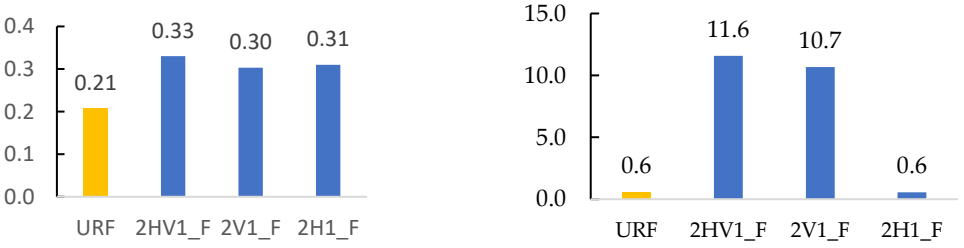
3.2.2 Blended cement-hydrated lime mortar masonry wallettes – 12 mm TSB reinforcement

The proposed reinforcement solution significantly increases shear strength and ductility. The grid layout (Figure 9a) performed best, showing the greatest improvement in shear strength and energy absorption up to 20% degradation of maximum force. Among the non-grid layouts, the vertical-only reinforcement (Figure 9b) achieved results similar to the grid layout in terms of shear strength and ductility. However, the layout with only horizontal rebars enhanced shear strength but did not improve ductility (Figure 10).



(a) 2HV1_F (b) 2V1_F (c) 2H1_F

Figure 9 – Crack patterns of blended mortar wallettes reinforced with 12 mm TSB in diagonal compression test (Demaj et al. 2023)



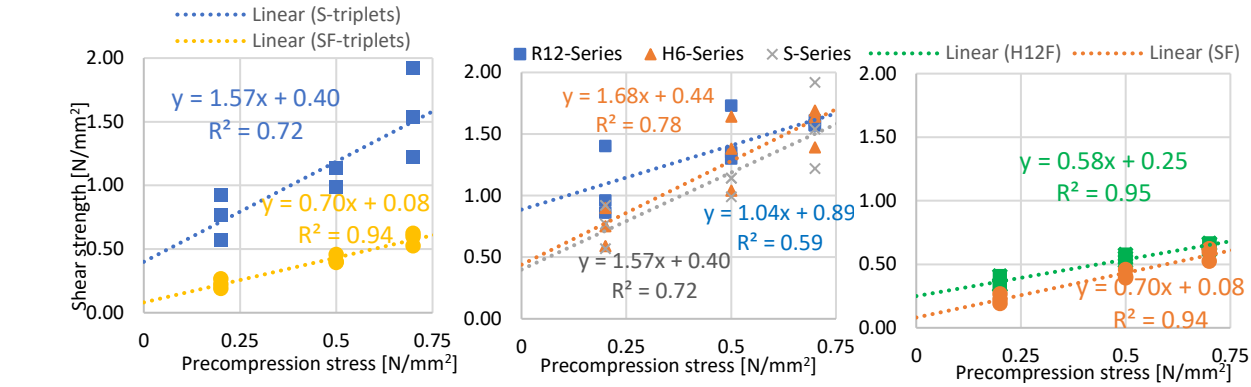
(**a**) shear strength (MPa)

(**b**) absorbed energy at 20% force degradation (N.mm/mm³)

Figure 10 – Unreinforced vs reinforced with 12 mm TSB blended mortar wallettes (Demaj et al. 2023)

3.3 TRIPLET TEST

The unreinforced cement mortar triplets (S-series) and cement-lime mortar triplets (SF-series) were subjected to various displacement levels with alternating precompression levels (0.2, 0.5, and 0.7 MPa) to determine the cohesion intercept and angle of internal friction for each specimen. The reinforced cement mortar triplet and cement-lime mortar specimens were tested using the same precompression levels for the determination of the cohesion intercept and the coefficient of internal friction (Figure 11).



(a) Unreinforced S-series vs SF-series

(b) Reinforced vs unreinforced cement mortar triplets

(c) Reinforced vs unreinforced cement-lime mortar triplets

Figure 11 – Normal and shear stress relationship (Demaj et al. 2022)

There is a noticeable increase in shear strength for all reinforced triplet specimens during the initial precompression stress level. This increase is reflected in higher cohesion intercept values. The induced friction force at the brick-mortar interface during the subsequent two precompression stress levels mainly accounts for the corresponding shear strength values. However, the reinforcement bars did not significantly increase the coefficient of internal friction.

4 CONCLUSION

The study evaluated the shear performance of brick masonry walls in ancient masonry-concrete buildings strengthened with near-surface mounted twisted steel bars (TSB) and traditional concrete reinforcing steel bars (SB). Two types of solid brick masonry walls were studied. The first type has a particularity in relation to other types of ancient masonry walls, namely the high resistance and stiffness of bed and head joints, which is a result of the mortar composition used in a certain period, around the 1950s, made with cementitious binder. The second one, type frequently found in buildings between 1920 and 1950, is made in lime-based mortar.

Various reinforcement layouts were investigated through experimental testing. The tests were also simulated using numerical models, which accurately replicated the experimental results. The strengthening of cement masonry wallettes with 6 mm TSB bars showed limited effectiveness in increasing strength, while slightly improving ductility. The larger diameter 12 mm SB reinforcements did not significantly impact strength either. However, grid reinforcement (both horizontal and vertical bars) significantly improved energy dissipation compared to unreinforced prototypes. The study indicates that, while these reinforcement solutions can enhance ductility, they are less effective in increasing the strength of the more resistant cement-mortar masonry walls. On the other hand, the three reinforcement layouts on the weaker walls made of a lime-based mortar showed that the grid layout (2HV1_F) was the most effective, significantly improving shear strength and energy dissipation. The vertical-only layout also performed well, while the horizontal-only layout did not substantially improve ductility.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/04625/2020 from the research unit CERIS and PTDC/ECI-EGC/30567/2017 project “RESIST-2020 – Seismic Rehabilitation of Ancient masonry-Concrete Buildings”. The support of Helifix UK, by supplying all reinforcement materials and technical assistance is gratefully acknowledged, as well as the support of

Tramo, their representative in Portugal. The experimental tests were carried out at LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal with the help of Dr. Salomé Vaz, who is also acknowledged.

REFERENCES

AFML (2024). Arquivo Municipal de Lisboa. Núcleo Fotográfico, Rua da Palma. Lisboa, Portugal. Available at http://arquivomunicipal.cm-lisboa.pt (in Portuguese).

ASTM (2010). ASTM E519/E519M-Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages, ASTM International West Conshohocken, PA, USA.

Atkinson, R., B. Amadei, S. Saeb and S. Sture (1989). Response of masonry bed joints in direct shear. Journal of Structural Engineering 115(9): 2276-2296. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:9(2276).

Binda, L., C. Tiraboschi and S. Abbaneo (1997). Experimental research to characterise masonry materials. Masonry International 10(3): 92-101.

Borri, A., G. Castori and M. Corradi (2011). Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords. Construction and Building Materials 25(2): 494-503. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.014.

Cakir, F., E. Uckan, J. Shen, B. S. Seker and B. Akbas (2015). Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. Engineering Failure Analysis 58: 249-266.

Calderini, C., S. Cattari and S. Lagomarsino (2009). In-plane strength of unreinforced masonry piers. Earthquake engineering & structural dynamics 38(2): 243-267. https://doi.org/10.1002/eqe.860.

CEN (2002). EN1052-3 - Methods of Test for Masonry: Part 3: Determination of Initial Shear Strength. Comité Européen de Normalisation. Brussels, Belgium.

Del Zoppo, M., M. Di Ludovico, A. Balsamo and A. Prota (2019). Experimental in-plane shear capacity of clay brick masonry panels strengthened with FRCM and FRM composites. Journal of Composites for Construction 23(5): 04019038. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000965.

Demaj, A., A. Gago, A. I. Marques and J. G. Ferreira (2023). Shear performance of brick masonry walls reinforced with twisted steel bars. Structures 58: 105579. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105579.

Demaj, A., A. S. Gago, A. I. Marques and J. G. Ferreira (2022). In-Plane Seismic Behavior of Brick Masonry Walls Reinforced with Twisted Steel Bars and Conventional Steel Bars. Buildings 12(4): 421. https://doi.org/10.3390/buildings12040421.

Demaj, A., A. I. Marques, J. G. Ferreira and A. S. Gago (2022). In-plane shear strength of solid clay brick masonry reinforced with near surface mounted steel bars. Case Studies in Construction Materials 17: e01614. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01614.

FEMA, F. (1998). FEMA 306.(1998). Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings. Federal Emergency Management Agency, Redwood City, California, USA.

Ferrito, T., J. Milosevic and R. Bento (2016). Seismic vulnerability assessment of a mixed masonry-RC building aggregate by linear and nonlinear analyses. Bulletin of Earthquake Engineering 14(8): 2299-2327. https://doi.org/10.1007/s10518-016-9900-0.

Guerreiro, J., J. G. Ferreira, J. Proença and A. Gago (2018). Strengthening of old masonry walls for out-of-plane seismic loading with a CFRP reinforced render. Experimental Techniques 42: 355-369. https://doi.org/10.1007/s40799-018-0239-0.

Guerreiro, J., J. G. Ferreira, J. Proença and A. Gago (2020). Experimental and numerical analysis of the behaviour of masonry walls strengthened with CFRP reinforced render. Asian Journal of Civil Engineering 21(2): 331-349. https://doi.org/10.1007/s42107-019-00207-0.

Guerreiro, J., J. Proença, J. G. Ferreira and A. Gago (2018). Experimental characterization of in-plane behaviour of old masonry walls strengthened through the addition of CFRP reinforced render. Composites Part B: Engineering 148: 14-26. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.045.

Guerreiro, J., J. M. Proença, J. G. Ferreira and A. S. Gago (2017). Bonding and anchoring of a CFRP reinforced render for the external strengthening of old masonry buildings. Construction and Building Materials 155: 56-64. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.043.

Ismail, N. and J. M. Ingham (2012). In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars. Construction and Building Materials 36: 119-128. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.087.

Ismail, N., R. B. Petersen, M. J. Masia and J. M. Ingham (2011). Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars. Construction and building materials 25(12): 4386-4393. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063.

Lin, Y.-W., L. Wotherspoon, A. Scott and J. M. Ingham (2014). In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallettes using ECC shotcrete. Engineering Structures 66: 57-65. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.043.

Magenes, G. and G. M. Calvi (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. Earthquake engineering & structural dynamics 26(11): 1091-1112. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11%3C1091::AID-EQE693%3E3.0.CO;2-6.

Marques, A. I. (2020). Rehabilitation of old buildings: reducing seismic vulnerability by strengthening the walls (Original title: Reabilitação de edifícios antigos: redução da vulnerabilidade sísmica através do reforço de paredes) Doctoral dissertation, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.

Marques, A. I., J. G. Ferreira, P. Candeias and M. d. R. Veiga (2022). Experimental evaluation of brick masonry walls strengthened with TRM (textile reinforced mortar) renders. Buildings 12(6): 840. https://doi.org/10.3390/buildings12060840.

Milosevic, J., A. S. Gago, M. Lopes and R. Bento (2013). Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens. Construction and Building Materials 47: 1372-1380. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.036.

Mustafaraj, E. and Y. Yardim (2018). In-plane shear strengthening of unreinforced masonry walls using GFRP jacketing. Periodica Polytechnica Civil Engineering 62(2): 330-336. https://doi.org/10.3311/PPci.11311.

Pasticier, L., C. Amadio and M. Fragiacomo (2008). Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V. 10 code. Earthquake engineering & structural dynamics 37(3): 467-485. https://doi.org/10.1002/eqe.770.

Silva, A., R. Neves and J. De Brito (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Composites 50: 73-81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001.

Sousa, M., C. Oliveira and A. COSTA (2006). Characterization of the building stock in Mainland Portugal to study seismic risk (Original title: Caracterização do parque habitacional de Portugal Continental para estudos de risco sísmico). Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)(55): 35-50. https://repositorio.lnec.pt/handle/123456789/1008544.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

SHELTER PROJECT, A NEW CONCEPT OF SEISMIC PROTECTION. DYNAMIC TEST OF A BUILDING WITH A SEISMIC SHELTER INSTALLED.

Seyedsajjad Hosseini[a]; João Gomes Ferreira[a]; Luís Guerreiro[a]; Rita Moura[b]; João Guerreiro[a]

[a] CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt, luis.guerreiro@tecnico.ulisboa.pt, seyedsajjad.hosseini@tecnico.ulisboa.pt, joao.a.guerreiro@ist.utl.pt

[b] Teixeira Duarte SA., Lagoas Park - Edifício 2 - piso 2 Sul, 2740-265 Porto Salvo, rd@teixeiraduarte.com

ABSTRACT

In regions where seismic risk is a concern, seismic reinforcement for buildings vulnerable to earthquakes is an imperative measure, which is complex, time-consuming, involves significant costs, and is generally challenging when there is no adequate seismic risk perception. The SHELTER project – "Structural Hyper-resisting Element for Life Threatening Earthquake Risk" – proposes a solution that aims to protect the lives of occupants of vulnerable buildings in light of the stated reasons. The project involved numerical analyses and an extensive experimental campaign that culminated in a test at the LNEC seismic table to evaluate the behaviour of the shelter when the building undergoes collapse. The building model was made of stone masonry and timber floors, built at half-scale, with a shelter installed on the top floor. Even though the collapse of buildings presents a significant variability that cannot be fully characterized in the single study case, the test made it possible to identify some relevant aspects of the shelter behaviour in a collapsing building. This exercise will facilitate the optimization of shelter design and, more significantly, its connection to the buildings. An important aspect underscored was the (potentially high) floor rotation and, consequently, the seismic shelter rotation.

Keywords: Seismic shelter, Vulnerable buildings, Seismic protection

1 INTRODUCTION

Seismic activities are frequently associated with economic and human losses in earthquake-prone countries; however, their influence may vary in different regions depending on the number of old buildings constructed and their vulnerabilities. Preventive methods such as seismic strengthening techniques are always considered privileged for improving building performance and resilience and mitigating casualties. However, the difficulties in implementing this technique have led to using many non-reinforced buildings. In the SHELTER project – "Structural Hyper-resisting Element for Life Threatening Earthquake Risk" – to address this deficiency and mitigate the earthquake risks in these regions, a seismic shelter including different parts was proposed and developed (Gomes Ferreira, et al. 2021). The robust structure of the seismic shelter can protect people from heavy debris. Moreover, in case of a global collapse and the fall of the shelter when this unit is installed on the upper floors of the building, safety seats with a shock absorber system can efficiently reduce the shock effect on the shelter occupants' vital limbs and vertebrae as sensitive body parts (Guerreiro et al, 2022b). To increase the readiness of the building occupants, the included on-site Earthquake Early Warning System (EEWS) in the shelter unit has the role of warning them to run towards the shelter and take cover before the severe earthquake wave's shock begins. The other items enhancing the chances of survival for people under debris consist of emergency kits, food, and water, designed to be placed between the shelter structure frames. During the analysis and design of the shelter structure and safety seat (Guerreiro, et al. 2022a; Guerreiro, et al. 2022b), the building global collapse, as a gravity-based motion, was considered an extreme scenario for shelter design.

In the SHELTER project, the first test campaign out of three experimental studies was to characterize the mechanical behaviour of the full-scale shelter structure in LNEC (Hosseini, et al. 2022). During the second stage, the safety seat performance equipped with shock absorber systems using a crash-test dummy was examined at the Teixeria Duarte operational centre. The last experimental campaign was related to the building collapse over the shaking table with the installed shelter at the top floor to simulate real global building failure during earthquakes. Employing the shaking table test is one of the most frequent and applicable methods for assessing building performance dynamically and seismically, evaluating structures constructed using various materials and structural systems. It is also helpful to determine their linear and nonlinear, elastic or inelastic dynamic response (Shujin Li, et al. 2019, Paolo Martinelli, et al. 2009, Saranik, et al. 2012, Chen, et al. 2013, Lin, et al. 2014). However, in this experimental campaign, which is the focus of this paper, the objective was different. A half-scale four-story building over the LNEC-3D shaking table platform, representing a vulnerable masonry building in an earthquake with the reduced scale model of the shelter on its top floor, was intended to be forced to collapse. The selected construction materials and building characteristics were determined to induce a global collapse of the structure. As the test was entirely destructive, the sensors employed for recording the kinematic parameters of the model, namely the shelter and the building, were mostly wireless. Besides, some corded sensors were applied to increase the certainty of the measurement. This seismic testing facilitated better figuring out the shelter behaviour during the building collapse phenomenon, the connection between the shelter structure and the building, and the following studies on the shelter design and development.

2 TEST DESCRIPTION

This part outlines the constructed model of a four-story masonry building model and an assembled shelter prototype using a geometrical scale of 1:2. Two walls were connected by four wooden floors, representing a part of the building, and the shelter was bolted to the last floor (Figure 1). Multiple sensors were considered in this investigation to analyse the building collapse. One approach included implementing optical sensors comprising three sets of high-speed cameras and an image-tracking method. In this regard, many optical-type targets and infrared LEDs as an anti-dust technique were

utilized and connected to the different parts of the model. In the second method, different types of accelerometers were used.

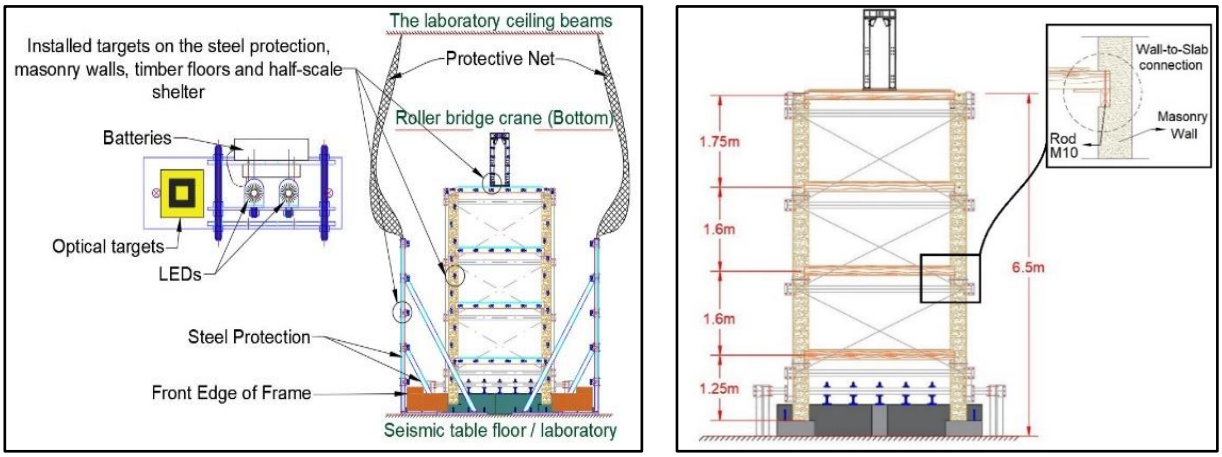


Figure 1. Schematic views of the tested model.

2.1 MASONRY BUILDING AND SHELTER MODEL

The half-scale masonry-building model comprised two parallel masonry walls (an equivalent stone masonry material with averaged maximum compression strength and Young modulus of 1.20MPa and 1.32GPa, respectively, constructed on a reinforced concrete grid foundation (C20/25). The wall dimensions were 6.50m x 2.00m x 0.30m (height, width and thickness). The four slabs of the model were made of pine timber with dimensions of 2.00m x 2.90m. The heights of the floors were 1.25m, 1.60m, 1.60m and 1.75m, as indicated in Figure 1. The penetration length of the slab into the wall was equal to 10cm, transmitting load to the wall through a timber beam (cross-section of 8cm x 16cm) embedded in the masonry walls (Figure 1). The estimated weight of the masonry walls and foundation made of concrete and timber floors was approximately 18tons. In this experiment, the non-reinforced connection, similar to a real unreinforced masonry building, was selected reproducing the building vulnerabilities; however, it would lessen the control over the collapse test by increasing the number of degrees of freedom. As a half-geometrical scale was followed, the steel-made shelter model had dimensions of 0.60m, 1.40m, and 1.50m (width, length, and height), and a total weight of 800kg. The model was considered a rigid body and bolted on the four corners to the midspan of the top floor, as shown in Figure 1.

2.2 SHAKING TABLE, SENSORS AND DATA LOGGING EQUIPMENT

The LNEC shaking table comprises a rectangular platform driven by hydraulic actuators capable of movement in up to three translational degrees of freedom (D.O.F.). The platform dimensions are 5.6m x 4.6m, providing an area of approximately 25 m^2 and a weight capacity of 40t. The 7.2m overhead crane height constrains the testing models. The testing signal vibration frequencies range from 0Hz to 40Hz, with the actuator maximum dynamic load of 1250kN. The system incorporates an emergency stop feature that limits the actuator movement amplitude to 580mm (service stroke of 290mm). Different sensors were used in this test to ensure redundancy because of the destructive nature of the test and its large scale, making it unfeasible to be repeated. In this regard, three types of sensors, namely accelerometers and six high-speed camaras, were used to record and process data. The sensors utilized for this test encompassed high-capacity wireless accelerometers and wired accelerometers supplemented with high-speed cameras with different features. Figure 2 presents all employed camera names, positions and covered areas. One Bonito-Allied (Full-HD with 300 frames per second or fps), one IDT Motion Scope-M5 (Full-HD with 300 fps), and one GoPro Hero 8 (Full-

HD with 120 fps) as well as three synchronized cameras provided by INEGI (Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering) were used.

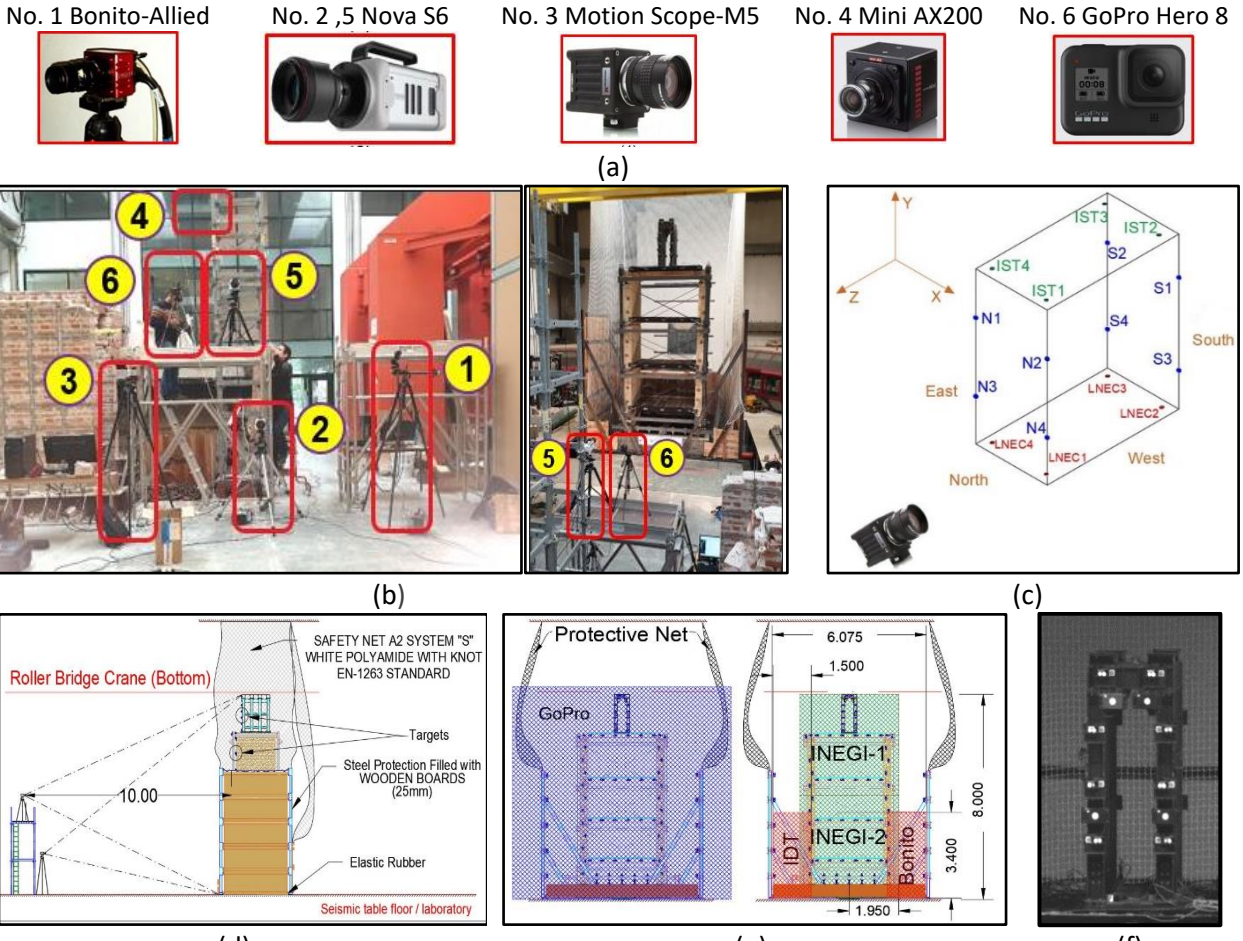


Figure 2. All utilized cameras (a), the positions of mounted cameras (b) the sensor positions on the shelter (c), test side view (d) the camera-covered areas (e), activated sensors and targets on the shelter (f).

The former were capable of recording at 1000 fps, which represented the highest frame rate among all cameras used in this test, and were dedicated to recording the different altitudes of the model during the experiment for image tracking purposes. As illustrated in Figure 1 and Figure 2 (f), fifty designated targets for the cameras consisted of circular painted targets, square optical targets and LEDs. The positions of the circular targets painted (40mm diameter designated with N1, N2, N3 and N4) on the INEGI accelerometer box cap are depicted in Figure 2 (c). The sensors with the highest capacity for measuring the accelerations of the shelter fall were four sets of high-capacity wireless accelerometers, which measured the acceleration in the three axes with a maximum sampling rate of 1000Hz. As described before, each of the triaxial accelerometer sets comprises three Arduino microcontrollers, three analogue output accelerometers, two ADXL377 and one ADXL1004; these sensors provided maximum ranges of ±200g and ±500g for two horizontal and vertical directions (Hosseini, et al. 2023). Eight sets of INEGI triaxial accelerometers (their positions are shown in Figure 2 (c)) capable of measuring a maximum acceleration of 100g developed using MEMS accelerometers were also used as collapse test instrumentation. The sampling rate of these accelerometers was around 600Hz. The errors of INEGI accelerometers along the X, Y and Z-axes with a probability of 95% were within ±0.5g, ±0.7g and ±1.2g of the measured accelerations, respectively. The applied

accelerometers consisted of eight wired piezoelectric vibration transducers with a maximum capacity of 50g provided by the earthquake engineering and structural dynamics unit of LNEC, installed on the base plate of the half-scale shelter shown in Figure 2 (c). These sensors were connected to the computer in the control room of the shaking table laboratory. Data was acquired with 600Hz sampling rates. LNEC accelerometers were distributed to measure vertical acceleration in all corners; however, other accelerations along the other two horizontal directions were recorded only on the two diagonal corners.

3 TEST PROCEDURES

3.1 THE FIRST PHASE OF THE COLLAPSE OF THE BUILDING

After fixing the model foundation to the shaking table platform and executing the dynamic characterization test of the masonry model, a half-scale shelter was positioned atop the building, and all sensors were activated. The transverse excitation of the shaking table was initiated using an artificial strong motion signal from the LNEC database for a 7.1 magnitude earthquake in Lisbon (Figure 3). The seismic motion scale was 1:2 based on the Cauchy similitude law and filtered by high pass Butterworth filter at 3Hz to exclude the frequency of the first vibration mode. Four motions with 1.0, 1.5, 2.0, and 3.0 times the target motion amplitude were applied to the model, which made the model shake vigorously but did not lead the building collapse.

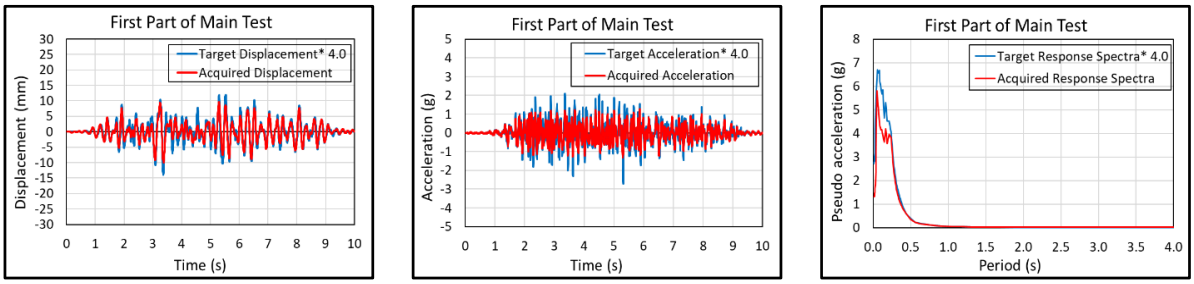


Figure 3. The acquired and target motion parameters.

Subsequently, after the building experienced several vibrations, the connection between the slab and the wall on the western side failed by imposing 4.0 times the target motion amplitude. Due to the loss of support, the slab carrying the shelter struck the lower timber floor while rotating around the other side support. This impact caused breakage of the two middle timber beams under the resultant bending moment. Consequently, the half-scale shelter lost connection with the timber floor and rotated towards the masonry wall, resulting in a collision between the wall and the shelter. Contrary to the expectation, when the fourth floor fell and impacted the third-floor slab, the third-floor wall-to-slab connection did not fail on the impacted side, while the third floor detached from the opposite side. This failure pattern, where both walls remained upright, and the first timber floor did not fail, effectively prevented a progressive collapse of the building. Following the excitation cessation, the rotated shelter was supported by the broken timber floor at the bottom and the masonry at the top corner. The test was paused for about 25 minutes. The GoPro camera captured the overall view of the model before and after the first part of the test, as shown in Figure 5 (b).

3.2 THE SECOND PHASE OF THE COLLAPSE OF THE BUILDING

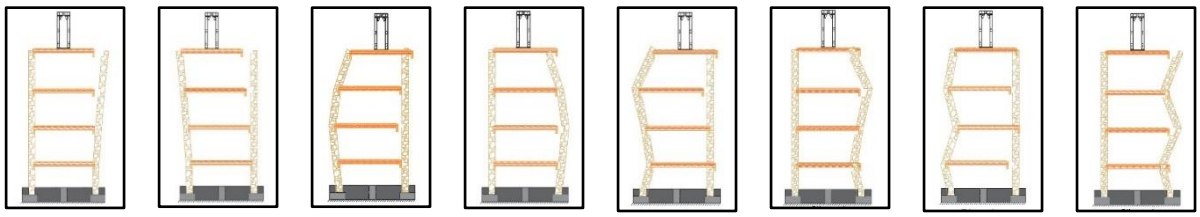
In the second phase of the experiment, the input vibration was similar to the previous one, as indicated in Figure 3, reaching a maximum displacement and acceleration of around 10mm and 1.2g, resulting in the collapse of the building and shelter fall. As in the previous excitation, the target and acquired

acceleration converged after a period value equal to 0.25 seconds (f=4Hz). The inclined shelter position was initially at a height of 6 meters. While the building underwent motion, the movement of the shelter was impeded by the western wall, resulting in the shelter remaining stationary for approximately 5 seconds. At about 5.5 seconds after the beginning of the second part, when the displacement of the applied motion reached its second maximum, the western building wall moved outward and collided with the steel protection assembled surrounding the shaking table platform. Afterwards, the shelter top, which had been stopped by the wall up to that moment, continued its rotation until it horizontally impacted the lower timber floor. The shelter remained horizontal and descended with the timber floor for around 2 meters. At last, the wall on the eastern side commenced rotating, and the upper wall segments struck the lower edge of the half-scale shelter, causing a significant impact and a slight rotational movement of the shelter. During the second phase of the fall, the shelter followed vertical and horizontal paths of approximately 3 meters and 1 meter, respectively (Figure 8).

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 DYNAMIC CHARACTERISATION OF THE BUILDING MODEL

The modal identification test was conducted to determine the model natural frequency and gain more control over the building collapse. This strategy involved applying a dynamic excitation, in the collapse tests, without a frequency content near the first modal value, to avoid lateral collapse and to excite the higher-level modes, hopefully leading to a “central” building failure with a pancake-type collapse.



1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode	5th mode	6th mode	7th mode	8th mode
T = 1.32s	T = 1.04s	T = 0.25s	T = 0.21s	T = 0.11s	T = 0.08s	T = 0.06s	T = 0.04s

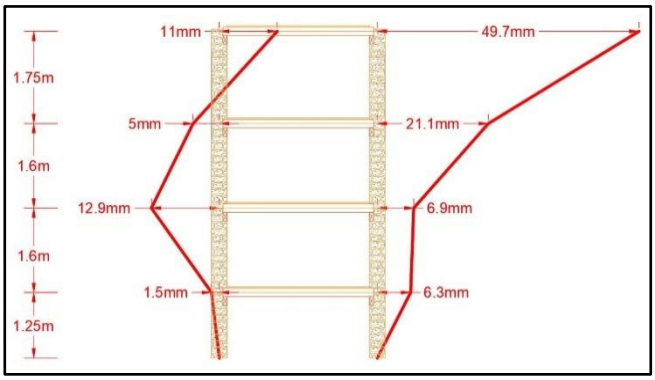
Figure 4. Vibration modes for the building with detachment of the slabs.

Consequently, this approach also led to limited displacement amplitudes of the shaking table platform, restricted to 580mm. These characterization tests were performed under different conditions on the model. Considering that timber slabs were not reinforced to the walls and that the connection between the wall and the concrete foundation was without any additional support, Figure 4 displays the eight possible mode shapes of the masonry walls and corresponding approximate periods. Given the theoretical symmetry of the mode, this mode shape could be similar for each wall.

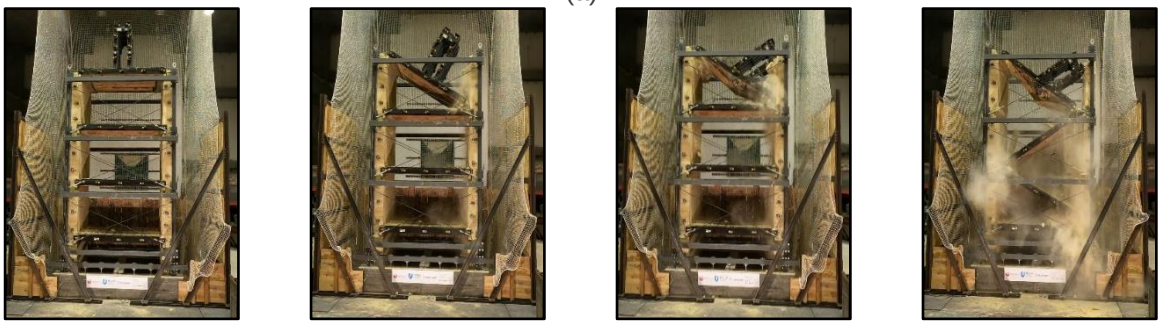
4.2 COLLAPSE TEST

Despite the fact that the applied motion was only in the horizontal direction, vertical and out-of-plane displacements were observed through an analysis of sensor accelerations and camera footage. This implies that the model underwent torsional movement. Before the building collapse started, different vibration modes in the walls occurred as slabs were not tied to the walls, resulting in the dislocation of the last floor connection prior to the failure of the masonry walls. The displacement of each floor before the collapse is depicted in Figure 5 by image tracking of the GoPro footage. The western wall featured deformation resembling the 1st mode of vibration, while the east wall resembled the 3rd mode shape in Figure 4. The obtained maximum inter-story drift ratio of the last floor before the failure was

equal to 1.6%, which is higher than Eurocode 8 [11] limits for masonry buildings between 0.5% and 1.0% of the height of the story.



(a)

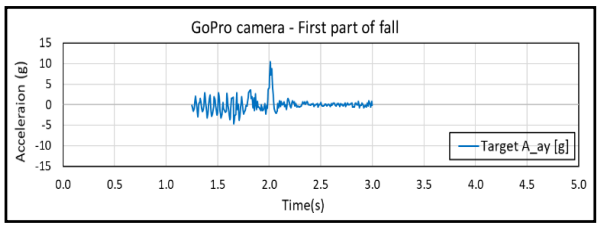


(b) (c) (d) (e)

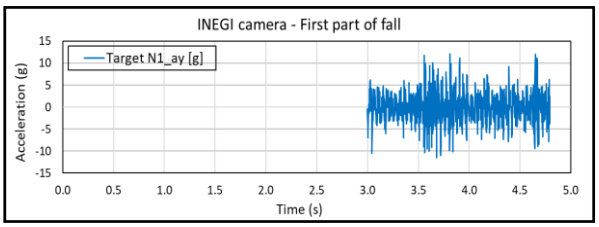
Figure 5. Maximum wall displacement before the collapse (a), first part of the fall (b), (c), (d), (e).

4.2.1 The INEGI and GoPro cameras results during the first part of the fall

In light of a technical issue with INEGI cameras, both INEGI (the last 1.5 seconds) and GoPro (the first three seconds) footage were analysed to determine the acceleration during the initial phase, as depicted in Figure 6. However, deficiencies associated with each camera resulted in improper outcomes. Specifically, the slow frame rate of GoPro and INEGI camera resolution were inadequate for obtaining smooth acceleration diagrams based on differentiating position records.



(a)



(b)

Figure 6. The acceleration along Y during the first 3s by GoPro (a) and the last 1.5s by INEGI (b).

During 1.8m vertically and 1.0m horizontally, the maximum projected values of accelerations along the height and width of the shelter were 3g and -12g sequentially. These accelerations along the width and height axes were equal to -12.9g and 7.8g during the last 1.5 seconds of fall using INEGI footage (a weighted moving average was used to achieve smoother displacement diagrams).

4.2.2 The LNEC and INEGI accelerometers results during the first part of the fall

The first part of the fall included three main shocks due to the impact between the fourth and third floors.

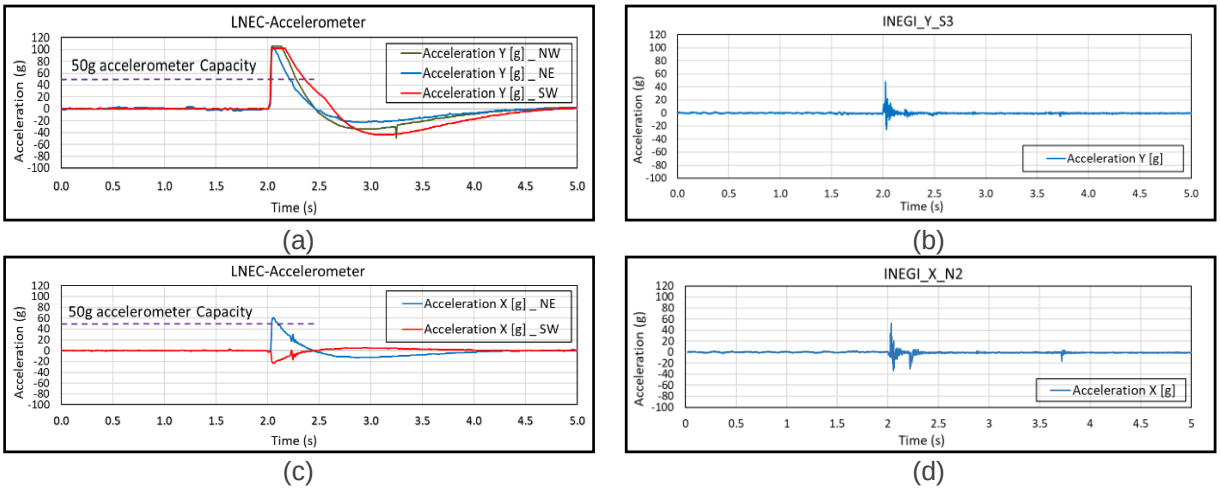


Figure 7. The accelerometer results along the Y-axis, LNEC (a), and INEGI sensor 3 on the south (b), the accelerometer results along the X-axis, LNEC (c), and INEGI sensor 2 on the north (d)

Except for the South-Eastern accelerometer, which did not work properly, the measured accelerations by the other three LNEC sensors in the Y-axis (vertical one or along the shelter height) reached 100g with a plateau on the upper part of the diagram (Figure 7 (a)) indicating these acceleration peaks surpassed the maximum capacity of the sensors (50g). Following the peak, the accelerometers required a recovery period before returning to full operability. Throughout this duration, the sensors were unable to register additional accelerations. According to the results obtained from the INEGI accelerometers placed at various locations on the columns and beams, it was observed that the impact accelerations recorded by these sensors were lower than those of LNEC. This was attributed to the dissipation of the propagated waves through the shelter structure and the proximity of the LNEC sensors to the impacted area. The shock accelerations along the shelter height during the initial impact between the last and third floors (at around 2 seconds) were with the maximum and minimum recorded accelerations equal to N2-Y=17.6g and S3-Y=47.7g (Figure 7 (b)). Since the accelerometers N1 and N2 were further to the impacted spots, their accelerations were lower than the other sensor's values. The impact between the shelter and the wall (at the 2.2 seconds) and other impacts were not demanding for the sensors to measure accelerations along the shelter height. As the shelter rotated in the X and Z axis during the impact with the lower floor, the northern and the southern sensors showed different signs of acceleration along the X-axis. The North-Eastern (NE) side reached 60.7g along the motion trajectory. Conversely, the South-Western corner acceleration (SW) was negative, registering at -22.7g, opposing the direction of the fall. Like the Y-axis, LNEC accelerometers along the X-axis could not measure the acceleration for a few seconds Figure 7 (c). The acceleration values recorded by INEGI sensors were close to the LNEC ones along X. During the first impact to the lower floor (at around 2 seconds); also, the second impact (around 2.2 seconds) by the wall, as shown in Figure 7 (d) (only N2-X is presented), the maximum acceleration was related to sensors N2-X=52.6g and -30.1g, S4x=-51.5g and -19.1g. The IST accelerometer on the cover plate (NW) also measured an acceleration of -10.4g in the first impact, and as the wall-to-shelter impact was near this sensor, it was the most significant acceleration in this direction and equal to nearly -67.1g. The maximum accelerations of sensors (LNEC) on the baseplate exhibited different signs but did not exceed the accelerometer capacity threshold in the Z direction (around -23.1g and 38.2g). The Z-axis and INEGI accelerometers, due to the column vibrations, experienced more significant acceleration than the baseplate values.

4.2.3 The INEGI camera results during the second part of the fall

During the second part of the collapse, the shelter vertical and horizontal fall paths were about 3 meters and 1 meter (Figure 8).

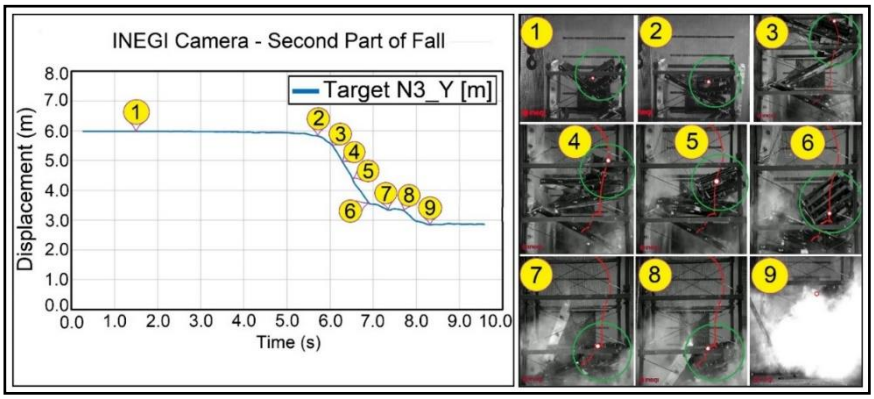
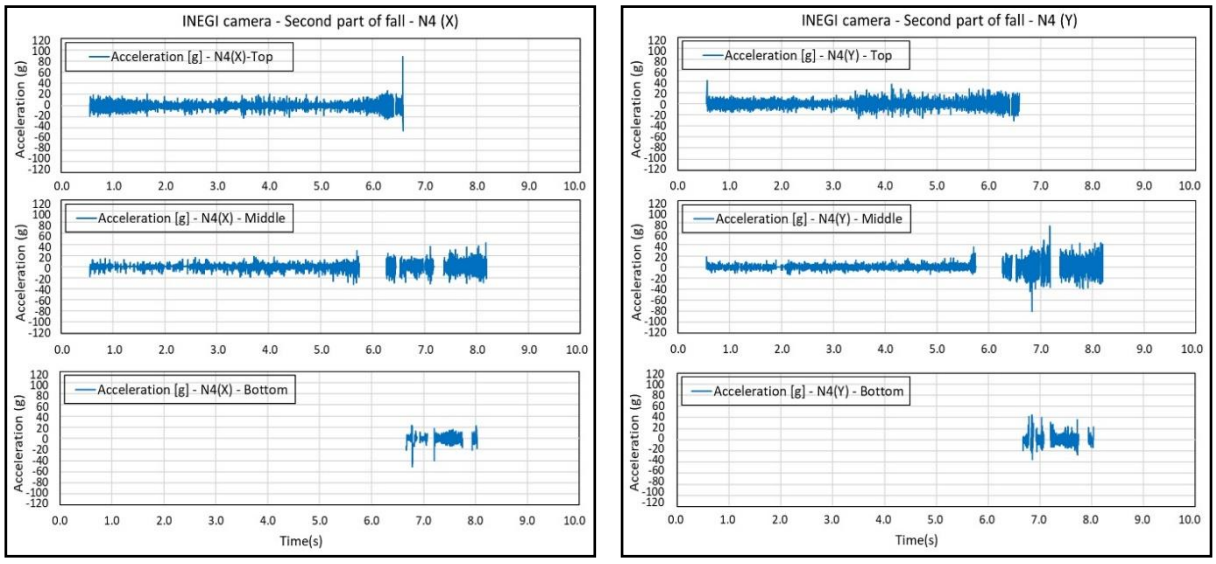


Figure 8. The fall path along the Y-axis.

The results of the analysed footage of the synchronised INEGI cameras at three height levels are presented in Figure 9 (only N4). Due to limited camera coverage and visual obstructions, tracking stopped when the target disappeared, resulting in discontinuous diagrams. So, they are presented in three separate graphs. In addition, the building collapse experiment on the shaking table was designed to be analysed in 2D mode; hence, the shelter had some out-of-plane movement, which could not be analysed using this method. The diagrams were initially smoothed using a weighted moving average to calculate accelerations. Due to limited coverage, steel blockage, and shelter rotation, results for one target could vary between cameras or show different accelerations.



(a) (b)

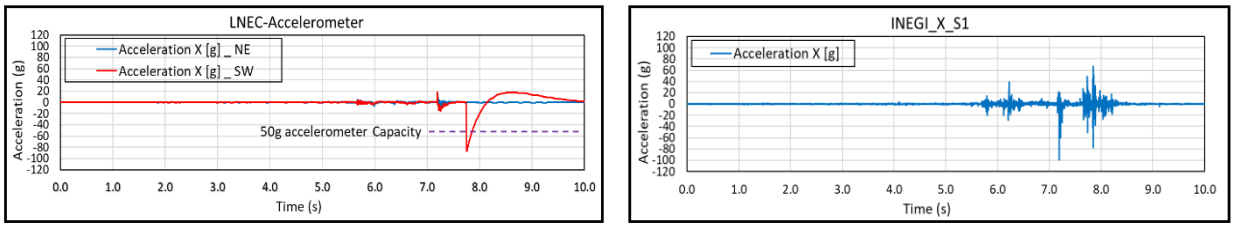
Figure 9. X (a) and Y (b) –axes accelerations of target N4 using INEG cameras at different heights.

In addition, the tracker software could mistake objects passing behind obstacles for impacts, and a fictitious peak could appear in one diagram. Nevertheless, it can be detected by having no peak acceleration emerging in other overlapping diagrams. Between 6.0 seconds and 7.8 seconds, the shelter rotated a few times, and the wall finally impacted it (Figure 8 No.4 to No.8). During the wall impact, the maximum acceleration of shelter (N1(X)-bottom camera) along the X-axis was equal to 80g at around 7.8 seconds. Shelter using target N3 along X direction using the Top and Middle camera

before the wall impact at around 6.7 seconds experienced accelerations equal to 40g. Along the Y direction, one high-impact acceleration of the shelter equal to -80g was detected using N4 in the footage of the INEGI middle camera when the shelter hit the steel structure beam at around 6.8 seconds. Another maximum acceleration related to the final impact of the shelter with the building debris at around 7.5 seconds was around 48g based on the target N1 along Y and using both the middle and bottom camera footage. The achieved shelter acceleration using different targets and camera footage might sometimes differ.

4.2.4 The LNEC and INEGI accelerometers results during the second part of the fall

Due to the shelter rotation, the X and Y-axes of the accelerometers were reoriented compared to the globally considered axis. Concerning the LNEC accelerometer readings on the X-axis on the shelter baseplate, this specific acceleration component displayed minimal variation until the collapse of the eastern wall with the shelter at around 7.8s (Figure 10 (a)). The SW sensor reached approximately -87.2g, surpassing the ±50g accelerometer capacity (the NE sensor (X) cable was torn during the fall).



(a) (b)

Figure 10. The accelerations along X, LNEC (a), the INEGI sensor 1 on the southern side (b).

As seen in Figure 10 (b), the acceleration variations of the INEGI accelerometers were higher than the LNEC ones between the fall onset and the wall collapse. Some factors contribute to that. For example, the accelerometers installed on the columns had higher lateral vibrations; in addition, the accelerometers were exposed to direct debris impact. Before the wall impact, all accelerations along the X-axis of accelerometers (along the shelter width) were within a maximum of ±40g. Still, the S1 sensor became once saturated, which can be related to the impact of air-born pieces. For the crash between the shelter and wall (7.8 seconds), the maximum acceleration value on the upper part was around 60g. Also, the other two sensor accelerations reached 51.9g (S3-X) and 74.2g (N3-X). The Y-acceleration was measured by LNEC sensors on four corners of the shelter baseplate apart from the South-Eastern one, which was not working. Since during the fall, there was an impact between the shelter and the surrounding steel structure, and sensors became saturated, they could not detect the wall impact (around 7.8 seconds). Among INEGI accelerometers, the recorded acceleration of N1-Y, N2-Y, and N4-Y did not exceed 30g during 2.5m of fall (between 5.5 seconds and 7.8 seconds) until the onset of wall impact; they reached around 60g. This condition was almost identical for N3-Y, but during the shelter-to-steel structure clash, this sensor was directly impacted by the bracing element. Because of this collision, a 60g shock was recorded (around 6.8 seconds). Apart from INEGI-S1 and INEGI-S3 along the Z axis, the other accelerometer recordings were lower than 30g before the wall impact and during this collision at around 7.8 seconds were as follows: N1-Z=64.6g, N2-Z=66.4g and S4-Z=Saturated. The acceleration of S1-Z was higher than S2-Z during the fall, but both were saturated a few times during this part of the collapse. Since both sensors were placed on the same column of the shelter southern side, and this column was in direct contact with the floor debris, the high accelerations recorded by these sensors can likely be attributed to this interaction. As mentioned, the shelter became horizontal between 6 and 7 seconds, moving downward with the below floors. During this time (2m between No.3 and No.6 in Figure 8), the average acceleration of the shelter measured by LNEC accelerometers was equal to almost 0.2g. The difference in average acceleration fall values

from test results and real observations (0.5g considered during the design stage) may be due to the larger wall cross-section area to plan surface area ratio in the test model compared to the real scenario. Another reason was related to the type of slab failure and their mass in the test, which slowed the collapse pace. As previously indicated, the distorted scale model hinders the establishment of any meaningful correlation between the test results and the real collapse scenario.

5 CONCLUSION

This paper presented the shaking table test of a masonry building provided with the developed shelter solution, which aims at protecting building occupants in case of building collapse caused by an earthquake.

The test procedures, sensors used and results obtained were presented, and the complexity of obtaining and analysing the results of a collapse test with very high shock accelerations was highlighted.

The experimental approach presented has allowed identifying some problems with the shelter solution that could arise in a real building collapse scenario and considering adequate solutions to overcome them.

The main aspect made evident in the test, which was not anticipated with the numerical modelling, was the rotation of the shelter due to possible loss of floor support, caused by the horizontal displacements of the walls. This type of scenario may be avoided by properly reinforcing the connection between the timber floors and the masonry walls.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by CCDRLVT—Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, Programa Operacional Regional de Lisboa 2014/2020—Lisboa 2020, and ANI—Agência Nacional de Inovação, project ref. LISBOA-01-0247-FEDER-032854 entitled “SHELTER–Structural Hyper-resisting Element for Life Threatening Earthquake Risk”. The authors are also grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/04625/2020 from the research unit CERIS and PTDC/ECI-EGC/30567/2017.

REFERENCES

Gomes Ferreira, João, Rita Moura, Luís Guerreiro, and João Guerreiro. 2021. "SHELTER – Structural Hyper-resisting Element for Life Threatening Earthquake Risk. An innovative approach for seismic protection." Engineering Structures Volume 235. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112012.

Guerreiro, João, João Gomes Ferreira, Luís Guerreiro, Rita Moura, and Seyedsajjad Hosseini. 2022a. "The design of a structural Hyper-resisting element for Life Threatening Earthquake risk (SHELTER) for building collapse scenarios: The life-saving capsule." Engineering Structures Volume 258. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114151.

Guerreiro, João, Luís Guerreiro, Seyedsajjad Hosseini, Rita Moura, and João G. Ferreira. 2022b. "The Design of a Structural Hyper-Resisting Element for Life-Threatening Earthquake Risk (SHELTER) for Building Collapse Scenarios: The Safety Chairs." Applied Sciences 12 (9). DOI:https://doi.org/10.3390/app12094103.

Hosseini, Seyedsajjad, João Guerreiro, Luís Guerreiro, Rita Moura, and João Gomes Ferreira. 2022. "SHELTER – Structural Hyper-resisting element for life Threatening Earthquake Risk. Static tests on the shelter structure." Journal of Building Engineering Volume 47. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103824.

Shujin Li, Cai Wu, and Fan Kong. 2019. "Shaking Table Model Test and Seismic Performance Analysis of a High-Rise RC Shear Wall Structure." Shock and Vibration 2019: 6189873. doi:https://doi.org/10.1155/2019/6189873.

Paolo Martinelli, Filip C. Filippou. 2009. "Simulation of the shaking table test of a seven-story shear wall building." Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics 38: 587–607. doi:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.897.

Saranik, Mohammad, David Lenoir, and Louis Jézéquel. 2012. "Shaking table test and numerical damage behaviour analysis of a steel portal frame with bolted connections." Computers & structures (Elsevier) 112: 327-341.

Chen, Guoxing and Wang, Zhihua and Zuo, Xi and Du, Xiuli and Gao, Hongmei. 2013. "Shaking table test on the seismic failure characteristics of a subway station structure on liquefiable ground." Earthquake Engineering & Structural Dynamics 42: 1489-1507. doi:https://doi.org/10.1002/eqe.2283.

Lin, Yu-liang and Leng, Wu-ming and Yang, Guo-lin and Li, Liang and Yang, Jun-Sheng. 2014. "Seismic response of embankment slopes with different reinforcing measures in shaking table tests." Natural Hazards 76: 791-810. doi:10.1007/s11069-014-1517-5.

Hosseini, S., Guerreiro, J., Ferreira, J.G., Guerreiro, L., Moura, R. 2023. "Wireless Sensors for Measuring Main Kinematic Parameters in Dynamic Tests Involving Intense Impacts." In Testing and Experimentation in Civil Engineering. Springer Nature. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-29191-3_40.

EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.

Tema 8. Casos de estudo

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

ESCAVAÇÃO, CONTENÇÃO PERIFÉRICA E FUNDAÇÕES DE UM EDIFÍCIO EM ALCÂNTARA – LISBOA

Rui Tomásio[a]; Alexandre Pinto[b]

[a] JETSJ - Geotecnia, Rua Julieta Ferrão 12 – Esc.1501, 1600-131 Lisboa, Portugal, rtomasio@jetsj.com

[b] JETSJ - Geotecnia, Rua Julieta Ferrão 12 – Esc.1501, 1600-131 Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.com

RESUMO

No presente artigo são apresentadas as soluções adotadas para os trabalhos de escavação, contenção periférica e fundações necessários para construção de 4 pisos enterrados de dois edifícios de serviços a construir no Loteamento Alcântara Poente, adjacente à Avenida da Índia, em Lisboa. Descrevem-se os principais condicionamentos existentes, nomeadamente: arqueológicos, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e de vizinhança, os quais determinaram a escolha da solução de contenção de terras e respetivo travamento, materializada por paredes moldadas travadas horizontalmente através de ancoragens provisórias e bandas de laje. São ainda descritas as soluções adotadas para as fundações, nomeadamente a utilização de estacas moldadas de elevada capacidade de carga, devido à injeção posterior e sistemática da sua base. Além de particular enfâse aos aspetos arqueológicos, que condicionaram fortemente a solução de travamento, são analisadas como as opções geotécnicas impactaram positiva ou negativamente os objetivos de sustentabilidade definidos pelo cliente. Por fim, apresentam-se os principais resultados da instrumentação implementada durante a realização dos trabalhos e deixam-se algumas reflexões sobre os motivos para algumas divergências registadas face ao estimado na fase de projeto.

Palavras-chave: Estacas, parede moldada, escavação, top-down, ancoragens auto-perfurantes

1 INTRODUÇÃO

As soluções de Fundação, de Escavação e de Contenção Periférica desenvolvidas para a construção dos 4 pisos enterrados do Projeto Alcântara Riverside, localizado na Avenida da Índia, em Alcântara, Lisboa, foram definidas de forma a possibilitar a sua construção em condições de segurança e garantido a minimização do impacto nos condicionantes existentes na envolvente (Figura 1).

Face à localização da obra, existia um conjunto de condicionamentos naturais e antropogénicos extremamente relevantes, que condicionaram fortemente a concessão da obra, nomeadamente: a proximidade ao Rio Tejo, que determinou a existência de nível freático elevado; a existência de aluviões arenosas muito permeáveis que, juntamente com o nível freático alto, recomendavam que prudentemente não se utilizassem ancoragens abaixo do nível de água; e a existência de importantes achados arqueológicos disseminados por grande parte da área de intervenção, que necessitavam de ser preservados e/ou registados antes de sofrerem qualquer afetação resultante da obra.

Figura 1 - Identificação do local da obra e vista dos trabalhos de escavação arqueológica

De forma a atender ao conjunto de condicionamentos existentes foi definida uma solução de contenção em parede moldada, ancorada ao nível da viga de coroamento e travada ao nível dos pisos -1 e -3 através de troços de laje e escoras metálicas. No alçado Sul, face à necessidade de preservação de um muro cais existente, não foi possível executar as ancoragens do nível da viga de coroamento, tendo-se optado pela instalação de tirantes horizontais, que passavam por cima do muro cais e que ancoravam numa viga fundada em estacas onde, por sua vez, estavam instaladas as ancoragens inclinadas.

Por sua vez, a solução de fundações consistiu em estacas moldadas Ø1000mm e Ø1200mm, encastradas ao nível dos basaltos do Complexo Vulcânico de Lisboa e injetadas através dos tubos cross-hole, numa profundidade de 3.0m abaixo da base, de modo a maximizar a sua eficiência e, deste modo, minimizar o consumo de materiais.

Em fase de projeto foi ainda definida uma laje de ensoleiramento de grande espessura, que pretendia garantir a estanqueidade da solução e, como tal, dimensionada para resistir às elevadas subpressões. Contudo, após a finalização da escavação, verificou-se que o efeito de ensecadeira garantido pela parede moldada era muito significativo, determinando caudais afluentes muito reduzidos e, como tal, a solução de laje foi reformulada, passando para uma solução drenada com bombagem sistemática dos reduzidos caudais afluentes.

2 PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 CONDICIONAMENTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

A área em estudo é caracterizada pela existência de uma espessa sucessão de materiais sedimentares que assenta sobre as formações do Complexo Vulcânico de Lisboa, as quais formam o substrato rochoso da zona.

As formações mais antigas identificadas são as do cretácico, nomeadamente pela Formação de Caneças C^2_{Cn} e pela Formação de Bica C^2_{Bi}.

Do Albiano Superior a Cenomaniano Médio a formação de Caneças é caracterizada por calcários margosos amarelados e apinhoados, pouco fossilíferos, com níveis areno-quartzosos e mais dolomíticos para o topo. Verifica-se ainda que por vezes esta formação se apresenta predominantemente em calcários margosos amarelados e margas.

No limite superior geralmente é efetuado entre a Última camada de calcário margoso dolomítico e a primeira de calcário branco a bege, por vezes fendilhado pertencente á formação da Bica.

A formação da Bica é constituída por calcários compactos de cor branca, rosada a avermelhada, por vezes apresenta-se cristalino com ocorrência de nódulos de sílex, alterando com calcários apinhoados (nodulosos) e com calcários com componente margosa, a qual é observada, preferencialmente, no topo da unidade e que por vezes alternam com margas amarelas, rosadas e esbranquiçadas.

O limite superior da formação da Bica ocorre através de uma superfície de paleocarsificação com os tufos do suprajacente Complexo Vulcânicos de Lisboa - CVL.

O Complexo Vulcânico de Lisboa - β^1 é caracterizado por alternância entre unidades vulcânicas e unidades sedimentares, o que evidencia a existência de períodos de repouso, os quais permitiram que os processos de sedimentação retomassem, antes de um novo episódio vulcânico.

Os episódios de vulcanismo, identificados nesta zona, são caracterizados, para além de basaltos compactos, mais ou menos alterados, por rochas piroclastos - β^1_p, que são originários da atividade explosiva, constituídos essencialmente por cinzas e lapilli, não consolidados e sempre muito alterados. Verifica-se ainda a existência de brechas grosseiras de base de escoada e outros aglomerados vulcânicos, também, muito alterados.

A unidades mais recentes são datadas do Holocénico e caracterizadas com Aluviões e/ou aterros, que ocorrem principalmente ao longo das linhas de água.

Na Figura 2 apresenta-se, do lado esquerdo, um excerto da Carta Geológica de Portugal onde se identificam a generalidade das formações referidas, ao centro, 3 provetes de aluviões lodosas submetidos a ensaios triaxiais e, do lado direito, um conjunto de provetes de calcário e de basalto recolhidos no local e submetidos a ensaios de compressão simples.

Figura 2 – Aspetos geológicos

2.2 CONDICIONAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS

A zona de Lisboa encontra-se fortemente intervencionada pelo Homem, nomeadamente no que diz respeito à impermeabilização dos solos o que promoveu uma grande alteração relativamente aos recursos hídricos, pois houve alterações significativas nos escoamentos hídricos originais.

Na área em estudo verifica-se que superficialmente são possíveis de encontrar aquíferos do tipo poro, caracterizados pelas unidades recentes de aluviões. Em maior profundidade encontram-se as unidades com características rochosas as quais poderão exibir uma permeabilidade tipo poro, se o seu estado de alteração proporcionar um comportamento terroso ou do tipo fissural, quando a circulação de água é efetuada pelas suas descontinuidades. A sua capacidade de transmissividade dependerá da maior ou menor quantidade de materiais finos (impermeáveis), ou no que diz respeito aos maciços rochosos, de maior ou menor abertura das descontinuidades e tipo de preenchimento, se existir.

Para avaliar o impacto desta intervenção no regime de escoamento subterrâneo, foi desenvolvido pelo LNEC (2018), de acordo como o previsto no PP Alcântara Poente, um estudo hidrogeológico global (Figura 3), tendo-se concluído sobre o reduzido impacto da construção.

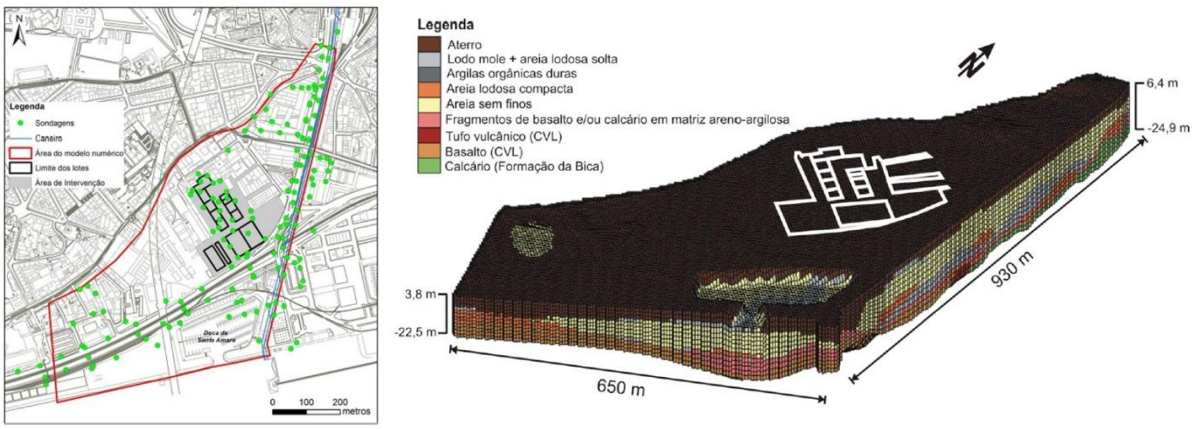


Figura 3 – Estudo Hidrogeológico LNEC – Pontos de Sondagens / Modelo Numérico

2.3 CONDICIONAMENTOS ARQUEOLÓGICOS

Os trabalhos de prospeção arqueológica desenvolvidos no recinto da intervenção, identificaram um conjunto de estruturas patrimonialmente relevantes até profundidades que se estimam ser da ordem dos 6,0m (Figura 4). Do conjunto de todas as estruturas identificadas, foi considerado que o muro cais

existente ao longo de todo o alçado sudeste deveria ser preservado *in situ,* sendo as restantes estruturas arqueológicas passíveis de conservação pelo registo, ou seja, passíveis de serem removidas.

Face ao exposto acima, para garantir a preservação *in situ* do muro cais do alçado sudeste, verificou-se ser necessária a redução da área de implantação dos pisos enterrados e a adaptação das soluções de contenção periférica e fundações inicialmente previstas para a zona em referência.

Figura 4 – Estruturas Arqueológicas Existentes

Neste enquadramento, a solução de contenção periférica permitiu a escavação arqueológica não condicionada até uma profundidade geral de 6,0m e a escavação adicional até 9,0m de profundidade na zona central do recinto de escavação, deixando uma banqueta de cerca de 3,0m junto à parede de contenção.

2.4 CONDICIONAMENTOS RELATIVOS A SERVIÇOS AFETADOS

Existiam diversas redes enterradas que foram alvo de análise e consideração durante o desenvolvimento do projeto, nomeadamente um coletor unitário de grande dimensão 1200mm, sob pressão, propriedade das Águas do Atlântico, que foi alvo de análises numéricas e inspeções vídeo dedicadas, e um coletor ovoide 800x1200.

3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Atendendo aos condicionamentos existentes, foram executadas as seguintes soluções para as fundações do edifício e para a estrutura de contenção periférica.

3.1 FUNDAÇÕES

A solução de fundações indiretas consistiu na execução de estacas moldadas, em betão armado, de modo a encaminhar as cargas, provenientes da superestrutura, para os terrenos competentes existentes em profundidade, de forma compatível com a boa funcionalidade do edifício, ou seja, sem a necessidade de mobilização de assentamentos que condicionem a referida funcionalidade.

Para a consecução do objetivo descrito, foram utilizadas estacas com diâmetros de 1000mm e de 1200mm, encastradas no mínimo 1,0m na formação caraterizada por basaltos muito fraturados referentes ao Complexo Vulcânico de Lisboa. Atendendo às condições geológicas do local e ao comprimento das estacas, a furação utilizou a "Vara Telescópica Kelly", entubamento provisório do topo das estacas e a estabilização provisória do restante furo com recurso a fluídos estabilizadores (lamas bentoníticas).

Todas as estacas do projeto dispunham de 4 tubos Ø75mm para posterior realização de ensaios de controlo de qualidade do tipo cross-hole, os quais foram também utilizados para a injeção da ponta das estacas, num comprimento mínimo de 3,0m, permitindo o tratamento do maciço rochoso aí localizado e, desde modo, viabilizando a mobilização de elevadas tensões resistentes de ponta das estacas, sem necessidade de assentamentos significativos (Figura 5).

As injeções foram realizadas com calda de cimento e executadas por patamares com pressões gradualmente superiores até que se verifique um consumo reduzido e estabilizado de calda de cimento.

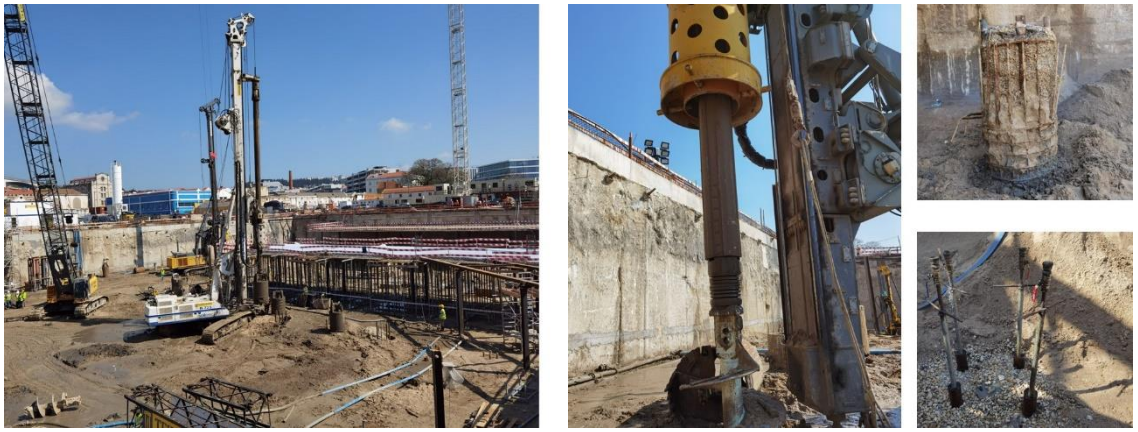


Figura 5 – Trabalhos de execução das estacas de fundação

Em complemento às estacas de fundação, face à cota elevada do nível freático e à natureza das formações aluvionares (arenosas numa espessura entre 20m e 30m), foi prevista uma laje de ensoleiramento de grande espessura, vigada e pré-esforçada, de modo a contrariar os impulsos hidrostáticos e transferi-los entre as zonas menos carregadas do edifício (embasamento) e as zonas de maior carga (núcleos das torres).

Neste contexto, as estacas de fundações foram dimensionadas para os dois cenários extremos: um em que o nível freático poderia atingir 1.20m acima da superfície do terreno (a longo prazo devido à subida do nível do mar); e outro em que o nível freático poderia não determinar a instalação de uma pressão significativa sob a laje de fundo (a curto prazo e dependente da permeabilidade do solo envolvido).

3.2 CONTENÇÃO PERIFÉRICA

Tendo em conta a necessidade de construção de 4 pisos enterrados, assim com o complexo e desfavorável cenário geológico-geotécnico e hidrogeológico, a escavação foi realizada ao abrigo de uma parede moldada com espessura mínima de 0,60m.

De forma a controlar/minimizar a afluência de água ao interior do recinto de escavação e a garantir a segurança da mesma em termos de estabilidade hidráulica e de estabilidade global, a ficha da parede moldada garantiu uma entrega mínima de 2,0m ao nível das formações aluvionares de natureza argilosa, a qual determinou que a parede moldada atingisse uma profundidade máxima de cerca de 32,0m. A eficácia desta solução veio-se a verificar durante a obra, uma vez que o caudal afluente ao recinto de escavação foi extremamente reduzido e permitiu eliminar a construção da laje de ensoleiramento inicialmente prevista.

Para o sistema de travamento provisório da parede de contenção, face aos impulsos horizontais, foram executadas ancoragens provisórias, ao nível da viga de coroamento, e bandas das lajes definitivas dos pisos -1 e -3.

As ancoragens auto-perfurantes, foram materializadas por perfis tubulares, do tipo ANP 52/26, seladas num comprimento de 7,0m. A execução deste travamento permitiu a realização da escavação integral em cerca de 6,0m de profundidade, sem a necessidade de execução das estacas de fundação e/ou das bandas de laje de travamento da parede moldada e, deste modo, assegurar o cumprimento do pressuposto de preservação e de registo do património arqueológico.

No caso particular do alçado Sul (imagem esquerda da Figura 6), face à necessidade de não atravessamento com as ancoragens de um muro cais existente, foi necessário optar pela instalação de tirantes horizontais, que passavam por cima do muro cais e que ancoravam numa viga fundada em estacas onde, por sua vez, estavam instaladas as ancoragens.

A pesar do equilíbrio de forças atuante na parede moldada ser garantido de forma muito semelhante, uma vez que se mantém o travamento conferido pela componente horizontal das ancoragens e apenas se transfere a componente vertical das mesmas para as estacas que suportam a viga de betão armado, verificou-se que o desempenho (deformações) da parede de contenção neste alçado foi mais gravoso que no restantes alçados.

Figura 6 – Trabalhos de escavação e de execução do travamento das paredes de contenção

No que se refere às bandas de laje, a conceção geral destes travamentos teve em conta não só a resistência e rigidez necessárias para garantir as condições de segurança, mas também o processo construtivo associado, quer à fase de escavação, quer à fase de execução da estrutura dos pisos enterrados. Neste sentido, a geometria dos troços de laje foi definida de modo a interferir o mínimo possível com a execução dos núcleos e outros elementos verticais da estrutura dos pisos enterrados.

Os troços de laje apoiaram-se durante a fase de escavação, na parede de contenção e em perfis metálicos HEB200 selados 2,00m nas estacas de fundação dos próprios pilares.

Figura 7 – Trabalhos de escavação e de execução do travamento das paredes de contenção

4 MODELOS DE CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO

De forma a analisar comportamento das estruturas de contenção, no que se refere a esforços e deformações, foi utilizado o programa de elementos finitos PLAXIS 2D, particularmente vocacionado para o efeito, simulando todas as fases construtivas.

A análise desenvolvida consistiu no estudo de uma secção tipo, considerada como representativa e mais condicionante, com o objetivo de avaliar as deformações, estados de tensão e a estabilidade do maciço a conter. Através desta análise foram determinados os esforços nas paredes de contenção e a avaliação das cargas a que os travamentos da mesma estarão sujeitos, nomeadamente as bandas de laje.

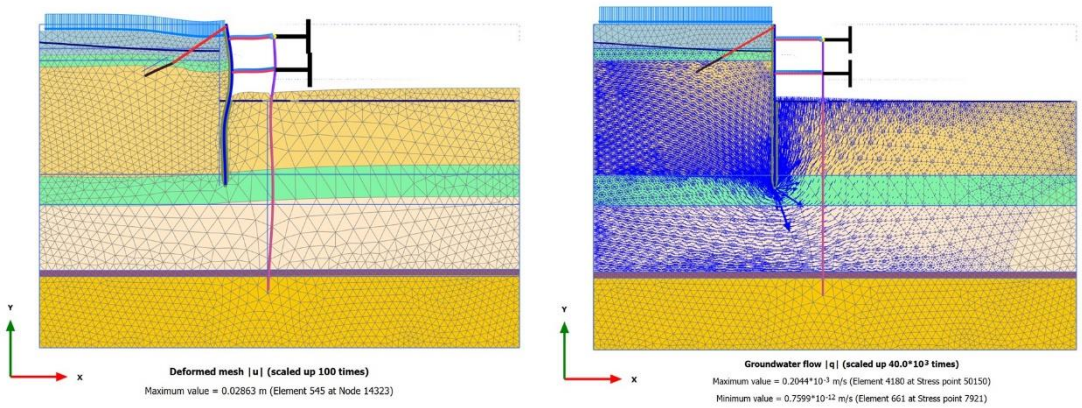


Figura 8 – Modelo de Cálculo Global – Plaxis 2D

Na modelação desenvolvida, simulou-se o comportamento do solo através do modelo constitutivo Hardening Soil. As paredes de contenção e os perfis metálicos foram modelados através de elementos do tipo viga “Plate”, com comportamento elástico, as ancoragens, com elementos do tipo mola, designadamente, “node-to-node anchor”, enquanto as bandas de laje foram moldadas através de elementos tipo mola “Fixed-end anchor”. No caso das estacas de apoio à contenção, foram modeladas através de elementos do tipo “Embedded Beam Row”.

Já as estruturas de travamento, nomeadamente as bandas de laje dos pisos -1 e -3 e os respetivos escoramentos metálicos, foram analisadas recorrendo ao programa de cálculo automático de estruturas designado SAP2000 (Figura 9). As ações atuantes sobre as bandas de laje foram as

determinadas no estudo da secção tipo, obtida no modelo desenvolvido no programa de elementos finitos PLAXIS 2D.

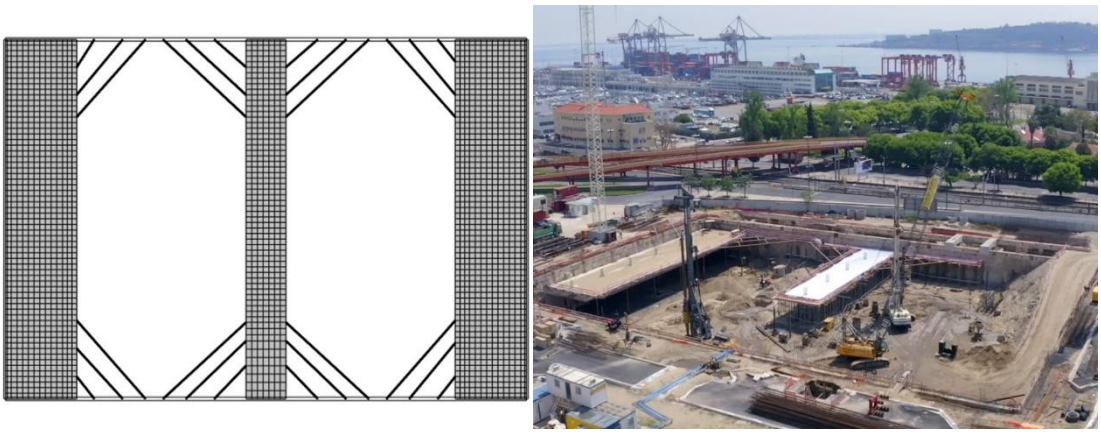


Figura 9 – Modelo de Cálculo e construção das Bandas de Laje

Conforme será discutido no capítulo dedicado a monitorização da obra, verificou-se que o modelo de cálculo das bandas de laje e dos travamentos metálicos não foi o mais adequado, conduzindo à sobretimação de deslocamentos nos alçados travados com bandas de laje e à sobestimação dos deslocamentos nos alçados travados do escoras metálicas.

5 INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

O Plano de Instrumentação e Observação implementado teve como objetivo garantir a realização, em condições de segurança e de economia, dos trabalhos relativos à escavação e contenção periférica dos pisos enterrados, assim como a análise do comportamento da envolvente durante a execução desta fase de obra, pelo que foi sendo adaptado em fase de obra, em função dos resultados obtidos em cada momento.

Os dispositivos instalados permitiram medir, com uma frequência semanal e, em alguns momentos, bissemanal, as seguintes grandezas:

- Deslocamentos horizontais e verticais da parede de contenção, com recurso a alvos topográficos;
- Deslocamentos horizontais no interior do maciço a conter, com recurso a inclinómetros;
- Inclinação da parede de contenção, com recurso a tiltmeters;
- Assentamentos a tardoz da contenção, com recurso a marcas de nivelamento;
- Nível de água no interior do maciço a conter, com recurso a piezómetros.

Durante a evolução da obra, verificou-se uma tendência generalizada para o registo de deslocamentos horizontais da parede superiores ao previstos em projeto, ainda que relativamente baixo tendo em consideração da profundidade de escavação, em particular determinadas pela elevada degradação das propriedades de deformabilidade das areias aluvionares localizadas ao nível da ficha, como é evidenciado pelo tipo de deformação registada pelos inclinómetros e apresentada na Figura 10. Refere-se ainda que, apesar dos inclinómetros estarem selados dentro dos painéis da parede, que apenas atingiram as formações aluvionares, verificou-se, por comparação com os alvos topográficos colocados na viga de coroamento, que a base dos inclinómetros não estaria a apresentar movimentos relevantes.

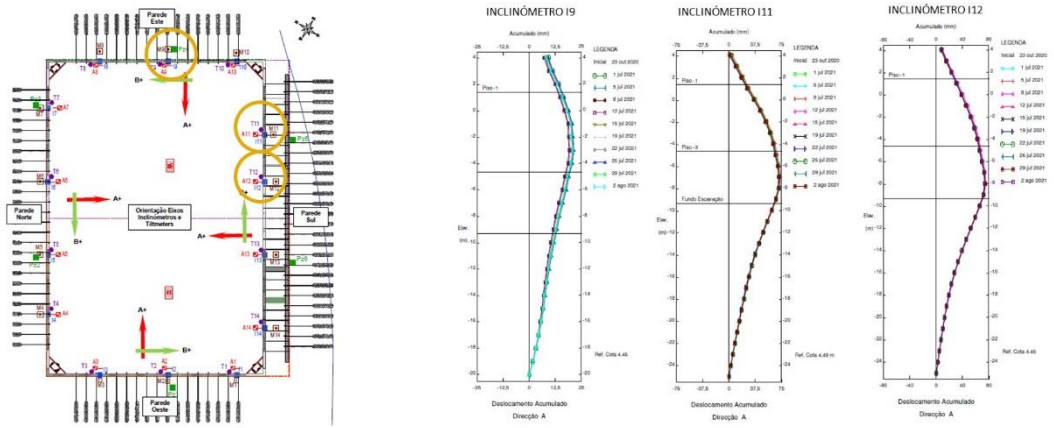


Figura 10 – Localização de Monitorização e Resultados dos Inclinómetros I9, I11 e I12

Adicionalmente, nos alçados travados com escoras metálicas, verificou-se ainda que as mesmas apresentavam uma rigidez bastante inferior ao estimado com base no modelo SAP2000, o que contribuiu para que nas zonas mais deformáveis se atingissem deformações horizontais máximas próximas de 80mm (como foi o caso dos inclinómetros I11 e I12).

Com a análise dos resultados da monitorização, foi possível concluir que a maior deformabilidade das escoras metálicas foi determinada, em grande medida, pela inadequada modelação do sistema de travamento. Na modelação das bandas de laje, uma vez que as mesmas apenas estavam ligadas à parede moldada por ferrolhos que não garantiam uma interação total, não foi considerada a rigidez proveniente do funcionamento em "T" da banda com a parede moldada. Esta assunção, apesar de ser conservadora para o dimensionamento da armadura banda de laje, conduziu a uma estimativa de deformações demasiado gravosa que, face à geometria do sistema de travamento, fazia com que anulasse/contrariasse parte das deformações das escoaras metálicas. Como na realidade as zonas de travamento com bandas de laje mostraram-se muito pouco deformáveis (exemplo do inclinómetro I9), as escoras metálicas não sofreram essa deformação inicial e, como tal, mostraram-se muito deformáveis no controlo da parede de contenção nos alçados Sul e Norte. Refere-se ainda que no caso do alçado Sul, devido à presença do muro cais, à utilização de tirantes e à escavação realizada no tardoz da mesma, foi possível ocorrer, durante a escavação dos pisos inferiores, uma translação do topo da parede para o lado do terreno e, como tal, potenciar ainda mais a tendência de deformação do meio vão da parede.

6 IMPREVISTOS E ADAPTAÇÕES EM FASE DE OBRA

Conforme já referido, a ocorrência de deformações mais elevados do que o expetável nos alçados Sul e Norte, determinaram a implementação de medidas corretivas, nomeadamente o encamisamento as escoras metálicas com betão armado, de forma a aumentar a sua rigidez e, deste modo, minimizar a taxa de crescimento das deformações que vinha a ser registada.

Também no decorrer da obra, nomeadamente durante a execução dos ensaios de integridade tipo crosshole, previstos para todas as estacas de fundação, com vista à verificação da sua integridade, detetaram-se a existência de algumas anomalias, nomeadamente faltas de recobrimento, alargamentos da secção, segregação do betão e intercalação de bolsas de solo (Figura 11). Em algumas situações, onde as patologias eram mais gravosas para o desempenho futuro das estacas, pela sua natureza ou pela combinação com as solicitações a que as estacas iriam estar sujeitas, foi necessário implementar medidas de reforço. Nas situações mais exigentes, nomeadamente num alinhamento

estrutural onde apenas existia uma estaca sob cada pilar, foi necessário recorrer ao reforço da capacidade de carga através da execução adicional de microestacas autoperfurantes de grande capacidade do tipo ANP H3200-108, com bit de furação de Ø200mm, seladas nas formações basálticas do CVL.

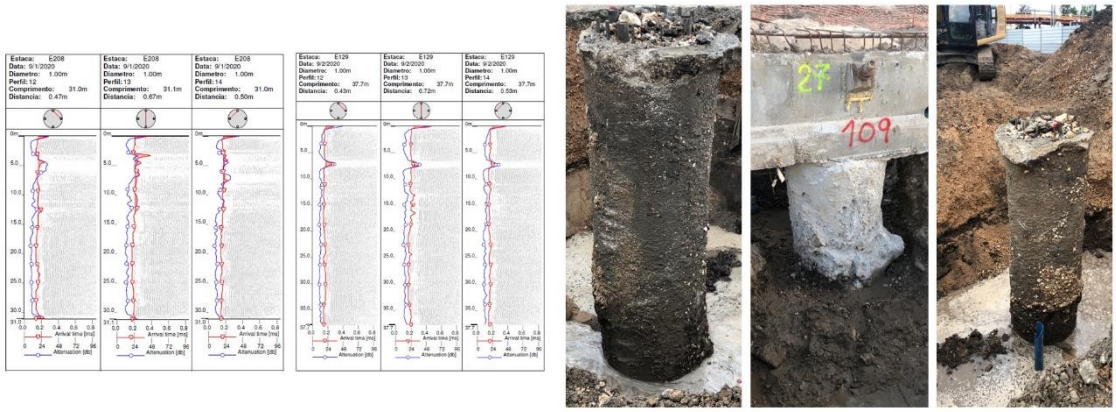


Figura 11 – Resultados ensaios crosshole e exemplos de patologias detetadas

A principal alteração decidida em fase de obra foi a eliminação da laje de fundo. Apenas no decorrer dos trabalhos de escavação e através da quantificação dos caudais bombeados diariamente, foi possível confirmar que a afluência de água ao recinto da escavação era extremamente reduzida quando comparada com as estimativas da fase de projeto (condicionadas pelos diversos ensaios de permeabilidade realizados durantes as campanhas de prospeção). Contudo já existia, com base em experiências prévias, a expectativa que os caudais pudessem ser bastante reduzidos (Pita, 2012). Esta divergência, face aos pressupostos de projeto, está relacionada com o fato das paredes moldadas da contenção periférica terem intersetado, em todo o seu perímetro, uma camada de aluvião argiloso de muito baixa permeabilidade, que se tinha mostrado de difícil caracterização prévia, em particular no que se referia à sua distribuição espacial.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Face à localização, geologia, hidrogeologia, envolvente, arqueologia e dimensão da obra apresentada ao longo desta comunicação, considera-se que a concessão das soluções propostas e executadas em obra foi extremamente adequada e versátil, mostrando grande capacidade de adaptação aos resultados da monitorização, sem comprometer o planeamento da obra e garantindo a utilização dos recursos estritamente necessários à construção em segurança.

De modo a assegurar a fiabilidade dos resultados da monitorização e garantir uma construção sustentável, é fundamental a utilização de dispositivos distintos, que permitam maximizar a redundância do sistema. No presente caso, a utilização de alvos topográficos junto ao topo dos inclinómetros permitiu despistar a ocorrência de movimentos da base dos mesmos. Contudo, considera-se que em obras neste tipo de cenários geológico-geotécnicos, é preferível o prolongamento dos inclinómetros até ao substrato rochoso e, desse modo, permitir maior robustez dos resultados obtidos.

Considera-se ainda importante referir que evitar a execução de ancoragens, neste tipo de cenários hidrogeológicos, em que o nível freático está muito elevado e em que as formações ocorrentes são muito permeáveis, conduz a uma redução muito significativa da incerteza e, consequentemente, do risco da intervenção.

Por fim, no que se refere à supressão da laje de fundo que foi conseguida, importa referir que é uma situação que não deve ser generalizada e que carece de uma avaliação criteriosa na fase de obra, uma vez que além de poder afetar o regime de escoamento subterrâneo existente, transfere encargos relevantes para a fase de exploração do edifício e, como tal, como conduzir a soluções menos sustentáveis quando analisada para todo o seu clico de vida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dono de Obra a autorização para a redação e publicação do presente artigo. Consideram ainda importante sublinhar que as soluções implementadas resultaram de um trabalho de equipa, no âmbito do qual se destaca o papel importante das empresas: Rockbuilding – Soluções Imobiliárias SA, gestor de projeto e fiscalização, Consórcio Alves Ribeiro / HCI, empreiteiro geral, e Teixeira Duarte, subempreiteiro de geotecnia.

REFERÊNCIAS

Pita, X.; Pinto, A.; Borges, R. (2012). Soluções de Contenção Periférica e de Fundações da Estação Elevatória das Agências em Lisboa. 13º Congresso Nacional de Geotecnia, Portugal, abril 2012, pp. 33–34. ISBN 978-972-98781-8-3.

LNEC (2018). Estudo Hidrogeológico Referente ao Projeto Escritórios Alcântara. Avaliação dos Potenciais Impactes.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

DOSAGEM DE ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D: PARÂMETROS REOLÓGICOS E RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Vinícius Capistrano de Paiva Veras[a]; Lucas Ramiro Burgos[b]; Antônio Eduardo Bezerra Cabral[c]; Alexandre Araújo Bertini[d]

[a] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, viniciuscapistrano@alu.ufc.br

[b] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, lucasburgos@ing.unsa.edu.ar

[c] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, eduardo.cabral@ufc.br

[d] Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, Fortaleza, Brasil, bertini@ufc.br

RESUMO

O crescente interesse na construção aditiva utilizando o método 3DCP se espalhou por diversas cidades ao redor do mundo. Por esta razão, a compatibilidade dos materiais locais com estas novas tecnologias devem ser analisadas. Inicialmente, para este trabalho optou-se pelo estudo da dosagem da argamassa de impressão utilizando cimento, areia, água e aditivos químicos (superplastificantes e modificador de viscosidade), os quais foram caracterizadas suas propriedades físicas e granulométricas. Foram testadas 5 (cinco) dosagens compostas por esses materiais onde as proporções água/materiais secos (A/Ms) e as proporções de aditivos foram mantidas constantes, enquanto a proporção entre cimento e areia variou (1:1; 1:1,5; 1:2,0; 1:2,5; 1:3,0) e uma sexta mistura (1:1,7) em que a relação A/Ms foi modificada. Testes de fluidez e *squeeze flow* foram realizados para obter características reológicas. Posteriormente, a flexão e a compressão de corpos de prova foram testadas com idades de 7 e 28 dias para compreensão do comportamento mecânico. Estes resultados foram comparados com as recomendações existentes e depois ajustados ao processo de impressão, que é influenciado principalmente pela capacidade de extrusão, construtibilidade e ligação entre camadas. Os resultados obtidos apontaram que os melhores resultados de resistência mecânica foram encontrados na mistura 1:1,7, com a relação A/Ms modificada, satisfazendo os requisitos de impressão.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassa, 3DCP, Reologia, Resistências mecânicas

1 INTRODUÇÃO

Na indústria da construção, a impressão 3D em concreto (3DCP) é uma das tendências mais inovadoras dos últimos anos. Esta nova metodologia de trabalho elimina a necessidade de fôrmas existentes e reduz a mão-de-obra, resultando na significativa economia de tempo e custos. A maioria dos procedimentos 3DCP utiliza bocais que podem ser montados em um pórtico ou braço robótico para depositar com precisão a mistura durante todo o processo de construção (BUSWELL et al., 2018). É importante ressaltar que as argamassas injetadas não podem mudar de forma simultaneamente sem múltiplos moldes e as camadas depositadas estão devidamente ligadas (WANGLER et al., 2019). O sucesso de um processo de impressão 3D de concreto depende, portanto, de sua capacidade de extrudar adequadamente a mistura do bico (conhecida como extrudabilidade) e de sua capacidade de permanecer rígido o suficiente para suportar o peso das camadas subsequentes (chamada construtibilidade) e, por fim, a resistência mecânica conforme projeto. Os projetos de misturas de argamassas que atendam aos requisitos reológicos de extrudabilidade e trabalhabilidade são essenciais para uma impressão 3D confiável e para o uso generalizado desta tecnologia no setor de construção (BUSWELL et al., 2018).

O 3DCP impõe restrições reológicas mais rigorosas na sequência do processo (bombeamento, extrusão e aplicação de camadas subsequentes) do que os métodos convencionais de construção em concreto (PERROT; AMZIANE, 2019). Para garantir que a mistura de cimento seja fluida e consistente durante todo o processo de moldagem e, ao mesmo tempo, tenha resistência suficiente para manter uma camada contínua nas etapas iniciais, é importante testar as propriedades reológicas do material antes do uso (PERROT; RANGEARD; PIERRE, 2016). Os requisitos reológicos não podem ser generalizados, pois devem atender aos requisitos específicos da impressora para manter boa extrudabilidade e construtibilidade. A facilidade desta funcionalidade no concreto impresso em 3D é frequentemente influenciada pela fluidez e propriedades do cimento. Portanto, para caracterizar com precisão a extrudabilidade e a composição do processo 3DCP, é importante considerar ambos os fatores. Cabe esclarecer que, neste estudo, os termos “concreto” e “argamassa” são caracterizados como sinônimos por se referirem ao mesmo produto: um concreto sem agregado graúdo.

O teste de *Squeeze-Flow* é frequentemente usado na prática como uma técnica simples para analisar as propriedades de fluxo de suspensões altamente concentradas, como concreto. A maioria desses materiais se comporta como fluidos altamente viscosos ou quase plásticos. Mesmo que o conceito de valor de o escoamento plástico seja uma aproximação discutida do comportamento real desses fluidos, ele continua sendo uma maneira útil de prever o fluxo e a resposta do teste reológico (ROUSSEL; LANOS, 2003).

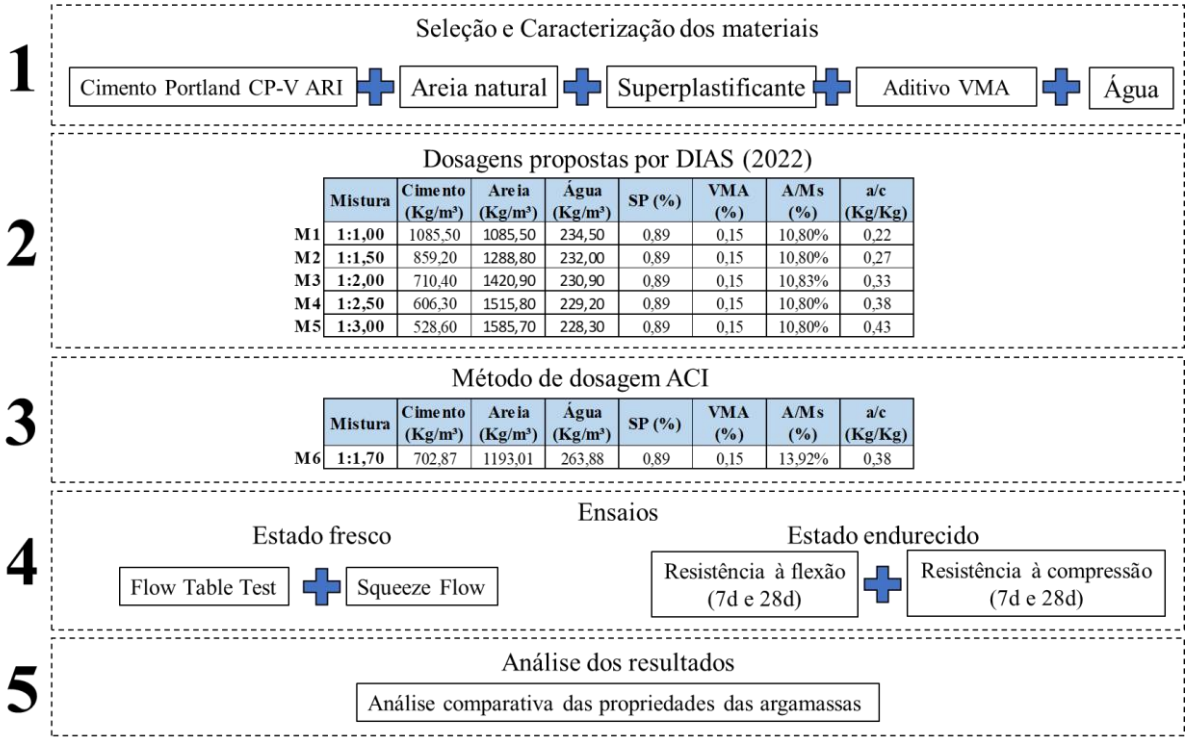
Uma crítica ao uso do método 3DCP na construção é o alto uso de cimento Portland, que é conhecido por ter um impacto significativo no meio ambiente (MOHAN et al., 2021a). Aditivos como redutores de água de alta qualidade e outros aditivos também são usados para obter a reologia desejada ou melhorar o desempenho de trabalho das misturas 3DCP. Nesse caso específico, foram usados um superplastificante (SP) e um modificador de viscosidade (VMA).

Os superplastificantes (SP) são frequentemente usados em misturas de 3DCP para melhorar a fluidez e reduzir a quantidade de água necessária. A maioria das misturas 3DCP não contém agregados grossos, o que pode aumentar a fração de empacotamento do material e melhorar seu limite elástico aparente para fluir, ou a quantidade de força necessária para fazê-lo fluir. No entanto, os SPs agem reduzindo a tensão superficial da água na mistura e permitindo que as partículas fluam mais facilmente, o que pode diminuir o limite elástico aparente e neutralizar parcialmente o efeito do aumento da fração de empacotamento (LE et al., 2012).

O sucesso da impressão de concreto 3D depende muito da seleção do material e do projeto da mistura para garantir a extrudabilidade e a capacidade de construção (ŞAHIN; MARDANI-AGHABAGLOU, 2022). Essas características são cruciais para determinar a capacidade da mistura de fluir pelo bico de impressão, manter sua forma após a extrusão e ter o que é necessário para suportar as camadas subsequentes durante o processo de impressão. Nesse caso, o projeto de misturas para impressão de concreto 3D limita-se à seleção de algumas matérias-primas e à otimização de suas proporções usando métodos de tentativa e erro. O objetivo deste trabalho é obter uma dosagem utilizando materiais da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) que tenha a capacidade reológica de ser impressa para a futura fabricação de habitações sociais no Estado do Ceará.

METODOLOGIA

A etapa metodológica foi desenvolvida em cinco etapas: 1) seleção e caracterização dos materiais utilizados; 2) reprodução das cinco dosagens elaboradas por DIAS (2022) com os materiais locais selecionados para analisar a faixa de proporção de cimento e areia mais trabalhável entre as misturas; 3) dosagem da sexta mistura através do método ACI (American Concrete Institute); 4) realização dos ensaios experimentais nos estados fresco e endurecido. No estado fresco, o índice de consistência foi determinado usando o *Flow Table Test* e o *Squeeze-Flow*, e no estado endurecido, o desempenho mecânico das argamassas de impressão 3D foi analisado através dos ensaios de resistência à flexão e compressão; e 5) análise dos resultados. O resumo da metodologia deste trabalho é mostrado na Figura 1.



	Mistura	Cimento (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Água (Kg/m³)	SP (%)	VMA (%)	A/Ms (%)	a/c (Kg/Kg)
M1	1:1,00	1085,50	1085,50	234,50	0,89	0,15	10,80%	0,22
M2	1:1,50	859,20	1288,80	232,00	0,89	0,15	10,80%	0,27
M3	1:2,00	710,40	1420,90	230,90	0,89	0,15	10,83%	0,33
M4	1:2,50	606,30	1515,80	229,20	0,89	0,15	10,80%	0,38
M5	1:3,00	528,60	1585,70	228,30	0,89	0,15	10,80%	0,43

	Mistura	Cimento (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Água (Kg/m³)	SP (%)	VMA (%)	A/Ms (%)	a/c (Kg/Kg)
M6	1:1,70	702,87	1193,01	263,88	0,89	0,15	13,92%	0,38

Figura 1 – Etapas metodológicas

MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho, provenientes da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), foram consistidos em: 1) cimento Portland (CP) CP-V de alta resistência inicial, produzido e vendido na

região; areia natural (AREIA) como agregado; como aditivos, foram utilizados o superplastificante (SP) MC Powerflow 3700 e o modificador de viscosisade antisegregante (VMA) Centrament VMA MC. Os materiais locais foram utilizados na produção de todas as misturas.

Após a seleção dos materiais, os mesmos foram caracterizados de acordo com os ensaios e normas descritas no Quadro 1. A análise da curva granulométrica do agregado, mostrada na Figura 2, revela que o diâmetro máximo é igual a 0,60 mm. É possível observar que a maior parte do material está na faixa entre 0,10 e 0,30 mm, o que revela que o material é bastante fino. De acordo com a granulometria, o módulo de finura (MF) do material é de 1,54. Além disso, o D10, D50 e D90 são iguais a, respectivamente, 0,17 mm, 0,35 mm e 0,55 mm.

Quadro 1 – Caracterização dos materiais da RMF

Materiais	Ensaios de caracterização	Norma	Resultado
Cimento Portland CP-V-ARI	Diâmetro médio da partícula (µm)	ISO 13320 (2020)	18,84
	Massa específica (g/cm³)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,16
Areia natural	Massa específica (g/cm³)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,56
	Absorção de água por imersão (%)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	1,01
Areia natural	Massa unitária (Kg/m³)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1475,00
	Índice de vazios (%)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	40,82
	Teor de finos (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021)	2,20

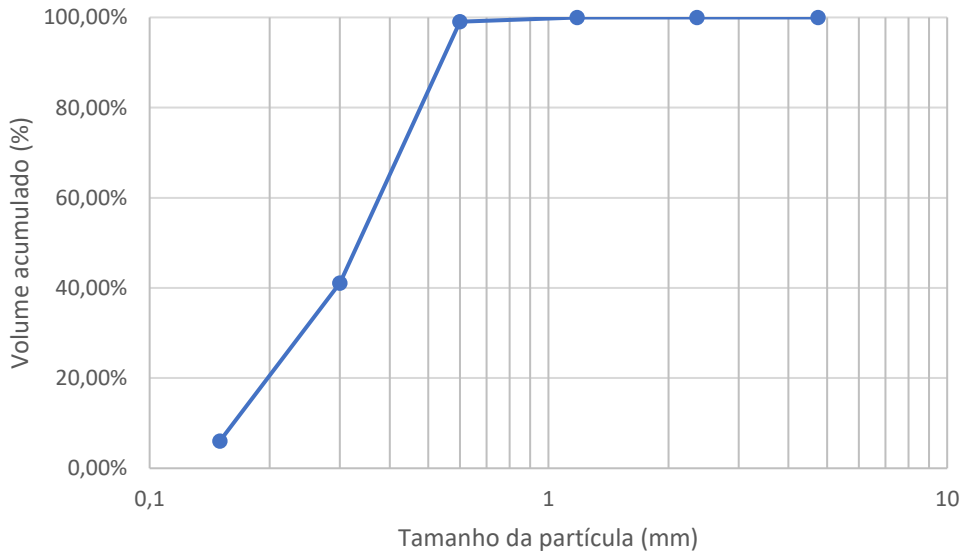


Figura 2 – Distribuição do tamanho das partículas da areia natural

MÉTODO DE DOSAGEM

É importante ressaltar que as dosagens M1 a M5 foram executadas com base no estudo de DIAS (2022), com a finalidade de testar a reprodutibilidade das mesmas utilizando os materiais locais e, dessa forma, analisar os resultados de acordo com a proporção entre areia/cimento e água/materiais secos. Com base nisso, na tentativa de obter uma dosagem com capacidade de impressão 3D, para a

sexta mistura (M6) foi usado o método seguindo os procedimentos do American Concrete Institute (ACI), pois não foram utilizados agregados graúdos na produção das dosagens apresentadas. Todas as quantidades são determinadas por massa.

Inicialmente, o tamanho máximo da partícula de areia é usado para determinar a quantidade de água e a porcentagem do conteúdo de ar natural. Uma porcentagem da quantidade de água é reduzida de acordo com a recomendação do fabricante do aditivo superplastificante (SP).

Em seguida, a relação água/cimento é determinada com a ajuda do gráfico da lei de Abrams das resistências desejadas. A quantidade de água e a proporção mencionada acima são usadas para determinar a quantidade de cimento.

Por fim, é determinada a quantidade de areia necessária, juntamente com água, ar natural e cimento, para completar um volume teórico total de um (1) metro cúbico. Isso é feito usando as densidades de cada material. As quantidades de aditivos químicos são determinadas como uma porcentagem da massa de cimento.

Busca-se um valor mais alto, pois quando o concreto é impregnado, os valores de resistência são ligeiramente perdidos (KAUSHIK et al., 2023). As diferentes dosagens testadas foram mostradas no Quadro 2 a seguir:

Quadro 2 – Dosagens experimentais

ID	Mistura	Cimento (kg/m3)	Areia (kg/m3)	Água (kg/m3)	Sp (%)	VMA (%)	A/Ms (%)	a/c (kg/kg)
M1	1:1,00	1085,50	1085,50	234,50	0,89	0,15	10,80	0,22
M2	1:1,50	859,20	1288,80	232,00	0,89	0,15	10,80	0,27
M3	1:2,00	710,40	1420,90	230,90	0,89	0,15	10,83	0,33
M4	1:2,50	606,30	1515,80	229,20	0,89	0,15	10,80	0,38
M5	1:3,00	528,60	1585,70	228,30	0,89	0,15	10,80	0,43
M6	1:1,70	702,87	1193,01	263,88	0,89	0,15	13,92	0,38

ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Flow table test

O ensaio foi realizado com o objetivo de verificar a capacidade de construção das misturas através do espalhamento obtido no aparato *Flow table*, seguindo os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016), para a determinação do índice de consistência das argamassas.

O procedimento de execução do ensaio, de acordo com a norma, é: 1) enchimento do molde troncônico logo após a preparação da argamassa. Para isso, são colocadas três camadas sucessivas e aplica-se em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente; 2) acionamento da mesa de consistência com 30 golpes no período de 30 s, permitindo o livre espalhamento da mistura sobre a mes; e 3) medição do índice de consistência através do diâmetro médio da argamassa espalhada de três direções perpendiculares.

Com base na literatura, foi constatado por RAHUL; SANATHAM (2020) que os espalhamentos de 4 grupos de argamassa impressa em 3D variaram de 18,3 a 18,7 cm. Por outro lado, LU et al., (2019) obtiveram variações de diâmetros de espalhamento de materiais cimentícios impressos em 3D de 15

a 25 cm. Além deles, TAY; QIAN; TAN, (2019), com o objetico de determinar a zona de printabilidade do concreto para impressão 3D, usaram o teste de mesa de fluxo e descobriram que os diâmetros de espalhamento de 16 grupos de concretos variaram de 11 a 21 cm. Por fim, RUBIO et al., (2017) produziram concretos impressos em 3D com diâmetros de espalhamento variando de 22 a 28 cm.

Por outro lado, com base no trabalho desenvolvido por DIAS (2022), obteve-se para as misturas M1 a M5 os seguintes espalhamentos, respectivamente: 0 cm; 23,25 cm; 22,10 cm; 24,50 cm; 16,60 cm. Em seu trabalho, o autor relatou que as misturas 1:1,00 e 1:3,00 não foram capazes de serem impressas quando se mantém as relações de água/materiais secos e teores de aditivos constantes, mesmo com espalhamentos nas faixas 16 cm e 21 cm, devido a baixa mobilidade do material.

Squeeze-Flow Test

O chamado *Squeeze-Flow* tornou-se um método promissor para avaliar o comportamento reológico de argamassas e outros materiais de construção. Este experimento pode avaliar materiais de todas as consistências, o que é muito interessante para a caracterização de argamassas. Isso porque as alterações na geometria, características do ensaio, se assemelham às condições de processamento desses materiais, por exemplo durante as etapas de aplicação, nivelamento e acabamento.

O ensaio consiste em comprimir uma amostra cilíndrica com diâmetro de 100 mm e altura de 10 mm entre duas placas paralelas. O teste pode ser realizado através de controle de força ou deslocamento. De acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010), o ensaio deve ser realizado em duas taxas de deslocamento de 0,1 mm/s e 3 mm/s para amostras diferentes. Para isso, deve ser cuidadosamente preparado, moldado e colocado em uma máquina de ensaio de compressão (Figura 3). O ensaio termina quando o deslocamento da placa superior atinge 9 mm ou carga máxima de 1 kN.

Figura 3 – Máquina usada no ensaio de *Squeeze-Flow*

ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

O desempenho mecânico das argamassas produzidas foi testado através dos ensaios de: 1) resistência à tração na flexão e 2) resistência à compressão, ambos de acordo com os procedimentos descritos na NBR 13279 (ABNT, 2005).

De acordo com a norma, para o primeiro ensaio, é necessário: 1) moldar 3 corpos-de-prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para a realização do ensaio para a idade de 7 e 28 dias. Para isso, utilizou-se uma fina camada de óleo nas faces internas dos moldes e adensou-se a argamassa em duas camadas aplicando 30 quedas por camada na mesa de espalhamento por 30 segundos; 2) desmoldar os corpos-

de-prova e curar nas idades determinadas; e 3) levar os corpos-de-prova à prensa. A Figura 4 mostra os corpos-de-prova após o processo de desmoldagem.

Figura 4 – Corpos-de-prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm)

O segundo ensaio foi realizado após o primeiro e, para isso, foi necessário utilizar as metades dos três corpos-de-prova do ensaio de flexão para a determinação da resistência à compressão, totalizando seis corpos-de-prova para as idades determinadas (7 e 28 dias).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Flow table test

O ensaio de espalhamento das argamassas foi realizado para verificar a capacidade de construção. Os resultados da realização do ensaio são mostrados no Quadro 3. A Figura 5 mostra a consistência das argamassas após o ensaio.

Quadro 3 – Resultados do ensaio de índice de consistência das argamassas

Mistura	Média (cm)
M1 (1:1,00)	12,10
M2 (1:1,50)	12,20
M3 (1:2,00)	12,40
M4 (1:2,50)	13,60
M5 (1:3,00)	13,90
M6 (1:1,70)	21,60

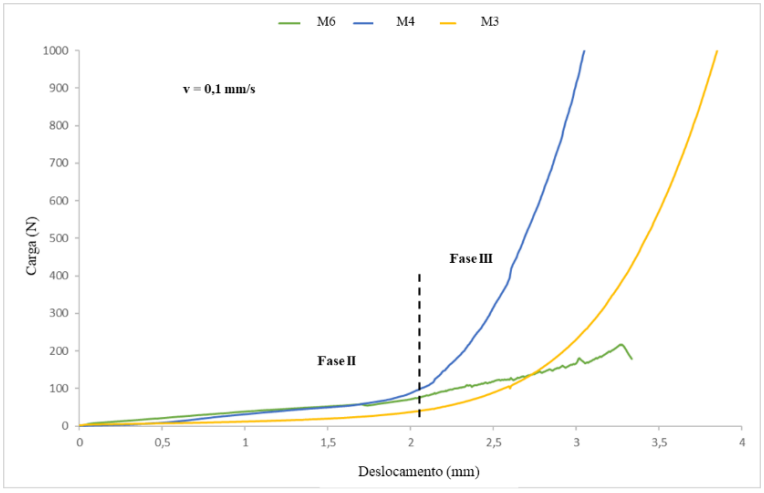
Figura 5 – Corpos-de-prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm)

Através da análise do Quadro 3 e da Figura 5, embora os resultados se tenham enquadrado nos limites descritos por TAY; QIAN; TAN, (2019), é possível verificar que as piores consistências foram obtidas para as argamassas M1, M2 e M3, com presença significativa de vazios, devido às altas quantidades de agregados em relação ao cimento. Por sua vez, nas misturas M4 e M5, embora tenham apresentado baixos valores para o índice de consistência também, percebe-se uma menor presença de vazios. A última mistura M6, dosada a partir do método ACI (American Concrete Institute), foi a que apresentou melhor espalhamento, se enquadrando nos limites destacados também pelos demais autores.

Além disso, comparando os resultados com os valores apresentados por DIAS (2022), observa-se uma significativa diferença entre os espalhamentos com as mesmas dosagens (M1 a M5). Com isso, é possível inferir que o tipo de agregado tem relação direta com a fluidez do material, uma vez que a reprodução das mesmas dosagens fez com que os espalhamentos reduzissem.

Squeeze-Flow Test

Os resultados do *Squeeze-Flow Test* são expressos de forma simples e direta em diagramas de carga X deslocamento. Existem três regiões distintas de deslocamentos e perfis típicos obtidos nos testes: Em pequenas deformações no estágio I, o material se comporta como um sólido exibindo deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do material. No estágio II, caracterizado por grandes deslocamentos e pequenas variações de carga, a compressão cria deformações radiais e de cisalhamento que superam as forças que mantêm a elasticidade do material e fluem através da deformação plástica. Por fim, no estágio 3, a carga necessária para continuar a deformação do material aumenta significativamente, com poucas alterações.



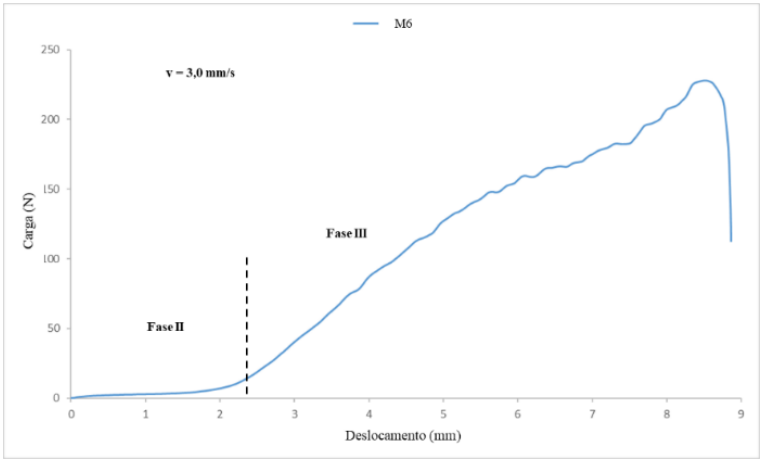


Figura 6 – Resultados do ensaio Squeeze-Flow para as velocidades 0,1 mm/s e 3,0 mm/s

Analisando a Figura 6, verifica-se que as argamassas M4, M5 e M6 apresentaram desempenhos similares para a velocidade de ensaio igual a 0,1 mm/s na etapa inicial II. Porém, no estágio 3, a argamassa M6 deforma-se mais facilmente que as demais, necessitando, portanto, de cargas menores para deslocamentos maiores. Os deslocamentos máximos das argamassas M4, M5 e M6 são de 3,85 mm, 1,96 e 5,89 mm, respectivamente. Considerando o resultado do espalhamento da argamassa M6, este resultado é esperado. Não foi possível obter os resultados para as argamassas M1, M2 e M5.

Na velocidade de ensaio de 3,0 mm/s, só foi possível obter resultados para a argamassa M6, que apresentou melhor desempenho nos resultados dos ensaios. Seu deslocamento máximo foi igual a 8,86 mm.

Os resultados demonstraram que a relação entre a água e materiais secos pode estar relacionada com os parâmetros reológicos do material. A argamassa M6, por apresentar maior relação, foi a que apresentou menor resistência ao deslocamento, necessitando de cargas menores. Portanto, pode-se inferir, em relação à reologia do material, que os valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica da argamassa M6 possuem melhores desempenho ao material.

ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Após a realização dos ensaios no estado fresco, procedeu-se para a moldagem dos corpos de prova para serem submetidos aos ensaios no estado endurecido. Foi possível observar na Figura 5 que as misturas M1 e M2 foi as que apresentaram maior índice de vazios, por isso, não foi possível realizar suas moldagens. Dessa forma, os resultados apresentados a seguir se referem apenas às misturas M3, M4, M5 e M6.

Para os testes de resistência à tração na flexão das argamassas dosadas, realizados de acordo com os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005) nas idades de 7 e 28 dias, obteve-se os resultados mostrados na Figura 6. Já para os ensaios de resistência à compressão, obteve-se os resultados mostrados na Figura 7.

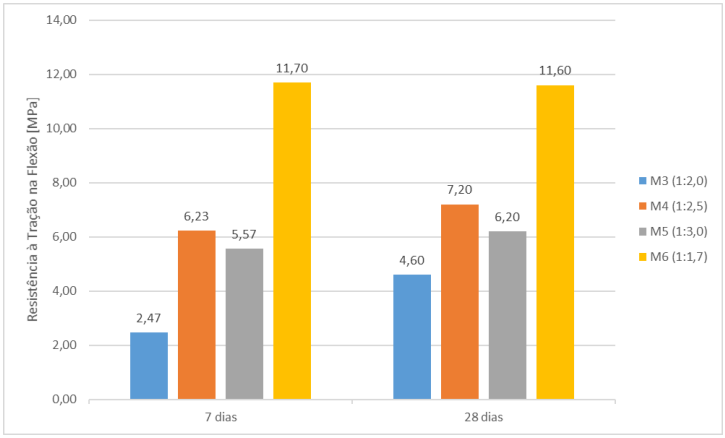


Figura 6 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos mostram que a argamassa M6 teve o melhor desempenho em termos de resistência à flexão, com 11,70 e 11,60 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente. Em seguida, destaca-se a argamassa M4, que possui a mesma relação a/c que a mistura M6 e apresentou resistências iguais a 6,23 e 7,20 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente. É possível observar que a argamassa M3 foi que apresentou os piores resultados, com 2,47 e 4,60 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente. Isso certamente tem relação com o significativo índice de vazios observado na Figura 5.

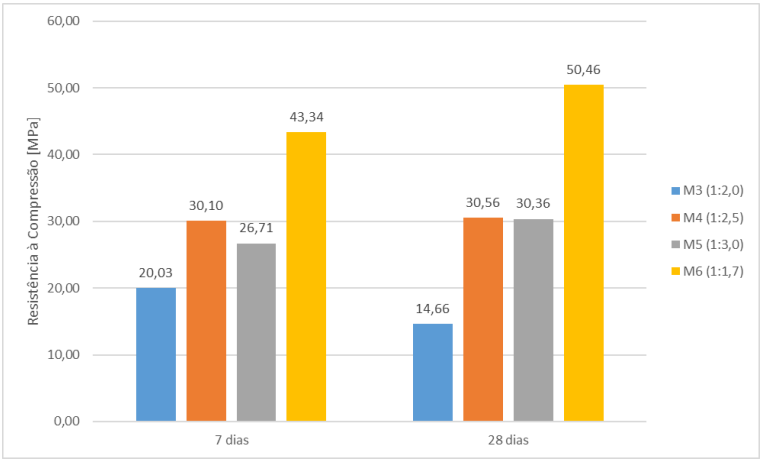


Figura 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

De forma análoga aos resultados de tração na flexão, foi possível observar que os melhores resultados foram da argamassa M6, apresentando resistências iguais a 43,34 e 50,46 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente. Em seguida, observou-se que a mistura M4 apresentou resistências iguais a 30,10 e 30,56 MPa nas mesmas idades. Os piores resultados se deram para a argamassa M3, com 20,03 e 14,66 MPa. Essa queda de pouco mais de 25% observada entre as idades de 7 e 28 dias, respetivamente, está certamente relacionada com o alto índice de vazios apresentado pela mistura.

Uma mistura com menor relação água/cimento torna possível a produção de uma argamassa menos porosa, que irá resistir de forma mais satisfatória as tensões de flexão e compressão, pois resiste à propagação de microfissuras que se concentram nos vazios dentro do concreto.

Embora a argamassa M3 tenha apresentado menor relação a/c entre as demais, percebe-se que a baixa relação água/materiais secos influenciou diretamente no alto índice de vazios. Por outro lado, a proporção de água em relação aos materiais secos da argamassa M6, pouco maior que as demais, fez

com que a mistura apresentasse melhor aparência e menor vazios, apresentando os melhores resultados.

Pode-se observar o efeito do Cimento Portland CP-V-ARI que, em combinação com as matérias-primas detalhadas acima, permite a obtenção de resistências semelhantes aos 7 dias e aos 28 dias. Na maioria dos casos, a resistência à compressão aos 7 dias excede 85% da resistência aos 28 dias, o que permite que essas misturas sejam usadas no sistema de construção 3DCP.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o desempenho de seis misturas de argamassa para impressão 3D. Em todas as misturas foram utilizados os materiais da RMF em conjunto com os aditivos SP e VMA. As dosagens (M1 a M5) seguiram as recomendações do trabalho desenvolvido em outro estado brasileiro e a mistura M6 foi obtida com base no método de dosagem da ACI (American Concrete Institute) e foi a que teve o melhor desempenho. De acordo com a discussão dos resultados, é possível concluir que:

- A reprodutibilidade das misturas M1 a M5 foi comprometida com o uso dos materiais locais, uma vez que os resultados não foram satisfatórios, evidenciando uma forte influência da região.
- O desenvolvimento da mistura M6 atendeu às necessidades no estado fresco e endurecido para esse tipo de trabalho, porém ainda contém um alto teor de cimento.
- O resultado do ensaio de resistência à compressão da mistura M6, que foi obtido valor em torno de 50 MPa aos 28 dias possibilita a utilização da dosagem na construção de estruturas e habitações sociais impressas em 3D.
- Considerando que a resistência mínima permitida para o concreto utilizado em estruturas é de 20 MPa, é possível determinar outra dosagem visando um menor consumo de cimento, sem prejudicar a finalidade de utilização da mistura.

Os materiais locais têm potencial de implementar essa nova tendência de construção, apenas as proporções precisam ser ajustadas e o método utilizado é aceitável. Para trabalhos futuros, sugere-se a determinação de uma dosagem com um menor consumo de cimento, além de testes utilizando materiais alternativos como adição ao cimento, a fim de contribuir para o estudo de misturas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: Agregados - determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

DIAS, L. S. Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2022.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 13320 - Particle size analysis — Laser diffraction methods, Switzerland, 2020.

LU, B. et al. Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent. Construction and Building Materials, v. 211, 2019.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, M. Evaluating the printability of mortars containing lightweight coarse aggregates. Cem. Mortar Compos. 109, 103570, 2020.

RUBIO, M.; SONEBI, M.; AMZIANE, S. 3D printing of fiber cement-based materials: Fresh and rheological performances. In Proceedings of the Second International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 21–23 June, 2017.

TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. Composites Part B: Engineering, v. 174, 2019.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

PROJECTO DE RECONVERSÃO DA GARE DO ARCO CEGO
REABILITAÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DA ESTRUTURA EXISTENTE

Augusto Gomes[a]; Francisco Virtuoso[b]; André Quinhones[c], Carlos Canha[d]

[a] CERIS, IST, Portugal, augusto.gomes@tecnico.ulisboa.pt

[b] IST, Portugal, francisco.virtuoso@tecnico.ulisboa.pt

[c] Civilser, Portugal, geral@civilser.pt

[d] Portugal, carlosmcanha@gmail.com

RESUMO

No artigo apresenta-se o projecto de estruturas e fundações da reconversão da Antiga Gare do Arco Cego em Lisboa para o TIC – Técnico Inovation Center. O projecto foi muito condicionado pelos fatores associados à conservação do património.

No artigo analisam-se duas abordagens possíveis:

- reabilitação da estrutura existente, que era suportada por pareceres técnicos que sustentavam esta opção;
- substituição da estrutura metálica existente por uma "réplica", que se veio a demostrar técnica e economicamente mais viável e que respeitou de forma significativa os aspectos patrimoniais, bem como os relacionados com a sustentabilidade.

No trabalho descrevem-se as dificuldades associadas ao mau estado de conservação da estrutura existente e à impossibilidade de a recuperar de modo a que esta verificasse a segurança sem que fosse significativamente adulterada a sua identidade e autenticidade. A análise destas duas opções é também efetuada em termos económicos, de sustentabilidade e de durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

No presente artigo apresenta-se o projecto de estruturas e fundações da reconversão da Antiga Gare do Arco Cego em Lisboa para TIC – Técnico Inovation Center. O projecto foi muito condicionado pelos fatores associados à conservação do património. A Câmara Municipal de Lisboa tinha conferido ao edifício existente o estatuto de Edifício Classificado (pelo Município) apesar de alguns anos antes terem sido demolidos dois (do lado Poente) dos cinco vãos que constituíam a antiga gare.

Em termos da estrutura seria possível o desenvolvimento de uma solução de reabilitação, que estava mais de acordo com o respeito do valor patrimonial da gare existente e que aparentava ser uma solução mais sustentável, quer em termos de consumo de materiais, quer em termos da minimização da energia incorporada. Tinham sido anteriormente elaborados pareceres que apontavam nesta direcção e que concluíam pela reabilitação da estrutura existente.

No entanto, durante o desenvolvimento do projecto foi reavaliado o estado de conservação da estrutura existente e as necessidades de reforço da estrutura tendo em consideração o mau estado de conservação da estrutura e a necessidade da mesma ter de ser reforçada, quer para ter em consideração a regulamentação estrutural actual, quer para as novas necessidades funcionais que se pretenderam para a estrutura. Em face dessa avaliação foi decidido pelo Instituto Superior Técnico (dono de obra) e pela CML optar pela substituição integral de toda a estrutura da gare, por uma estrutura "réplica" da existente, que se veio a revelar ser mais económica e mais sustentável.

O projecto iniciou-se em 2015 com a inspeção, levantamento e verificação da segurança da estrutura existente. Em Novembro de 2015 foi terminado o Estudo Prévio e o Projecto de execução em Julho de 2016. A obra iniciou-se em Outubro de 2021 e terminou em Dezembro de 2023.

2 ESTRUTURA EXISTENTE

2.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EXISTENTE

O edifício está situado junto ao jardim do Arco do Cego, na proximidade do IST, sendo limitado pela Avenida João Crisóstomo, Avenida Defensores de Chaves e Avenida Duque de Ávila. Apresenta uma área coberta em planta com dimensões de 78 x 42 m^2 (5600 m^2) e uma altura máxima de 9.3 m. O edifício era constituído maioritariamente por elementos metálicos, sendo as únicas excepções as telhas da cobertura, e a fachada Nascente, sendo esta constituída por paredes de tijolo cerâmico.

A estrutura existente do edifício da antiga Gare do Arco do Cego apresentava características típicas das estruturas metálicas da época em que foi construída. A estrutura era constituída por um conjunto de asnas triangulares dispostas paralelamente na direcção nascente poente (transversal) com um vão de 13,4 m (44 pés). Estas asnas estavam dispostas com um afastamento de 9,76 m (32 Pés), sendo todas iguais com excepção das asnas de extremidade nas fachadas Sul e Norte. Em cada alinhamento as asnas apoiavam-se em montantes simples nos apoios centrais e em montantes treliçados nos apoios nas fachadas Sul e Norte constituindo assim uma estrutura porticada, resistente quer às acções verticais, quer às acções horizontais no seu próprio plano. O conjunto destas estruturas porticadas constituíam os elementos principais, quer sob o ponto de vista da resistência estrutural, quer sob o ponto vista estético, pois eram os elementos mais visíveis, tanto do interior como do exterior da estrutura.

A cobertura era constituída por telhas apoiadas em pequenas cantoneiras que descarregam em madres, constituídas por perfis UNP, dispostas segundo a inclinação das águas, ou seja,

paralelamente às asnas principais. Estas madres apoiavam-se em estruturas triangulares secundárias, 5 por cada módulo de uma asna, afastadas de 3,35 m na direcção transversal, todas com 1,35 m de altura. Estas estruturas triangulares secundárias apoiavam-se nas asnas e asseguravam o seu travamento. A resistência da estrutura a forças horizontais na direcção Norte-Sul era assegurada por três sistemas de travamento ao nível da corda inferior das asnas principais, sendo as forças transmitidas à fundação através das paredes de alvenaria da fachada nascente. Na fachada Poente, e fruto de intervenções recentes, apenas existia um pequeno módulo da parede de alvenaria. Na figura 1 apresentam-se fotografias da fachada Sul, das asnas transversais e de um montante treliçado da estrutura antiga e na Figura 2 um esquema dos pórticos transversais.

Refira-se que, como era típico das estruturas metálicas do fim do sec. XIX, princípio do séc. XX, os elementos estruturais são constituídos por elementos metálicos de pequenas dimensões, em geral cantoneiras e em alguns casos UNP, formando elementos compostos através de ligações com chapas e com rebites.

2.2 LEVANTAMENTO E GEOMETRIA DA ESTRUTURA EXISTENTE

Com o objectivo de se realizar uma verificação da segurança da estrutura existente, e uma vez que não existiam elementos do projecto da estrutura construída, foi efectuado um levantamento da estrutura que incluiu a determinação dos perfis da estrutura, identificando-os através de perfis comerciais disponíveis, quer no sistema métrico (em mm) quer no sistema inglês (em polegadas), que mais se aproximavam das dimensões dos perfis medidos na obra.

Figura 1 – Fotografias da fachada Sul, das asnas transversais e de um montante treliçado.

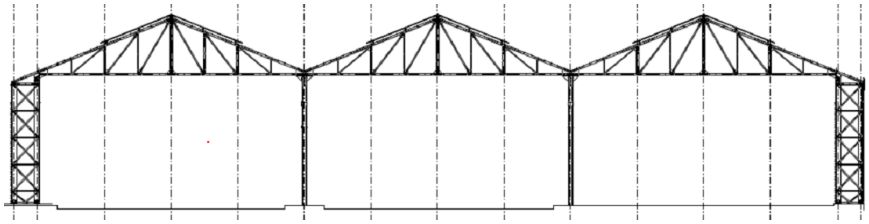


Figura 2 – Pórtico transversal.

2.3 INSPEÇÃO À ESTRUTURA

A inspecção à estrutura foi efectuada recorrendo a andaimes para acesso aos elementos em elevação e foram realizadas sondagens aos elementos enterrados que permitiram identificar diversos problemas nos elementos estruturais, nomeadamente o mau estado de conservação da pintura e a existência de acentuada corrosão, quer nas zonas abaixo do nível do pavimento, quer nos perfis compostos por cantoneiras justapostas e nas ligações, assim como diversos problemas localizados resultantes de intervenções anteriores menos cuidadas. Nas figuras 3 e 4 apresentam-se pormenores da estrutura com corrosão. Na figura 5 ilustra-se uma zona da galeria técnica preenchida com betão, uma vista da parede lateral da galeria em alvenaria e a fundação de um montante central. Em suma, as principais patologias identificadas na estrutura foram as seguintes:

- corrosão de elementos metálicos, nalguns casos com perda total de secção;
- encurvadura de elementos metálicos;
- elementos metálicos cortados;
- ausência de rebites.

Figura 3 – Corrosão nas ligações - corrosão em frestas no contacto entre elementos diferentes.

Figura 4 – Corrosão na base dos montantes treliçados – zonas com perda total de secção. Tirante de ligação do montante à fundação com corrosão. Sapata em alvenaria de tijolo.

Figura 5 – Galeria técnica (fosso entre carris) preenchida com betão, parede lateral da galeria em alvenaria de tijolo e fundação de um montante.

2.4 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DA ESTRUTURA EXISTENTE

Com base na informação obtida no levantamento efectuado à estrutura metálica existente, geometria e secções transversais, foi efectuada uma verificação de segurança da estrutura, tendo sido elaborado um modelo tridimensional de elementos finitos. Nesta análise de segurança foi considerado o peso próprio da estrutura, uma carga de 0,5 kN/m^2 para as telhas da cobertura e as sobrecargas foram quantificadas de acordo com o EC1: sobrecarga de 0,4 kN/m^2; acção do vento e acção sísmica considerando um solo do Tipo C e um coeficiente de comportamento de 3. Mesmo para esta situação, em que não se consideraram os acréscimos de carga associados aos novos revestimentos previstos no projecto de arquitectura, e sem considerar reduções de resistência resultantes da corrosão do aço, verificou-se que a segurança não era verificada num número significativo de elementos, pelo que haveria necessidade de reforçar ou substituir um número significativo dos elementos da estrutura existente.

2.5 CONDICIONALISMOS PATRIMONIAIS

Em função dos valores identificados no relatório prévio de Arquitetura – valores históricos e urbanos, mas também tipológicos e técnicos – foi inicialmente definida uma estratégia de actuação que passava por manter parte da estrutura metálica existente, correspondente aos pórticos principais, constituídos pelos montantes e pelas asnas, reforçando-a e substituindo apenas os elementos que não ofereciam garantia de resistência estrutural face às actuais exigências regulamentares e às novas exigências funcionais. Face ao estado de conservação e às necessidades de reabilitação e reforço foi assumido que seriam integralmente substituídas as estruturas triangulares longitudinais, que suportam a estrutura secundária da cobertura e que ligam as asnas principais, assim como os sistemas de contraventamento horizontais. Estes elementos seriam substituídos por uma estrutura com a mesma geometria e o mesmo tipo de perfis actualmente existentes, soldados entre si e ligados às asnas principais por ligações rebitadas idênticas às da restante estrutura. Dado o seu péssimo estado de conservação e tendo em consideração a sua importância estrutural, quer para a estrutura existente, quer para a nova solução das fachadas principais, os pórticos de extremidade, nas fachadas Sul e Note, seriam também integralmente substituídos, mantendo-se, mais uma vez, a geometria, o tipo de perfis e o tipo de ligações

existentes. Esta solução permitia assegurar simultaneamente a sobrevivência histórica da estrutura original e respeitar os códigos actuais de segurança estrutura. Neste sentido, inicialmente o projecto de estruturas e fundações assentou num conjunto diversificado de soluções, desenvolvidas para responder de forma localizada a cada situação, de acordo com o respectivo desenho estrutural, solução técnica e estado de conservação.

A estrutura sobrevivente ainda apresentava uma interessante espacialidade e autenticidade histórica. Porém as sucessivas alterações e utilizações da gare reduziram a sua condição física. Desactivada há quase 20 anos e desde então exposta aos agentes atmosféricos, embora coberta, mas sendo aberta lateralmente, os elementos metálicos desenvolveram inúmeras anomalias associadas à falta de manutenção. Com base em inspeções visuais anteriormente realizadas (a partir do solo) foi suportada a viabilidade da reabilitação da estrutura da gare existente ideia que ia ao encontro das preocupações associadas à preservação do património construído.

Porém as inspeções (com andaimes que permitiram o acesso à estrutura) e as sondagens realizadas no início do desenvolvimento do projecto de estruturas para a reconversão da gare revelaram situações muito acentuadas de corrosão nos elementos metálicos, em alguns casos, com perda significativa e noutros com perdas quase total de material as quais punham em causa a segurança da estrutura existente e a sua reutilização futura.

3 NOVO EDIFÍCIO DO TÉCNICO LERANING CENTER

3.1 ESTRATÉGIA DE INTERVENÇÃO

No projecto da estrutura metálica seria necessário conciliar três aspectos distintos:

i) preservar o valor patrimonial da estrutura existente, mantendo tanto quanto possível a sua imagem urbana e as suas características geométricas e estruturais;
ii) garantir que a estrutura tivesse as características de resistência que assegurem a sua segurança estrutural de acordo com a regulamentação actual, tendo em conta as alterações de cargas e de geometria resultantes do projecto de arquitectura e colmatando também as deficiências estruturais detectadas na estrutura existente;
iii) substituir os elementos estruturais danificados, atendendo às zonas de corrosão detectadas e à perda de material, em alguns casos obrigando mesmo à substituição total de elementos estruturais, ou ainda a inexistência ou substituição de rebites por parafusos.

Analisado o estado da estrutura existente e as necessidades de reparação e de reforço devido às várias razões já apresentadas constatou-se o seguinte:

i) a tipologia e o estado de conservação dos elementos de ligação da base dos montantes, constituídos por barras de grande diâmetro que atravessam toda a espessura das sapatas numa altura de aproximadamente 2,0 m, não permitia a sua reparação;
ii) as bases dos montantes, em particular nos alinhamentos exteriores, nas fachadas Nascente e Poente, vitais para assegurar a ligação da estrutura às fundações estavam de tal modo degradados, em algumas situações com perda quase total da secção de aço, não sendo recuperáveis, exigindo-se a sua substituição integral;
iii) a conjugação da necessidade de reforçar as fundações, condicionada pelo facto de se querer preservar as galerias longitudinais enterradas (com vista à sua reutilização para a insuflação de ar do sistema de AVAC), associada à necessidade de substituir toda a base dos

montantes, incluindo o sistema de ligação das bases dos montantes às sapatas, obrigavam a substituir todo o conjunto constituído pela fundação e pelo montante, incluindo a respectiva ligação;

iv) com excepção dos pórticos principais das fachadas Norte e Sul, poderia ser eventualmente viável reparar as asnas e os montantes que as suportam, que formam os pórticos transversais intermédios, recorrendo apenas ao reforço e substituição de alguns elementos estruturais e ao reforço de algumas ligações; no entanto esta solução, já de si discutível, quer pela sua dificuldade técnica, quer pela incerteza sobre o estado de conservação dos perfis, chapas e ligações não inspecionáveis, e que teriam de ser reavaliados em fase de obra, ficaria totalmente inviabilizada pela necessidade de substituir as fundações e os montantes; com efeito, não seria possível proceder à substituição destes elementos, em condições de segurança e de uma forma economicamente aceitável, sem desmontar totalmente as asnas principais;

v) as treliças triangulares longitudinais necessitavam de um reforço estrutural que não seria possível efectuar sem descaracterizar a estrutura existente, agravado pelo facto de estas estruturas serem constituídas por cantoneiras de muito pequenas dimensões (LNP com abas de 35 ou 45 mm), tornando-as muito sensíveis aos efeitos da corrosão existente assim como muito deformáveis, o que aliás era visível nos desalinhamentos que a estrutura apresentava;

vi) a estrutura necessitava de ser reforçada para as acções horizontais na direcção longitudinal, quer aumentando os travamentos no plano horizontal, quer introduzindo um contraventamento longitudinal na fachada poente, o qual, em resultado de intervenções anteriores, se encontrava reduzido a uma pequena parede de alvenaria;

vii) foi efectuada uma consulta a um empreiteiro especializado em estruturas metálicas sobre a estimativa de custo de uma pintura e apenas reparação das ligações existentes, cuja estimativa era superior à de uma estrutura metálica nova; refira-se ainda que nesta intervenção nunca seria assegurada a proteção do interior dos perfis duplos (por exemplo 2 cantoneiras costas com costas) e das chapas de nó, onde só seria possível intervir com o desmonte desses elementos.

Face às intervenções necessárias e tendo em consideração os objectivos de preservação patrimonial, de garantia da segurança estrutural e de compatibilização com o projecto de arquitectura, foi proposto que a intervenção de reparação e reabilitação da estrutura metálica da gare existente fosse efectuada de acordo com os seguintes princípios:

i) preservação (e eventual reforço) da estrutura original da envolvente exterior do edifício na fachada Poente com especial destaque para a reabilitação da estrutura metálica embebida na parede Nascente (virada para o Jardim), incluindo a conservação da alvenaria de tijolo (original) e dos vãos existentes;

ii) preservação da estrutura original dos pilares contraventados existentes nas esquinas do edifício, incluindo a conservação da alvenaria de tijolo (original), atendendo ao seu valor decorativo e ao importante papel na imagem urbana do conjunto patrimonial;

iii) substituição integral da estrutura metálica, montantes, asnas principais interiores e de fachada (Sul e Norte), estruturas triangulares longitudinais e sistemas de contraventamento horizontal, por uma estrutura com geometria e solução construtiva idêntica (de qualidade superior e dimensionada de forma a responder aos actuais requisitos de comportamento estrutural e de segurança); a geometria da actual estrutura, assim como o tipo de perfis, seria totalmente respeitada; as ligações dos pórticos principais e os das fachadas dos topos Norte e Sul, quer nos montantes quer nas asnas, seriam materializadas por rebites e chapas

de aço, idênticas às existentes, corrigidas apenas no que resultou da exigência da verificação da segurança estrutural; as ligações dos restantes elementos, vigas trianguladas e os sistemas de contraventamento horizontal, seriam soldadas ou aparafusadas, considerando-se que as suas dimensões, localização e visibilidade, devido à sua altura em relação ao solo, não descaracterizariam a solução adoptada por comparação com a solução que se pretendia replicar.

Com a solução proposta, a substituição da estrutura metálica existente por uma "réplica", conseguiu-se uma solução equilibrada e de bom senso que pretendeu assegurar o respeito pelo valor patrimonial da estrutura existente, quer na preservação da sua geometria e no tipo de elementos estruturais, quer na utilização de soluções construtivas originais. A solução adoptada permitiu conferir à estrutura a necessária segurança estrutural, conseguindo-se simultaneamente respeitar, quer sobre o ponto de vista técnico, quer sob o ponto de vista dos processos construtivos que foram adoptados na reconstrução e reabilitação da estrutura existente, obtendo-se um custo menor e garantindo-se uma durabilidade muito superior à que se obteria com a reabilitação e reforço da estrutura existente.

Relativamente às antigas galerias técnicas, fossos longitudinais que se desenvolviam ao longo de toda a gare, localizados entre cada par de carris, e que permitiam a execução de trabalhos de manutenção por baixo dos eléctricos, houve também a ideia de os reutilizar, seguindo os princípios de sustentabilidade, aproveitando-as como condutas de insuflação para o sistema de AVAC.

No início do desenvolvimento do projecto foram efectuados poços de sondagem para avaliação do estado de conservação das galerias existentes e das condições do solo de fundação. Verificou-se que as galerias técnicas se encontravam preenchidas com betão nalgumas zonas (preenchimento que provavelmente foi efectuado durante a adaptação da gare a terminal rodoviário) e que existiam áreas em que as suas paredes se apresentavam em mau estado de conservação, ou em que não era possível demostrar a sua resistência para os impulsos do solo e para as sobrecargas do piso 0.

Tendo ainda em consideração que, com base em resultados da prospecção geotécnica efectuada, se concluiu que era necessário fundar a nova estrutura a uma profundidade da ordem dos 3,0 m (semelhante à das fundações dos montantes treliçados existentes) ou em alternativa recorrer a fundações indirectas, optou-se por proceder à substituição integral das galerias, nos troços em que estava prevista a sua utilização como conduta para insuflação de ar do sistema de AVAC. Refira-se ainda que a preservação das galerias existentes obrigaria a efectuar o seu encamisamento pelo exterior de forma a assegurar a segurança da estrutura, cujo custo seria muito superior ao da sua substituição.

3.2 A NOVA ESTRUTURA

A nova estrutura metálica da gare respeita a geometria da existente e foi executada com o mesmo tipo de perfis, embora de maior robustez de modo a assegurar a resistência necessária às novas ações, quer as resultantes dos novos revestimentos da cobertura, incluindo telhas ou folha de zinco e suporte em OSB, isolamento térmico, condicionamento acústico, painéis solares térmicos e fotovoltaicos, redes de Incêndio e de drenagem, vidros das claraboias e diversos equipamentos técnicos, quer às actuais acções sísmica e do vento.

O novo edifício do TIC - Técnico Inovation Center - é constituído pelas seguintes subestruturas:

- Estrutura principal de suporte da cobertura;

- Mezanino – Piso intermédio sob a asna do lado Nascente destinado ao Espaço 24 horas;
- Posto de Socorro Avançado – Destinado aos Bombeiros Sapadores de Lisboa e construído pelo IST como contrapartida da cedência do terreno pela C.M. Lisboa;
- Condutas para insuflação de ar, em substituição das antigas galerias técnicas;
- Armazém e Instalações Sanitárias em cave;
- Cave Norte para Instalação do Posto de Transformação;
- Cave Norte para Instalação de Chillers;
- Cave Sul para instalação do sistema de AVAC e de reservatórios do sistema de Combate a Incêndio.

3.3 MATERIAIS

Os principais materiais utilizados na nova estrutura do TIC foram os seguintes:

- Aço em Estrutura Metálica - S275 JR (NP EN 10 025+A1);
- Parafusos e chumbadouros - Cl. 8.8 (EN ISO 898)
- Rebites - R.E.A.E. - $F_u \geq 500$ MPa
- Betão - (NP EN206) C30/37 XC3(P) Cl 0,4 D_{max} 25 S3 c=35 mm
- Aço em armaduras - A500 NR SD (LNEC E460-2010)

3.4 QUANTIDADES DE MATERIAIS

Resumem-se seguidamente as principais quantidades de materiais estruturais aplicados no TIC:

- Aço em estrutura metálica – 332 ton;
- Rebites Ø16 – 9700 unidades
- Aço em armaduras – 670 ton;
- Betão – 5600 m^3;

A quantidade de aço da estrutura metálica existente era de 80 ton as quais após a sua desmontagem e remoção foram vendidas como sucata (com valor comercial) para reciclagem em siderurgia.

4 CONCLUSÕES

No presente artigo apresentou-se a abordagem utilizada na reconversão da Antiga Gare de Eléctricos da Carris do Arco Cego para o Técnico Inovation Center - TIC.

A estrutura existente tinha sido objecto de classificação Municipal e tinham sido elaborados pareceres técnicos que concluíam pela possibilidade de reabilitação da estrutura existente. No início da elaboração do projecto foi realizada uma inspeção à estrutura tendo-se verificado que existiam muitas zonas com corrosão nalguns casos com perda total de seção.

Em fase de estudo prévio foram determinados e quantificados os reforços que teriam de ser executados na estrutura existente de forma a que esta satisfazesse as exigências regulamentares actuais considerando os aumentos de carga associados aos novos revestimentos e equipamentos do novo edifício. Estes reforços iriam desvirtuar de forma significativa a imagem da estrutura existente. Para além disso foi realizada uma consulta ao mercado do custo de uma pintura e reparação das anomalias existentes tendo-se obtido uma estimativa superior ao preço de uma estrutura nova.

Refira-se ainda que nesta acção não seria possível proteger todas as superfícies em particular as barras constituídas por perfis duplos (cantoneiras costas com costas) e a maioria dos nós de ligação. Assim, nesta reabilitação nunca seriam asseguradas as características de durabilidade de uma estrutura nova.

A solução adoptada consistiu em demolir integralmente a estrutura metálica existente (80 ton de aço) e contruir uma estrutura "réplica" da existente com a mesma geometria e tipo de secções, mas com perfis mais robustos de forma a garantir a segurança estrutural.

Tendo em consideração que o aço resultante da demolição foi integralmente reciclado (ao contrário do betão este tem um valor comercial de pelo menos 0.15 € / kg) a opção tomada é em termos de sustentabilidade e também económicos vantajosa uma vez que a reabilitação da estrutura existente conduziria a uma solução de durabilidade inferior. Nas figuras 6 a 11 apresentam-se algumas fotografias do edifício reabilitado, em que foram mantidas as características geométricas da estrutura existente.

Figura 6 – Alçado Sul (Principal) do TIC.

Figura 7 – Alçado Nascente em que foi mantida a parede existente.

Figura 8 – Vista interior do Espaço Multiusos do TIC. Montante novo com secção composta por uma chapa e quatro cantoneiras ligadas por rebites.

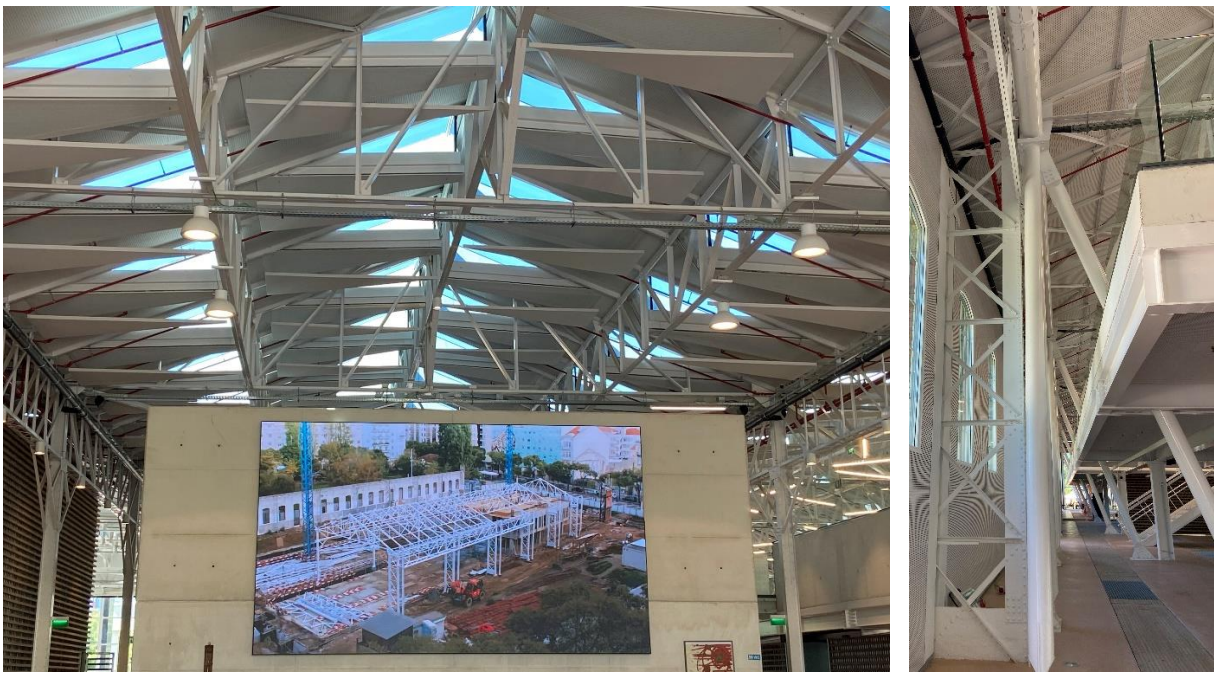


Figura 9 – Átrio de entrada. Montantes existentes treliçados que apoiam a parede da fachada Nascente. Nova estrutura de apoio da extremidade da cobertura formada por tripés tubulares.

REFERÊNCIAS

Virtuoso, F., Gomes, A., Canha, C., Quinhones, A. Projecto de Reconversão da Gare do Arco Cego. IST_Learning_Center. Levantamento e Inspeção da Estrutura Existente. IST, Março de 2015.

Virtuoso, F., Gomes, A., Canha, C., Quinhones, A. Projecto de Reconversão da Gare do Arco Cego. IST IST_Learning_Center. Verificação de Segurança da Estrutura Existente. IST, Março de 2015.

Figura 10 – Montantes treliçados novos com seções compostas ligadas por rebites. Ligação dos montantes à fundação com barras de alta resistência.

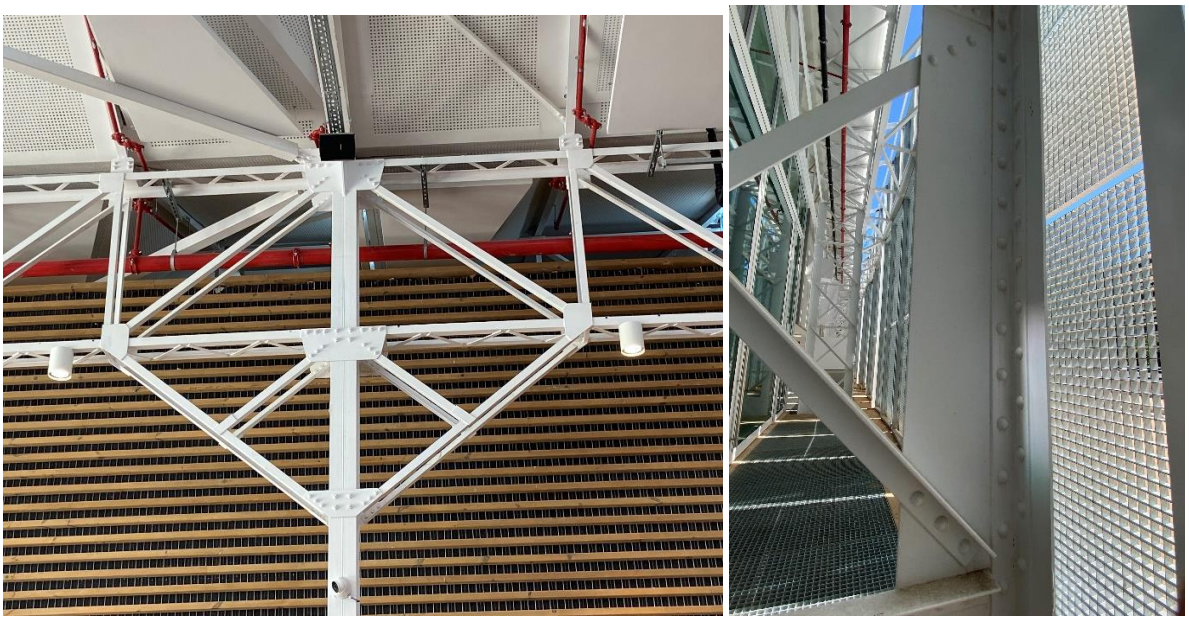


Figura 11 – Ligação das treliças longitudinais aos montantes. Vista da fachada Ponte (Nova), pano envidraçado à esquerda e gradil à direita.

Virtuoso, F., Carvalho, J.M. A. Nota Técnica sobre o Projecto de Reconversão da antiga estação de elétricos do Arco Cego. IST, Dezembro de 2015.

Virtuoso, F., Gomes, A., Canha, C., Quinhones, A. Projecto de Reconversão da Gare do Arco Cego. IST_Learning_Center. Estruturas e Fundações. Projecto de Licenciamento. IST, Novembro de 2015.

Virtuoso, F., Gomes, A., Canha, C., Quinhones, A. Projecto de Reconversão da Gare do Arco Cego. IST_Learning_Center. Estruturas e Fundações. Projecto de Execução. IST, Julho de 2016.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O PAPEL DOS CIDADÃOS NO CONHECIMENTO DA BIODIVERSIDADE: O CASO DE ESTUDO DAS COBERTURAS VERDES NA CIDADE DE LISBOA

Viviana Monteiro Padinha[a]; Patrícia Tiago[b]; Ana I. Leal[c]; Cristina Matos Silva[d]

[a](cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal), fc41204@alunos.fc.ul.pt

[b](cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal), pmtiago@ciencias.ulisboa.pt

[c](cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal), aiencarnacao@ciencias.ulisboa.pt

[d](CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal), cmsilva@civil.ist.utl.pt

RESUMO

Com o aumento da população humana e da densidade de construção, aumenta também a procura e a concorrência pelo espaço nas cidades, que é cada vez mais limitado. As coberturas verdes são uma solução com base na natureza, sustentável e que se prevê promissora, uma vez que este tipo de infraestrutura permite introduzir vegetação em elementos construídos. As coberturas verdes proporcionam múltiplos benefícios, a nível ecológico e também económico, aos residentes e proprietários dos edifícios onde estão localizadas, mas também oferecem vários benefícios públicos, estes últimos menos estudados. Este trabalho pretende conhecer a relação dos cidadãos com a biodiversidade, a sua perceção em relação à problemática da perda de biodiversidade e perceber o que sabem sobre coberturas verdes, se reconhecem as suas vantagens como solução sustentável, e que tipo de políticas de incentivo apoiam. Para isto foi realizado um questionário online dirigido aos cidadãos de Lisboa, que vivem ou trabalham próximo de coberturas verdes. Os resultados deste inquérito parecem indicar que o termo biodiversidade está bem estabelecido na população de Lisboa, no entanto, parece ainda haver algum nível de dúvida sobre o que são exatamente as coberturas verdes. A maioria dos inquiridos considera as coberturas verdes uma mais-valia para as cidades, sendo também a maioria a favor de políticas de incentivo para a sua implementação.

Este trabalho está inserido nas atividades do projeto GRAVITY financiado pela FCT.

Palavras-Chave:

Coberturas Verdes, Soluções Baseadas na Natureza, Ciência Cidadã

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população humana e da densidade de construção, aumenta também a procura e a concorrência pelo espaço nas cidades, que é cada vez mais limitado. O rápido desenvolvimento urbano e a expansão das cidades em grande escala causaram muitos efeitos adversos na biodiversidade destas áreas (Schueller *et al*. 2019), bem como nos serviços de ecossistema que esta fornece (Brunori *et al*. 2017). As coberturas verdes, sendo uma forma de infraestrutura verde, podem aumentar a biodiversidade urbana ao fornecerem estruturas de vegetação complexas, ao aumentarem as oportunidades de alimentação e de abrigo para os animais e ao estabelecerem a conetividade dos habitats (Wang, L. *et al.* 2022). O contacto com a natureza proporciona uma série de benefícios para a saúde e o bem-estar humanos, ao passo que a expansão da urbanização pode levar a que as pessoas tenham menos oportunidades de se relacionarem com a natureza. A biodiversidade urbana, ao contribuir para aumentar a ligação entre a natureza e os cidadãos, pode beneficiar o bem-estar e a saúde humanos (Sirakaya *et al*. 2018).

As cidades têm muitos desafios ambientais para enfrentar, como a poluição do ar, a poluição da água e os efeitos da Ilha de Calor Urbano (ICU). Em particular, os efeitos de ICU têm sido um problema crítico para muitas cidades, devido aos seus impactos associados, como o aumento do consumo de energia e água, a redução do conforto térmico e o aumento da mortalidade e morbilidade (Zhang *et al.* 2022).

A importância das infraestruturas verdes tem sido amplamente reconhecida na promoção do desenvolvimento urbano sustentável devido aos seus benefícios versáteis, como a eficiência energética, a atenuação da ICU, o prolongamento da longevidade dos telhados, a purificação do ar, o controlo do escoamento superficial, o isolamento sonoro e a redução do ruído, o aumento da biodiversidade, a utilização para fins recreativos, melhorias estéticas e o aumento do valor da propriedade (Zhang *et al.* 2022). As coberturas verdes, um tipo particular de infraestrutura verde, têm ganho cada vez mais atenção para o desenvolvimento de espaços de cobertura em vários países (Zhang *et al.* 2020). As práticas tradicionais de construção oferecem poucas oportunidades para a recuperação ambiental em zonas urbanas. À medida que as preocupações com a melhoria ambiental nas zonas urbanas se tornam mais prevalentes, haverá uma maior procura por práticas inovadoras que criem serviços dos ecossistemas e uma cobertura do solo ecologicamente funcional nas cidades. As coberturas verdes são um bom exemplo de uma dessas práticas (Carter e Fowler 2008). Estas proporcionam múltiplos benefícios a nível ecológico e económico, aos residentes e proprietários dos edifícios onde estão localizadas, mas também oferecem vários benefícios públicos.

Quanto às políticas de incentivo, Claus e Rousseau (2012) concluíram que tanto os benefícios fiscais como subsídios financeiros, são socialmente desejáveis e efetivamente necessários para convencer os potenciais investidores privados a implementar coberturas verdes. Outro estudo também sugere que o subsídio fiscal é o estímulo mais direto para controlar o efeito ICU (Zhang *et al*. 2019). Alguns estudos mostraram ainda que a consciencialização das pessoas para a deterioração do ambiente urbano pode oferecer uma oportunidade para a participação pública na elaboração de políticas ambientais (Huang, G. 2015).

Este trabalho pretende conhecer a relação dos cidadãos com a biodiversidade e a sua perceção em relação à problemática da perda de biodiversidade, perceber o que sabem sobre coberturas verdes, se reconhecem as suas vantagens como solução sustentável, e que tipo políticas de incentivo apoiam. Para isto, foi necessário desenvolver um questionário dirigido aos cidadãos de Lisboa, que vivem ou trabalham próximo de coberturas verdes.

Este trabalho decorre no âmbito do projeto "GRAVITY – A Biodiversidade em Coberturas/Fachadas Verdes. Avaliação da Contribuição de Coberturas/Fachadas Verdes para a Biodiversidade das Cidades com o apoio da Ciência Cidadã" (2022.02093.PTDC).

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MÉTODOS

Para conhecer a perceção dos cidadãos de Lisboa quanto à biodiversidade, a problemática da perda de biodiversidade, o que sabem sobre coberturas verdes, se reconhecem as suas vantagens e que tipo de políticas de incentivo apoiam, foi produzido um questionário online na aplicação Google Forms. A identificação das coberturas verdes foi feita inicialmente com base em dados recolhidos por outros elementos da equipa do projeto GRAVITY e posteriormente foram realizadas visitas de reconhecimento para determinar fatores como acessibilidades, tipologia de cobertura, estado atual da vegetação, empresas localizadas na proximidade e contactos disponíveis. Foi então produzida uma lista de 85 entidades localizadas perto das referidas coberturas (num raio de 200 m em relação a cada uma). O questionário foi submetido e aprovado pela Comissão de Ética da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e foi determinada como população alvo deste inquérito, os cidadãos que vivem ou trabalham próximo de coberturas verdes na cidade de Lisboa. Assim, com base na lista previamente produzida, o questionário foi divulgado junto de funcionários dessas entidades, através do envio de emails, contacto pessoal e com apoio de panfletos com QR Code (Código de Resposta Rápida) de acesso ao questionário. A época de recolha de respostas foi de 6 de novembro de 2023 a 5 de fevereiro de 2024.

Todos os dados do questionário foram descarregados e foi inicialmente realizada uma análise exploratória de frequências com recurso ao *software* Microsoft Excel (Microsoft, 2022). A análise estatística dos resultados do questionário foi realizada no *software* IBM SPSS Statistics 28 (IBM, 2021), nomeadamente, o teste não paramétrico de independência do Qui-quadrado para determinar se haveria relação entre as variáveis da idade, género, escolaridade e as respostas dadas relativamente às questões sobre biodiversidade e coberturas verdes.

2.1.1 Estrutura do questionário

Na introdução do questionário foi apresentado um texto informativo com os objetivos do estudo, em particular do questionário, o seu contexto, a utilização que seria feita dos dados fornecidos e o seu tratamento como dados pessoais de acordo com o Regulamento Europeu de Proteção de Dados. A primeira questão consistia numa declaração de aceitação de participação no estudo, os participantes apenas poderiam avançar para o questionário após assinalarem o seu consentimento.

Após o consentimento, seguiam-se 26 questões, sendo 25 delas de resposta fechada e 1 de resposta aberta. As questões estavam agrupadas em 4 temáticas distintas: dados sociodemográficos, biodiversidade, ciência cidadã e coberturas verdes. A maioria das questões eram de resposta obrigatória, pelo que se optou por colocar nesses casos as opções "Não sei" e/ou "Prefiro não responder" de modo a evitar que os participantes abandonassem o questionário. As duas últimas questões consistiam em grelhas de escolha múltipla.

O questionário seguia a estrutura representada na Figura 1, como se observa, no final da secção "1. Perfil Sociodemográfico", todos os inquiridos prosseguiam para a secção seguinte "2. Biodiversidade". Na última questão da secção Biodiversidade "Faz ou já fez registos de biodiversidade na plataforma BioDiversity4All/iNaturalist?", os inquiridos que respondiam "Sim" prosseguiam para a secção seguinte

"3. Ciência Cidadã", caso selecionassem "Não", avançavam para a primeira questão da secção "4. Coberturas Verdes". Na secção "3. Ciência Cidadã", após a última questão desta secção, o questionário prosseguia automaticamente para a secção seguinte "4. Coberturas Verdes". No entano, se os inquiridos selecionassem a opção "Não" na questão "Sabe o que são coberturas verdes?" o questionário terminava. Para os inquiridos que respondiam "Sim" ou "Não tenho a certeza" o questionário prosseguia para a questão seguinte dentro do tema e, de modo a que partissem do mesmo ponto, foi dada no início da questão, a seguinte breve explicação de cobertura verde "Também são designadas por coberturas ajardinadas, coberturas vivas ou telhados verdes. Referem-se a todo o tipo de instalação de vegetação sobre uma estrutura horizontal num edifício."

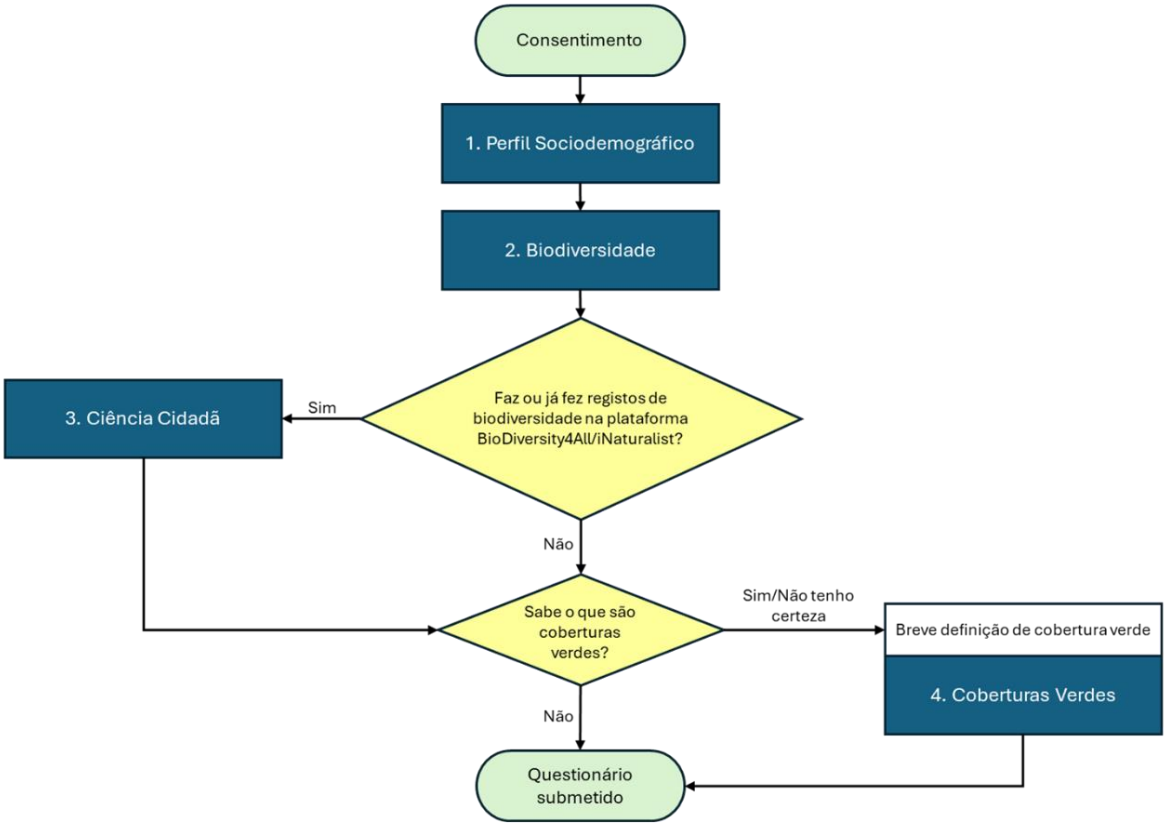


Figura 1 – Fluxograma da estrutura do questionário.

A questão em que é pedido aos inquiridos que selecione o(s) locai(s) em Lisboa onde esteve numa cobertura verde, estava acompanhada pelo mapa da Figura 2.

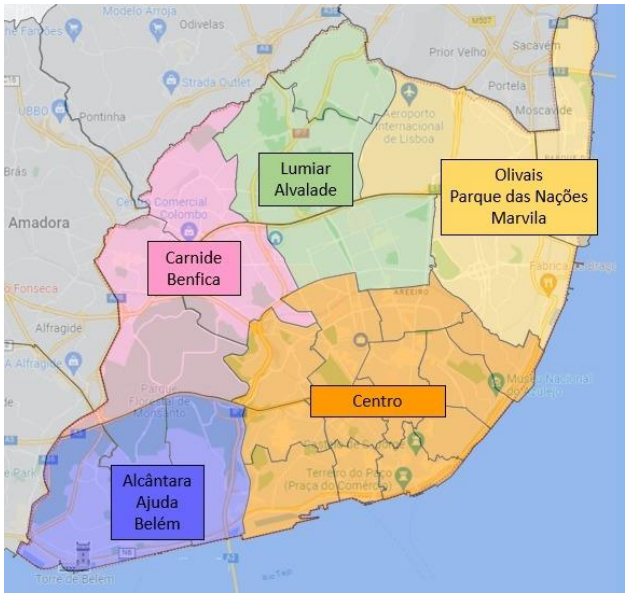


Figura 2 - Mapa de Freguesias de Lisboa agrupadas em 5 zonas identificadas por diferentes cores. (Adaptado de Google. 2023. Lisboa. Google Maps. https://maps.app.goo.gl/BmYkwfy8jf8r1L6BA?g_st=ic)

Relativamente à questão de resposta aberta, em que é pedido aos inquiridos que indiquem que vantagens das coberturas verdes conhece, foi realizado um tratamento às respostas obtidas que consistiu em identificar se as vantagens referidas se enquadravam dentro de cada um de 11 tópicos principais identificados. No Quadro 1. estão listados os tópicos usados como base para o tratamento destas respostas.

Quadro 1. Lista de tópicos usados para enquadrar as vantagens das coberturas verdes referidas pelos inquiridos.

Vantagens das coberturas verdes
Aumento de espaços verdes
Qualidade do ar (O^2/CO^2/poluição/humidade)
Estética
Biodiversidade
Eficiência energética/Comportamento térmico
Psicossociais (qualidade de vida/bem estar)
Retenção águas pluviais
Protecção contra o ruído
Protecção da estrutura do edifício (aumento de vida útil/redução de custos)
Eficiência de painéis solares
Hortas urbanas/produção de alimentos

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Participantes

Obtiveram-se no total 154 respostas ao inquérito. Do total da amostra, 84 inquiridos (54,5%) são do género feminino, 68 do género masculino (44,2%), 1 inquirido selecionou "outro" (0,6%) e 1 optou por não responder (0,6%). A média de idade dos inquiridos é de 43,09 anos, após agrupamento em 6 classes, verificou-se que a faixa etária com maior representação é a dos 45-54 anos com 59 indivíduos (38%), seguida da faixa dos 35-44 com 34 indivíduos (22%), segue-se a faixa do 25-34 com 31 indivíduos (20%), a faixa dos 55-64 tem 18 indivíduos (12%), a faixa dos 18-24 tem 9 indivíduos (6%) e por fim, a faixa etária com menos representação é a dos 65+ com 3 indivíduos (2%).
Relativamente à situação profissional, a grande maioria dos inquiridos são trabalhadores, situação indicada por 146 indivíduos (95%), 3 indivíduos (2%) são trabalhadores-estudantes, 2 são estudantes (1%), 2 na situação de reformado (1%) e 1 indicou outra situação. Quanto à nacionalidade, 153 indivíduos são de nacionalidade portuguesa e apenas 1 indicou outra nacionalidade (brasileira). O nível de escolaridade da maioria dos inquiridos é a licenciatura, com 67 indivíduos (44%), seguido de mestrado com 56 indivíduos (36%), 19 indivíduos (12%) indicaram o ensino secundário, 4 (3%) indicaram ter doutoramento, 2 (1%) têm o ensino básico do 3º ciclo (atual 9º ano), 1 tem curso técnico superior profissional, 1 tem bacharelato e 6 indicaram outras situações, nomeadamente a pós-graduação, o que os localiza nas faixas do ensino superior. As áreas de formação dos participantes, apresentadas no Quadro 2, indicam que a área da Engenharia e Técnicas Afins tem a maior representação com 45 indivíduos (29%), seguida das Ciências Empresariais com 37 indivíduos (24%).

Quadro 2 – Áreas de formação dos participantes que responderam ao inquérito.

Área de Formação	Frequência	Percentagem
Agricultura, Silvicultura e Pescas	1	0,6
Arquitetura e Construção	10	6,5
Artes	3	1,9
Ciências da Vida	10	6,5
Ciências Empresariais	37	24
Ciências Físicas	2	1,3
Ciências Sociais e do Comportamento	10	6,5
Direito	7	4,5
Engenharia e Técnicas Afins	45	29,2
Formação de Professores/Formadores e Ciências da Educação	3	1,9
Humanidades	10	6,5
Indústrias Transformadoras	1	0,6
Informação e Jornalismo	2	1,3
Informática	4	2,6
Proteção do Ambiente	3	1,9
Serviços Sociais	1	0,6
Outras	1	0,6
Total	150	97,4
Prefiro não responder	4	2,6
Total	154	100

3.1.2 Resultados das temáticas do inquérito relativas a biodiversidade e ciência cidadã

Da totalidade dos inquiridos (n=154), a maioria (94%) conhece e sabe o que significa o termo "biodiversidade", e apenas 6% conhece o termo, mas não sabe o que significa. Quanto à opinião sobre a perda de biodiversidade, a maioria dos inquiridos (84%) considera um problema muito grave, 16% considera um problema grave, e apenas 1% não sabe o que significa. Quando à questão "Sabe como pode colaborar para travar a perda de biodiversidade?" a maioria dos inquiridos (71%) indica que sim. Relativamente ao contacto que tem com a natureza, 34% tem algum contacto com a natureza na vida diária, seguindo de 31% que tem frequentemente, 20% indicou ter contacto todos os dias, e por último, apenas 14% raramente tem contacto com a natureza. No que respeita ao nível de satisfação com o contacto que tem com natureza na sua vida diária, a maioria (41%) indicou que está satisfeito com o contacto que tem, seguidos de 29% de insatisfeitos, 17% indicou estar neutro, e por fim, os muito insatisfeitos e os completamente satisfeitos representam ambos 6%. Relativamente à prática de ações que contribuem para travar a perda de biodiversidade, da lista disponibilizada, incluindo um campo aberto para outras ações, foram obtidas 614 seleções por parte de 153 indivíduos. De acordo com a Figura 3, observa-se que a ação mais vezes indicada pelos participantes foi a participação nas práticas de reciclagem (n=136), seguida pela procura por hábitos de consumo responsáveis (n=135) e procura por hábitos alimentares sustentáveis (n=115).

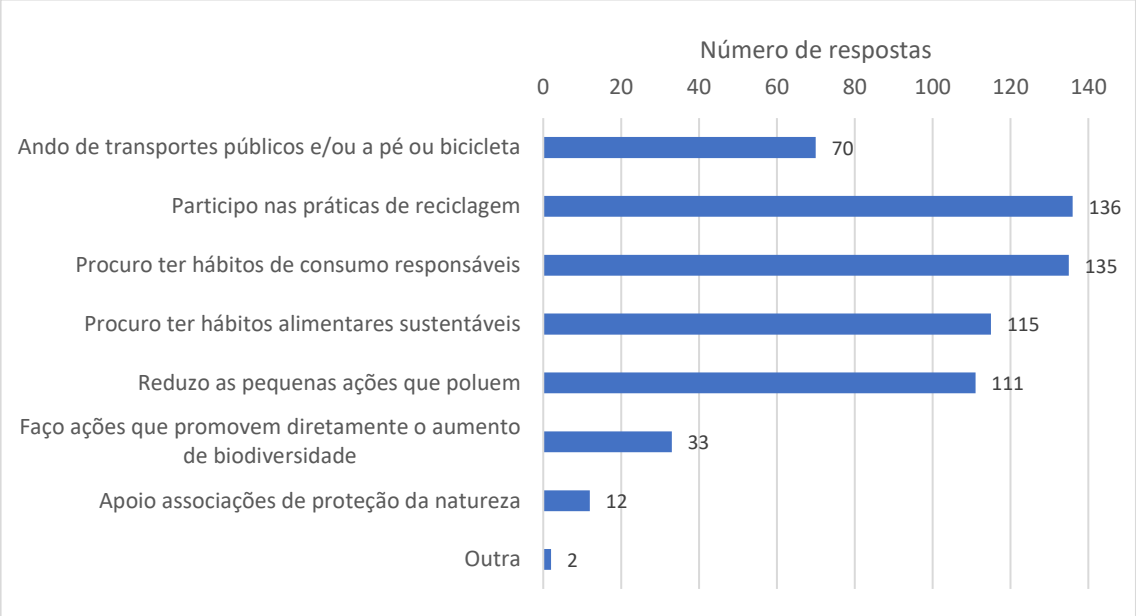


Figura 3 – Lista de ações que contribuem para travar a perda de biodiversidade apresentada no inquérito. Questão com possibilidade de seleção de tudo o que fosse aplicável e opção de resposta aberta.

Da totalidade dos inquiridos (n=154), apenas 6% indicou fazer ou já ter feito registos de biodiversidade na plataforma de ciência cidadã BioDiversity4All/iNaturalist e apenas estes responderam às questões específicas desta temática.

3.1.3 Resultados da temática das coberturas verdes

Conforme observado na Figura 4, do total dos 154 inquiridos, a maioria (66%) sabe o que são coberturas verdes, seguidos de 18% que não tem a certeza e 16% que indicou não saber o que são coberturas verdes. Para os inquiridos que respondiam na pergunta prévia não saber o que são coberturas verdes o questionário terminava e o formulário era enviado após indicação. Do total de 129 inquiridos que indicaram que sabem ou não têm a certeza, após a breve definição do que são coberturas verdes, o questionário passava para a pergunta “Alguma vez esteve em alguma cobertura verde?", à qual, conforme se pode observar na Figura 5, 47% indicou que já esteve numa cobertura, 43% indicou que não e apenas 9% selecionou não saber.

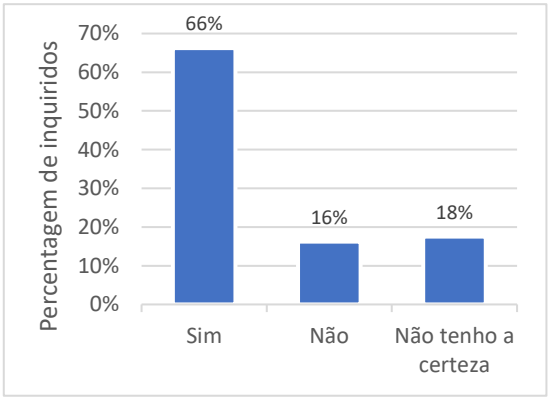


Figura 4 – Percentagens de respostas à pergunta “Sabe o que são coberturas verdes?" em percentagem. Total de 154 respostas.

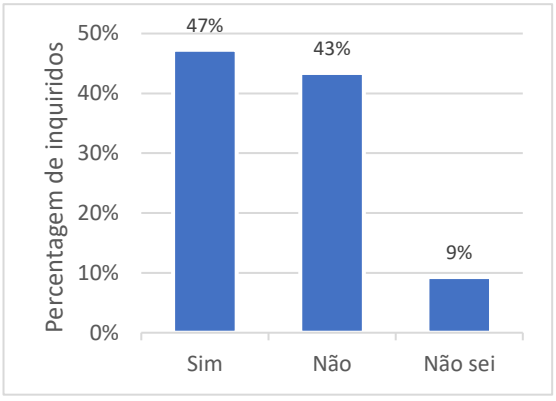


Figura 5 – Percentagens de respostas à pergunta "Alguma vez esteve em alguma cobertura verde?". Total de 129 respostas.

De acordo com a Figura 6 observa-se que, dos 57 inquiridos que indicaram local(s) em Lisboa em já estiveram numa cobertura verde, 54% selecionou a zona de “Alcântara – Ajuda – Belém”, a zona “Centro” foi referida por 32% dos inquiridos e a terceira zona mais selecionada foi “Olivais – Parque das Nações - Marvila”. A zona menos indicada foi a de “Carnide – Benfica”, apenas 4%.

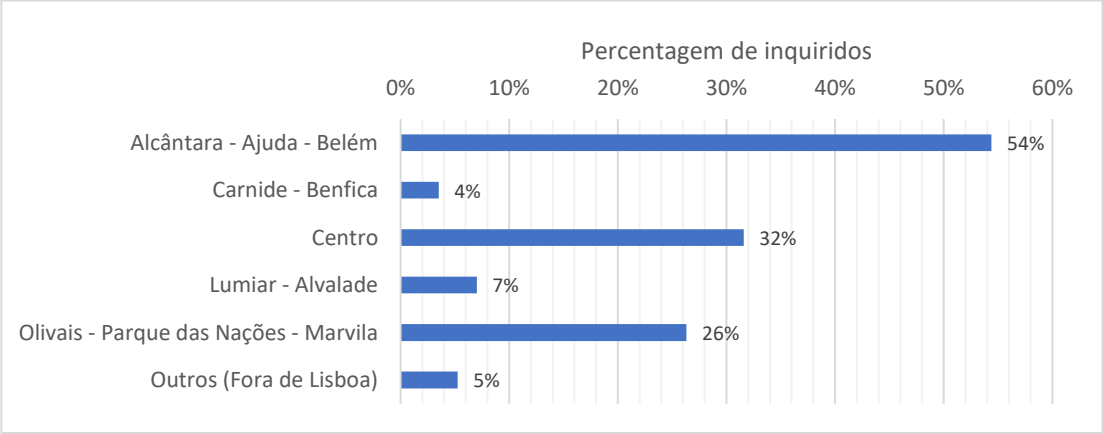


Figura 6 – Resultados em percentagem das respostas à pergunta "Caso já tenha estado numa cobertura verde em Lisboa, em que local(s) foi?". Questão com possibilidade de seleção de tudo o que fosse aplicável e opção de resposta aberta.

Relativamente às coberturas verdes serem uma mais-valia para as cidades, do total de 129 inquiridos, 70% indicou que sim, 17% acha que sim, mas em determinadas condições, 1% disse que não, e 12% indicou que não sabe.
Na questão aberta, e de resposta opcional, em que foi pedido aos inquiridos que enumerassem as vantagens das coberturas verdes que conhecem, foram obtidas respostas por parte de 86 indivíduos. Como se observa na Figura 7, as vantagens mais vezes referidas foram as relacionadas com a qualidade do ar (n=42) e as vantagens relativas à eficiência energética/comportamento térmico dos edifícios (n=42), seguidas das vantagens para a biodiversidade (n=33).

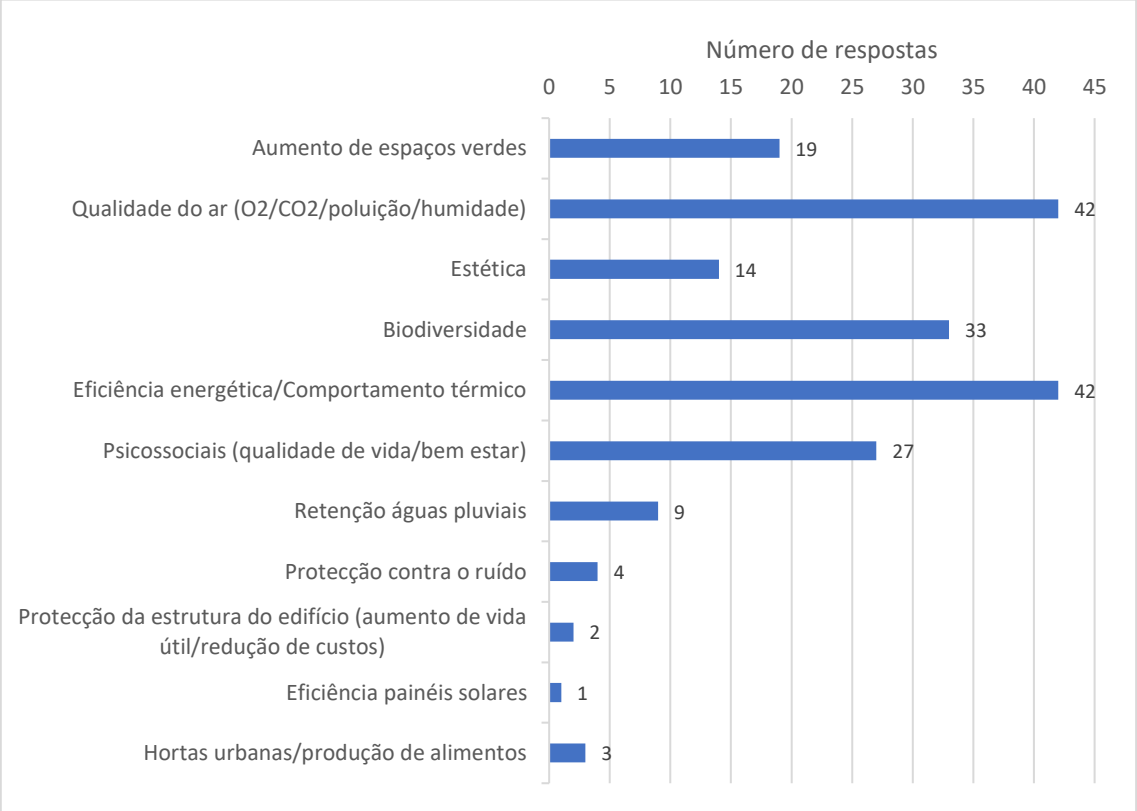


Figura 7 - Vantagens das coberturas verdes referidas pelos inquiridos em pergunta aberta.

Relativamente à opinião sobre políticas de incentivo de coberturas verdes, foram obtidas respostas por parte de 129 inquiridos. No caso das políticas de implementação sob a forma de obrigatoriedade de instalação, a maioria é a favor de obrigatoriedade de instalação de coberturas verdes para os três tipos de edifícios propostos. Conforme observado na Figura 8, no caso da obrigatoriedade de instalação em edifícios públicos, 50% é a favor em determinadas situações, 37% que é a favor, 8% indicou não ser a favor e apenas 5% indicou não saber. No caso da obrigatoriedade de instalação em edifícios comerciais e de serviços, 53% é a favor em determinadas situações, seguida de 34% que é a favor sem condicionantes, 7% indicou não ser a favor e 6% indicou não saber. No caso da obrigatoriedade de instalação em edifícios com mais de 400 m^2, a maioria de 43% dos inquiridos é a favor em determinadas

situações, seguida de 39% que é a favor sem condicionantes, 9% indicou não ser a favor e 10% indicou não saber.

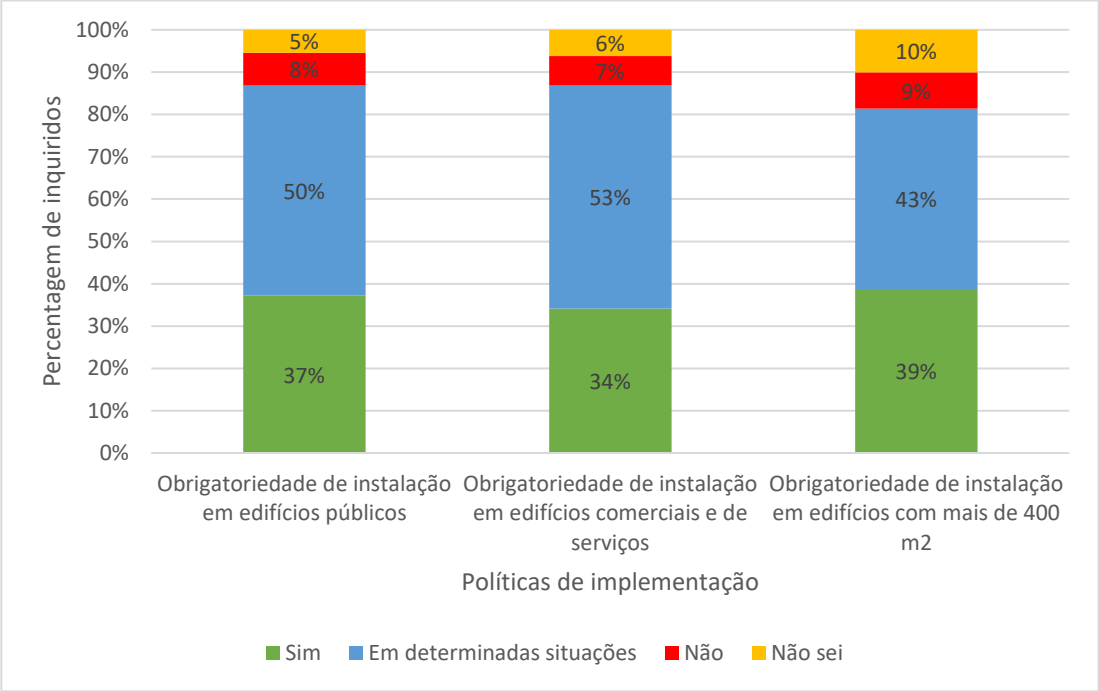


Figura 8 - Opinião dos inquiridos relativamente a políticas de obrigatoriedade de implementação de coberturas verdes.

No caso das políticas de investimento público em coberturas verdes, sob a forma de benefícios fiscais (deduções ou isenções fiscais), como se verifica na Figura 9, 67% são a favor, seguidos de 21% que são a favor em determinadas situações, apenas 5% são contra e 7% indicaram não saber. Relativamente aos subsídios financeiros (com o cumprimento de pré-requisitos) para a implementação de coberturas verdes, uma maioria de 53% de inquiridos é a favor, seguido de 29% de inquiridos que são a favor em determinadas situações, 12% são contra e 6% indicaram não saber.

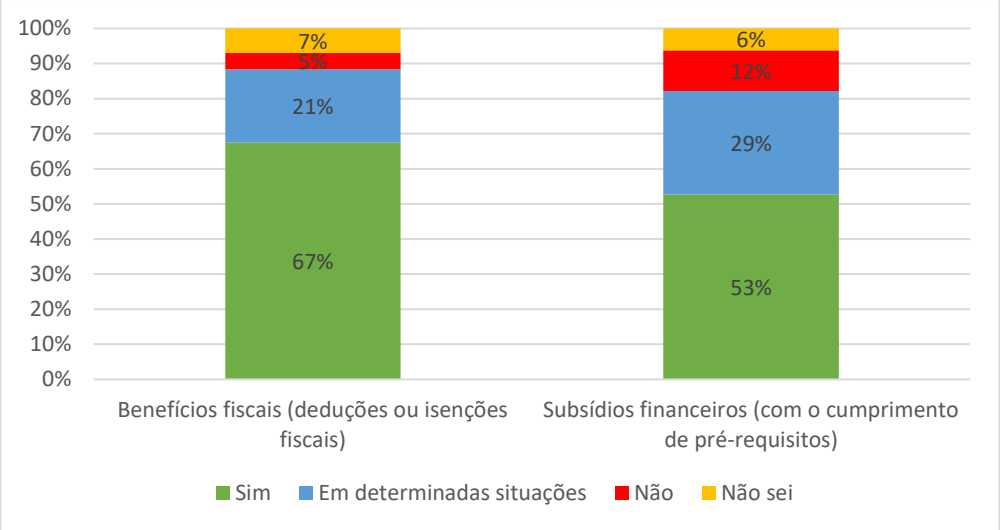


Figura 9 - Opinião dos inquiridos relativamente a políticas de investimento público em coberturas verdes.

Finalmente, procurou-se determinar a influência das variáves idade, género, escolaridade ou formação nas respostas obtidas. Relativamente à idade, os testes de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* (p=0,003) e o *Shapiro-Wilk (p=0,022)*, relevaram que a amostra não tem uma distribuição normal ($p < 0.05$). Assim, realizou-se o teste não paramétrico de independência Qui-quadrado para determinar se haveria relação entre a idade e as respostas dadas relativamente às questões da biodiversidade e das coberturas verdes. Segundo os resultados obtidos não se encontrou relação estatisticamente significativa entre as variáveis testadas. O mesmo teste foi realizado também para determinar se haveria relação entre cada uma das variáveis do género, escolaridade e formação, e as respostas obtidas relativamente às várias questões sobre coberturas verdes, não tendo sido encontrada relação estatisticamente significativa para as hipóteses testadas.

3.2 Discussão

Para aferir se a amostra deste estudo é uma boa representação da população trabalhadora de Lisboa, foram comparados os resultados a nível sociodemográfico com dados estatísticos disponíveis. Participaram neste estudo mais indivíduos do género feminino do que do género masculino, estes resultados estão em conformidade com os dados do Inquérito ao Emprego do INE de 2023, onde também se observa maior percentagem do género feminino na população ativa na Grande Lisboa (PORDATA, 2024). Os pesos das faixas etárias neste estudo apresentaram exatamente a mesma ordem dos Censos de 2021, para a população ativa na Grande Lisboa.

A grande maioria dos participantes deste estudo estavam na situação de trabalhador e trabalhador-estudante (no total de 97%), o que está em conformidade com a população alvo do estudo. Pela metodologia seguida na divulgação do questionário, este é um resultado espectável. A maioria dos indivíduos tinham escolaridade ao nível do ensino superior, o que é coincidente com os dados do Inquérito ao Emprego do INE de 2023 em que 42% da população ativa da Grande Lisboa possui ensino superior (PORDATA, 2024).

O conhecimento do termo biodiversidade parece estar muito bem estabelecido na população trabalhadora de Lisboa, mesmo numa amostra de indivíduos que, à partida, a maioria não tem uma formação de base na área das Ciências da Vida (apenas 6.5% indicou esta área de formação), 94% conhece e sabe o que significa o termo. Segundo dados de 2022, em Portugal há 103 Organizações não Governamentais de Ambiente (ONGA), das quais 24 estão em Lisboa, sendo o território do país (versão 2024 da NUTS-Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos) com maior número de ONGA, seguido por Vila Nova de Gaia com apenas 6 ONGA (PORDATA, 2024). Estes dados podem ser indicativos de que Lisboa pode ser uma zona com população particularmente sensível para as questões da biodiversidade, no entanto, seria necessário explorar esta questão nas outras zonas do país.
Os participantes deste estudo, à partida, são indivíduos que vivem ou trabalham perto de pelo menos uma cobertura verde, o que pode ter tido algum impacto para os resultados quanto à opinião sobre serem uma mais-valia para as cidades, grande maioria, disse que sim.
As zonas da cidade mais vezes indicadas pelos inquiridos, são áreas onde estão localizadas algumas coberturas emblemáticas, o que pode ter contribuído para a sua seleção. A ETAR de Alcântara, por exemplo, tem uma cobertura verde de quase 3 hectares, distinguida com o prémio Valmor, na época o maior telhado verde da Europa (Águas do Tejo Atlântico, Grupo Águas de Portugal. 2017). Na zona de Belém localiza-se o MAAT - Museu de Arte, Arquitetura e Tecnologia e o Centro Cultural de Belém (CCB), ambos com coberturas abertas ao público. Localizada na zona Centro está Fundação Calouste Gulbenkian e na zona do Parque das Nações, encontra-se o empreendimento Office Park EXPO que constitui o atual Campus de Justiça de Lisboa. Assim, o facto de algumas zonas da cidade terem sido pouco referidas, não estará relacionado com a inexistência de coberturas nessas zonas, mas poderá ser devido ao facto de passarem despercebidas à população.
Uma vez que 18% dos inquiridos indicou que não tem a certeza do que são coberturas verdes, parece ainda haver algum nível de dúvida sobre o que são exatamente estas estruturas. Já o elevado número de indivíduos que referiu a biodiversidade como uma das vantagens das coberturas verdes, poderá estar relacionado com o facto de o questionário ter perguntas relacionadas com o tema previamente às questões sobre coberturas verdes, podendo isto ter sugestionado os inquiridos.
Relativamente às políticas de obrigatoriedade de instalação de coberturas verdes, para os três tipos de edifícios propostos, parece haver alguma incerteza apesar da tendência ser a favor, uma vez que, a maioria respondeu ser a favor em determinadas situações. Estas políticas são menos populares que as políticas de investimento público, quer sobre a sob a forma de benefícios fiscais (deduções ou isenções) quer sob a forma de subsídios financeiros. Os benefícios fiscais são a forma de investimento público com mais apoiantes. No caso dos subsídios financeiros, há mais pessoas contra, em comparação com os benefícios fiscais.
Relativamente às políticas de obrigatoriedade de instalação, no caso de edifícios com mais de 400 m^2, o número de pessoas que indicou "Não sei" foi superior comparativamente às outras duas propostas do mesmo tipo, a dificuldade na noção de 400 m^2 pode, eventualmente, ter dificultado a tomada de opinião por parte de alguns inquiridos.

4 CONCLUSÕES

Em resumo, os resultados deste inquérito parecem indicar que o termo biodiversidade está bem estabelecido na população de Lisboa. No entanto, parece ainda haver algum nível de dúvida sobre o que são exatamente coberturas verdes (18% indicou que não tem a certeza do que são), por isso seria interessante saber se sucede o mesmo nos restantes centros urbanos do país.

A maioria das pessoas desta amostra considera as coberturas verdes uma mais-valia para as cidades, sendo também a maioria a favor de políticas de incentivo para a sua implementação.
Após a realização deste estudo, consideramos que seria interessante explorar os contributos que os cidadãos cientistas estão a dar para o conhecimento da biodiversidade em coberturas verdes. Assim, achamos pertinente uma análise futura relativamente às espécies que os cidadãos mais registam em coberturas verdes, através da análise de dados de ciência cidadã.

REFERÊNCIAS

Águas do Tejo Atlântico, Grupo Águas de Portugal (2017) Fábrica de Água de Alcântara distinguida com Prémio Valmor. Acedido em 29 de setembro de 2023, em: https://www.aguasdotejoatlantico.adp.pt/noticias/fabrica-de-agua-de-alcantara-distinguida-com-premio-valmor.

Brunori E., Salvati L., Mancinelli, R., Smiraglia, D., Biasi, R. (2017) Multi-temporal land use and cover changing analysis: the environmental impact in Mediterranean area. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 24(3):276–288. https://doi.org/10.1080/13504509.2016.1205156

Carter, T., & Fowler, L. (2008). Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. Environmental Management., 42(1), 151–164 https://doi.org/10.1007/s00267-008-9095-5

Claus, K., e Rousseau, S. (2012). Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for Flanders. Urban Forestry & Urban Greening, 11(4): 417-425. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.07.003

Huang, G. (2015) PM2.5 Opened a Door to Public Participation Addressing Environmental Challenges in China. Environmental Pollution, 197:313-315 https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.001

PORDATA (2024). Censos de 2021. Acedido em 18 de abril de 2024, em: https://www.pordata.pt/home.

PORDATA (2024). Inquérito ao Emprego do INE de 2023. Acedido em 18 de abril de 2024, em: https://www.pordata.pt/home.

PORDATA (2024). Inquérito às Organizações não Governamentais de Ambiente 2021. INE. Acedido em 18 de abril de 2024, em: https://www.pordata.pt/home.

Schueller, S.K., Paul, S., Payer, N., Schultze, R., Vikas, M. (2019) Urbanization decreases the extent and variety of leaf herbivory for native canopy tree species Quercus rubra, Quercus alba, and Acer saccharum. Urban Ecosyst, 22(5):907–916. https://doi.org/10.1007/s11252-019-00866-6

Sirakaya, A., Cliquet, A., Harris, J. (2018) Ecosystem services in cities: towards the international legal protection of ecosystem services in urban environments. Ecosyst Serv, 29:205–212. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.01.001

Wang, L., Wang, H., Wang, Y. Che, Y., Ge, Z., Mao, L. (2022) The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review. Biodiversity and Conservation, 31:1771–1796 https://doi.org/10.1007/s10531-022-02436-3

Zhang, G., Jin, H., Lu, J., He, BJ. (2022) Trends in Incentive Policies of Green Roof: An Overview. In: He, BJ., Prasad, D., Pignatta, G., Jupesta, J. (eds) Climate Change and Environmental Sustainability. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12015-2_12

Zhang, G., He, BJ., Dewancker, B. (2020) The maintenance of prefabricated green roofs for preserving cooling performance: A field measurement in the subtropical city of Hangzhou, China. Sustainable Cities and Society, 61: 2210-6707. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102314

Zhang, L., Fukuda, H., Liu, Z. (2019). Households' willingness to pay for green roof for mitigating heat island effects in Beijing (China). Building and Environment, 150:13–20. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.048

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

O USO DE UMA METODOLOGIA BASEADA EM DETEÇÃO REMOTA PARA MAPEAR E MONITORIZAR AS COBERTURAS VERDES EM AMBIENTE URBANO: O ESTUDO DE CASO DE LISBOA

Joana Marta PERNES[a], Ana Paula FALCÃO[b], Vasco MIRANDA[c], Cristina MATOS SILVA [d]

[a] Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, joana.pernes@tecnico.ulisboa.pt
[b] CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt
[c] CERENA - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, vasco.miranda@tecnico.ulisboa.pt
[d] CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, cristina.matos.silva@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A tendência de intensificação de construção em áreas urbanas potencia o desenvolvimento do fenómeno das ilhas de calor urbanas, traduzindo-se este no aumento da temperatura do ar entre 2 a 5%. Das várias estratégias identificadas para mitigar este efeito, o recurso à construção de coberturas verdes têm sido apontado como muito promissor, deste modo, é fundamental para o planeamento urbanístico dispor do mapeamento atualizado das coberturas verdes. Contudo, vários municípios referem dificuldade em obter esta caracterização, devido essencialmente à inexistência de informação geográfica atualizada.

O presente estudo concentra-se no mapeamento das coberturas verdes em Lisboa, utilizando imagens multiespectrais WorldView-2 disponibilizadas pela Agência Espacial Europeia em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. A metodologia desenvolvida visou agregar as coberturas verdes em tipologias, no topo dos edifícios (cobertura singular) ou ao nível do solo (cobertura de condomínio), e de acordo com essa classificação mapeá-las através de: i) combinação de índices de vegetação com operações de análise espacial; ii) aplicação de algoritmos de classificação por *machine learning*. Através desta metodologia foram identificados 200 edifícios na cidade de Lisboa com coberturas verdes.

Posteriormente, recorrendo a imagens Sentinel-2, monitorizou-se uma das emblemáticas coberturas verdes de Lisboa ao longo de 12 meses.

Palavras-chave: Coberturas Verdes, WorldView-2, Sentinel-2, Índices de vegetação, Machine Learning.

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas são uma das preocupações mais significativas que a humanidade enfrenta nos tempos que correm (Fawzy et al., 2020), abrangendo dimensões ecológicas, ambientais, sociais e econômicas (Abbass et al., 2022, Kemp et al., 2022). Nas áreas urbanas, este fenômeno merece especial atenção devido ao seu impacto ampliado: o aumento da temperatura do ar, fenômeno conhecido como ilhas de calor urbanas (Mutani et al., 2020); escassez de água devido à sua exploração excessiva, pressão no saneamento e inundações (Kookana et al., 2020); impactos na biodiversidade devido à alteração de habitats naturais (Ibáñez-Álamo et al., 2017); agregação excessiva da população, impactando a saúde humana e a propagação de doenças (Zhang et al., 2023).

Liberalesso et al. (2020) e Yuliani et al. (2020) destacaram a importância das Coberturas Verdes (CV) devido à sua diversidade de benefícios, desde a retenção de água da chuva, redução do escoamento de água e alívio da pressão nos sistemas de drenagem urbanos (Teotónio et al., 2021), à prevenção de problemas relacionados com poluição (Joshi & Teller, 2021), redução da quantidade de luz solar absorvida pelos telhados, mitigando assim o efeito de ilha de calor urbano e regulando as temperaturas dentro dos edifícios (Polo-Labarrios et al., 2020). A promoção da restauração da biodiversidade em áreas urbanas, tornando disponível um habitat natural para pássaros, insetos e outras formas de vida selvagem (Mayrand et al., 2018), bem como criação de oportunidades para atividades recreativas, envolvimento comunitário e bem-estar mental (Rezaei et al., 2020).

Por definição, as Coberturas Verdes (GR) representam um sistema de camadas (vegetação, substrato, drenagem) que facilitam e incentivam o crescimento de vegetação sobre uma construção (Manso et al., 2021, Shahmohammad et al., 2022). Essas estruturas podem ser instaladas em telhados ou ao nível do solo, sendo este último geralmente correspondente a uma cobertura de estacionamento subterrâneo compartilhada. Os Telhados Verdes podem ser classificados em três níveis de complexidade: extensivos, semi-intensivos e intensivos. Telhados Verdes extensivos têm um substrato raso, diversidade de plantas limitada e menores requisitos de manutenção. Telhados Verdes intensivos têm um substrato mais espesso, permitindo uma maior variedade de plantas, mas requerem mais manutenção e têm cargas estruturais mais elevadas. Os Telhados Verdes semi-intensivos ficam entre os dois, com uma profundidade de substrato e diversidade de plantas moderada (Manso et al., 2021). Reconhecendo a importância de construir CVs, a existência de um mapa atualizado e uma ferramenta de monitorização é essencial para um plano eficaz de gestão da infraestrutura verde das cidades. A identificação de coberturas verdes não é conceitualmente desafiadora, pois a dificuldade reside na inexistência de dados espaciais para apoiar seu mapeamento (por exemplo, Telhados verdes ao nível do solo geralmente correspondem a um condomínio com garagens em blocos e não há informações sobre os limites de garagens subterrâneas). A identificação *in-situ* é uma tarefa demorada sendo que o uso de imagens de satélite pode fornecer uma ferramenta valiosa para o mapeamento e monitorização em larga escala.
Addaboo (2016) desenvolveu uma metodologia para analisar e monitorar telhados verdes, utilizando as capacidades do Sentinel-1, Sentinel-2 e Landsat-8. O Sentinel-1 desempenhou um papel crucial no estudo, permitindo a recuperação de informações focadas nas características da superfície terrestre e nos níveis de umidade do solo, e o Sentinel-2 permitiu a estimativa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Este índice de vegetação permitiu o estudo das complexidades da

saúde vegetal e distingue entre estados secos e saudáveis, lançando luz sobre a dinâmica da vegetação urbana.

Gandini et al. (2023) propuseram uma metodologia para avaliar o potencial de cobertura verde ao nível do telhado e identificar locais ótimos para instalar novas infraestruturas verdes, especialmente CVs. Os autores destacaram o papel das soluções baseadas na natureza na mitigação de desafios ambientais, sociais e econômicos dentro de ambientes urbanos. A metodologia proposta (aplicada como estudo de caso na cidade de Donosti-San Sebastian) para estimar a cobertura verde ao nível do telhado envolveu a construção de um modelo digital de superfície com base em uma aquisição de dados Lidar. Esse modelo integra vários parâmetros, como temperatura da superfície terrestre, impermeabilidade, índice de vegetação por diferença normalizada e informações cadastrais. Dois resultados-chave emergem desse método: a determinação do potencial máximo de telhados verdes e uma priorização estratégica de telhados verdes. Esta última é particularmente intrigante, pois envolve a identificação de edifícios com maior potencial de arborização, garantindo uma abordagem direcionada para maximizar o impacto geral da infraestrutura verde na paisagem urbana.
Em Santos et al. (2016), uma análise meticulosa das áreas verdes em Lisboa foi apresentada, empregando visualizações 2D e 3D. A solução 2D concentrou-se em identificar vegetação existente ao nível do solo. Alavancando o NDVI como uma métrica pivotal, com um limiar discernente de 0,03, uma imagem WorldView-2 foi utilizada para elaborar um mapa detalhado da vegetação ao nível do solo em Lisboa. A solução 3D, por outro lado, adentrou num conjunto de dados mais intrincado. Utilizando um modelo digital de superfície derivado de dados Lidar e os limites de implementação dos edifícios de Lisboa, o estudo integrou classificação de imagem, modelagem 3D e análise solar. A sinergia desses processos culminou num mapa abrangente destacando telhados que exibem características propícias a CVs.
Wu & Biljecki (2021) empreenderam a tarefa de mapear CVs e painéis fotovoltaicos em 17 cidades, abrangendo locais como Las Vegas, Zurique, Singapura e Vancouver. O estudo utilizou uma variedade de fontes de imagens, como os produtos Vivid da Maxar, Nearmap e imagens aéreas do USDA's NAIP 2011–2013 e da Dinamarca, Finlândia e Alemanha. As imagens de satélite de Luxemburgo foram obtidas no repositório de dados abertos da cidade. Os pesquisadores implementaram uma metodologia de aprendizado profundo. Um modelo U-net modificado foi treinado usando telhados verdes e painéis solares. O modelo também foi alimentado com o limite de implementação de edifícios como entrada de previsão. Esta abordagem facilitou o desenvolvimento de um modelo capaz de identificar e classificar telhados verdes e painéis solares. Os resultados do estudo são duplos. Em primeiro lugar, fornece uma medida quantificável para a sustentabilidade dos telhados em todas as cidades estudadas. Em segundo lugar, a pesquisa gera mapas detalhados mostrando a distribuição de telhados verdes e painéis solares nas 17 paisagens urbanas diversas. Esta metodologia avança a nossa compreensão da sustentabilidade urbana e também oferece uma ferramenta prática para planeadores urbanos e decisores políticos avaliarem e melhorarem o impacto ambiental dos telhados.
Apesar de apresentarem valiosos contributos, os estudos mencionados não oferecem uma estratégia para mapeamento de coberturas verdes a nível do solo e no topo dos edifícios.

Neste artigo, apresentamos uma metodologia baseada em deteção remota para identificar telhados verdes num ambiente urbano e monitorizar as coberturas verdes do jardim da Gulbenkian, com base

em imagens de satélite (worldview-2 e sentinel-2). Em edifícios mais antigos, os telhados verdes estão localizados ao nível do telhado, permitindo sua identificação usando apenas a combinação de bandas para produzir índices de vegetação, mas em edifícios mais recentes, a CV pode estar localizada ao nível do solo e geralmente corresponde a uma garagem ou um espaço subterrâneo que pertence a mais de um edifício, para o qual não há informação espacial disponível, tornando a identificação mais complexa, já que se mistura com pequenos jardins. Esta última situação foi abordada usando um algoritmo de classificação de aprendizado profundo. O estudo de caso é na cidade de Lisboa, Portugal.

2 DADOS E MÉTODOS / CASO DE ESTUDO

2.1 METODOLOGIA

Baseada em imagens de satélite, a metodologia proposta compreende duas abordagens para mapeamento e uma abordagem para monitorização. No que diz respeito ao mapeamento, uma abordagem é adaptada para coberturas verdes ao nível dos telhados dos edifícios (CVE) sendo também apelidadas de coberturas verdes singulares, e a outra abordagem é adaptada à identificação de coberturas ao nível do solo, especificamente em condomínios (CVC), ou coberturas verdes partilhadas. A metodologia proposta é apresentada no seguinte fluxograma (Figura 1).

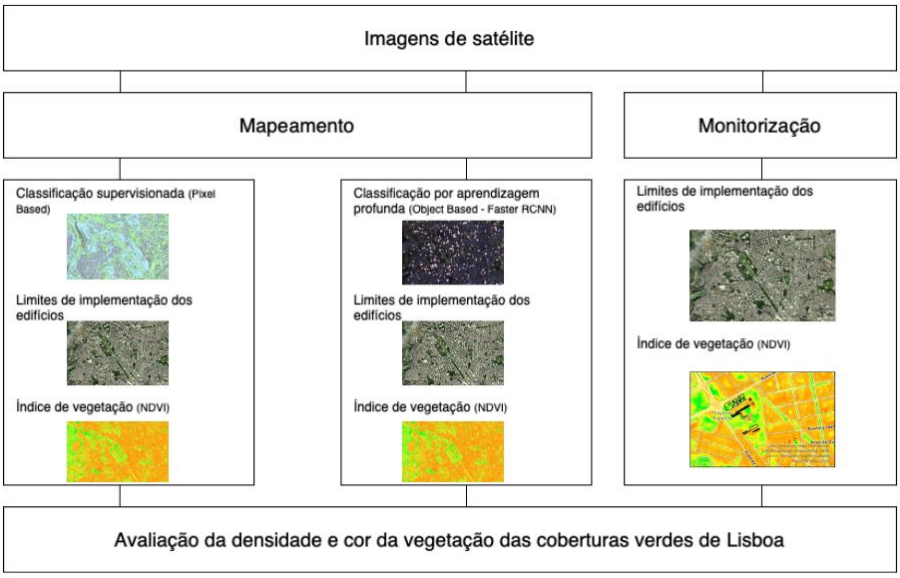


Figura 1 – Fluxograma da metodologia proposta, para mapeamento e monitorização de coberturas verdes

Para o mapeamento de CVE será realizada uma classificação supervisionada baseada no valor espectral dos pixéis por forma a identificar as áreas de Lisboa onde os telhados são constituídos por telhas. Os resultados da classificação serão cruzados com o limite de implantação dos edifícios, de modo que estes possam ser excluídos do conjunto de dados. Em seguida, e tirando partido das propriedades espectrais da vegetação, será utilizado um índice de composição de bandas para identificar as CVs em ambos os cenários (CVE e CVC), bem como na monitorização do jardim Gulbenkian. Vários índices de

vegetação podem calculados, dependendo das características da imagem de satélite, incluindo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Este índice é composto por duas bandas distintas: a banda Vermelha (R) e a banda do infravermelho próximo (NIR):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

O índice NDVI atribui a cada pixel da imagem um valor, que pode variar entre -1 e 1, sendo que este parâmetro permite avaliar o estado de saúde da vegetação, isto é, quanto maior a densidade das folhas e maior a presença de clorofila, mais perto do 1 será o valor do pixel e, por essa razão, é possível obter uma medida geral do estado de saúde da vegetação. A identificação de CVE será feita cruzando o resultado do NDVI com o limite de implementação dos edifícios num ambiente GIS, selecionando apenas os edifícios que contenham valores de NDVI acima de um limite específico.

Para o cenário correspondente ao mapeamento de CVC é necessária uma abordagem mais complexa, pois a infraestrutura verde não pertence a um edifício individual, mas a um espaço partilhado entre edifícios, que geralmente é confundido com jardins do ponto de vista espectral. Para situações em que as informações espaciais sobre os espaços verdes privados não estão disponíveis, é necessário um passo extra para identificá-las. Para essa tarefa, tipifica-se os condomínios com base em formas geométricas, e aplica-se um algoritmo de aprendizagem profunda para identificar a forma dos condomínios.

Para a monitorização, será realizada uma avaliação do NDVI das coberturas verdes do jardim da Gulbenkian, ao longo de um ano civil.

2.1.1 Mapeamento de coberturas verdes no topo dos edifícios

Dado que os telhados verdes localizados no topo dos edifícios requerem que os próprios telhados não sejam constituídos por telhas, é necessário identificá-los para permitir a sua eliminação do conjunto de edifícios. Para esse efeito, foi realizada uma classificação supervisionada, considerando o valor do pixel. Para a classificação, foram definidas 4 classes:

1. Telhados constituídos por telhas;
2. Água;
3. Vegetação;
4. Restantes objetos.

Para estudar a qualidade do modelo, foram gerados 100 pontos de controlo onde o verdadeiro valor espectral de cada ponto foi confirmado. Após este procedimento, gerou-se a matriz de confusão para analisar o kappa e a precisão do modelo. O kappa visa medir a concordância entre a classificação e os valores verdadeiros oferecendo uma medida geral da qualidade do modelo, e a precisão foca-se nos falsos positivos, ou seja, nos pixéis que estão associados a uma classe que não a correta. A precisão do modelo de classificação é de 0,95, enquanto que o kappa obtido tem o valor 0,91. O resultado da classificação foi transformado em polígonos de modo a que, utilizando variadas funções de análise espacial, fosse possível sobrepor os polígonos resultantes da classificação com os limites de implantação dos edifícios (LE). Estes limites foram fornecidos pela Câmara Municipal de Lisboa sob a forma de uma *layer* com 54 800 polígonos, onde cada polígono representa um edifício. Ao sobrepor a área de telhados com telhas sobre os LE, determinou-se a proporção de edifícios ocupados por telhas

vermelhas, e recorrendo a dados estatísticos (média, desvio padrão e mediana da proporção de telhas vermelhas para a área total do edifício), todos os edifícios com uma proporção superior a 64,71% (valor mediano do rácio área constituída por telhas/área dos edifícios) foram eliminados. Com este primeiro passo, o universo foi reduzido para 27.401 polígonos. Seguidamente e recorrendo a uma imagem do satélite WorldView-2 aplicou-se o índice NDVI (figura 2).

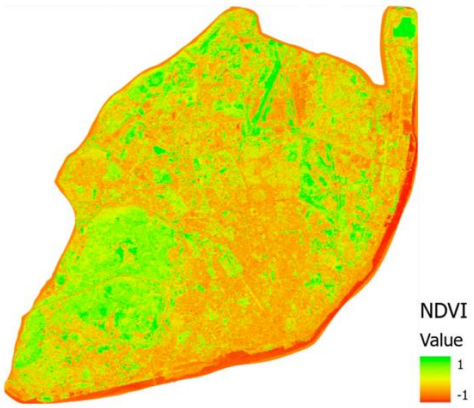


Figura 2 – Índice NDVI aplicado à imagem worldview-2 de Lisboa

Uma vez que uma equipa da CML fez o levantamento das coberturas verdes existentes na cidade em 2022, e que esse conjunto de dados nos foi cedido computou-se as estatísticas referentes ao NDVI das CVs identificadas pela CML e definiu-se como limite de possível cobertura verde todos os pixéis NDVI com valor igual ou superior a 0,3, sendo que este valor corresponde à media de NDVI do conjunto de dados da CML

O NDVI da cidade de Lisboa foi recortado pelos limites dos 27.401 polígonos e transformado em pontos, onde apenas os pontos com um NDVI igual ou superior a 0,3 são mantidos. Desta forma, todas as áreas que não são de interesse (estradas públicas, jardins, praças) são eliminadas. Os pontos NDVI foram anexados aos edifícios de modo que a cada edifício correspondessem um ou vários pontos, com esta informação calculou-se a área da cobertura verde (número de pontos x área do pixel), e o rácio de cobertura verde (área de cobertura verde/ área do polígono).

Edifícios com um número nulo de pontos foram removidos do conjunto de dados, reduzindo o universo para 8.656 polígonos. As copas das árvores existentes nas ruas de Lisboa, caso estejam a um nível mais elevado que o topo dos edifícios, podem ser projetadas para o topo dos mesmos o que pode ser facilmente confundido com uma cobertura verde. Nesses casos, os pontos NDVI localizam-se nas extremidades dos edifícios, recorrendo a um buffer negativo, reduziram-se todos os edifícios em 3,6 metros de cada lado (3 vezes o tamanho do pixel), e eliminou-se todos os edifícios com um número nulo de pontos diminuindo assim o universo para 3.423 polígonos.

Seguidamente foi feita uma divisão entre edifícios grandes (área superior e igual a 2000 m^2) e edifícios com áreas reduzidas (área inferior a 2000 m^2). Para edifícios com áreas grandes é relevante analisar a possível existência de coberturas verdes consoante o valor absoluto da área da cobertura, para edifícios com dimensões mais reduzidas o principal foco é a percentagem de área do edifício correspondente a CV. No conjunto de edifícios com uma área inferior a 2000 m^2 foram selecionados apenas os edifícios cujo rácio de cobertura verde fosse igual ou superior à mediana + desvio padrão do

rácio de cobertura, ou os edifícios cuja área de cobertura verde fosse superior a 200 m^2. Tendo em conta esta seleção, partiu-se de um universo com 1009 polígonos, onde após validação foram identificadas 13 CVs. A escolha destes parâmetros de seleção vai ao encontro das politicas de implementação de coberturas verdes definidas pelo Município de Barcelona, Espanha. Para os 371 edifícios com área superior a 2000 m^2, validaram-se como CVs 43 edifícios. Alguns edifícios foram submetidos a uma validação *in-situ* devido à impossibilidade de os validar remotamente.

2.1.2 Mapeamento de coberturas verdes no topo das garagens de condomínios

Para lidar com o desafio único de identificar coberturas verdes instaladas em espaços partilhados entre um conjunto de edifícios implementou-se um processo de classificação não tradicional. Este processo, envolve a utilização de um algoritmo de deteção de objetos, utilizando técnicas de aprendizagem profunda, nomeadamente a rede neuronal convolucional baseada em regiões mais rápidas (*Faster RCNN*). Os espaços verdes partilhados são frequentemente indicativos de coberturas verdes de Condomínio (CVC) e os mesmos exibem formas distintivas ainda que possam sofrer algumas variações (figura 3).

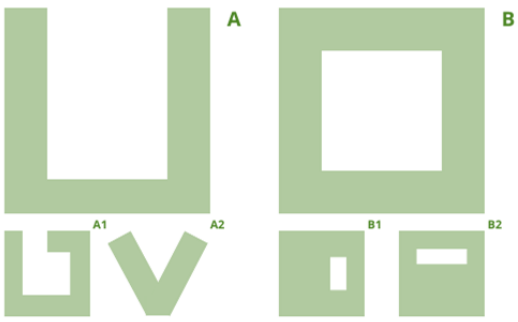


Figura 3 – Geometria usual de condomínios

Utilizaram-se os edifícios com as geometrias identificadas na figura 3 para a definição de um conjunto de dados de treino com duas classes distintas, correspondendo cada classe a uma forma e suas variações:

1. A e variações
2. B e variações

Foram selecionadas no total 150 amostras para conjunto de dados de treino. À semelhança da metodologia para identificação de coberturas verdes no topo dos edifícios, também esta metodologia foi meticulosamente executada dentro do ambiente ArcGIS Pro. O produto da classificação via deep learning é uma layer com 4 015 polígonos (figura 4) e após analisar os dados estatísticos referentes ao resultado da classificação, estabeleceu-se como *threshold* 0,87 sendo este valor a média da confiança no modelo, assim, todos os polígonos com este parâmetro inferior a 0,87 foram eliminados.

Figura 4 – Produto da classificação via aprendizagem profunda – *Faster RCNN*

Uma vez que vários polígonos coincidiam, todos os 4 015 elementos foram submetidos a uma operação onde as fronteiras que se intersectam são dissolvidas. À semelhança da metodologia para identificação de coberturas verdes singulares, ao resultado do modelo foi também anexado pontos NDVI, onde todos os polígonos com valores de NDVI inferiores a 0,3 foram desconsiderados. De um universo total de 4 015 polígonos, 371 foram submetidos a uma validação onde 150 foram validados (figura 5).

Figura 5 – Resultado do modelo *Faster RCNN* pós validação

2.2 MONITORIZAÇÃO DAS COBERTURAS VERDES DO JARDIM DA GULBENKIAN

O jardim da Gulbenkian, destaca-se pela sua localização central na cidade de Lisboa e pela existência neste jardim de estruturas de coberturas verdes em cotas diferentes. Para realizar uma análise aprofundada do NDVI das CVs ao longo de um ano civil, uma série de 12 imagens do Sentinel-2. Essas imagens, adquiridas mensalmente de janeiro a dezembro de 2023, formam um conjunto de dados temporais abrangente.

Após a aquisição das imagens, computa-se o índice de vegetação com diferença normalizada para cada imagem de satélite (Figura 6). Este processo gerou uma série temporal capturando as alterações da vegetação ao longo do período de tempo especificado.

Figura 6 – Serie temporal do NDVI correspondente ao Jardim da Gulbenkian ao longo de 1 ano civil.

Utilizando o acesso ao limite da implementação dos edifícios constituintes do jardim da Gulbenkian, a imagem do NDVI foi recortada precisamente. Esse recorte meticuloso resultou numa série temporal especializada de imagens de NDVI exclusivamente dedicadas às CVs dentro do Jardim da Gulbenkian.

Na fase subsequente da análise, métricas estatísticas foram calculadas para cada mês, fornecendo uma compreensão abrangente das variações temporais do NDVI. As estatísticas calculadas englobaram os valores médio, máximo e mínimo do NDVI (Figura 7). Uma observação importante surgiu desta análise estatística: maio apresentou o maior valor médio de NDVI, 0,38399, enquanto novembro registrou o menor valor médio, 0,30944. Estes valores alinham-se com o contexto sazonal, maio corresponde ao final da primavera, um período caracterizado por uma vegetação exuberante, enquanto novembro marca o final do outono, uma estação normalmente associada a um decréscimo do NDVI.

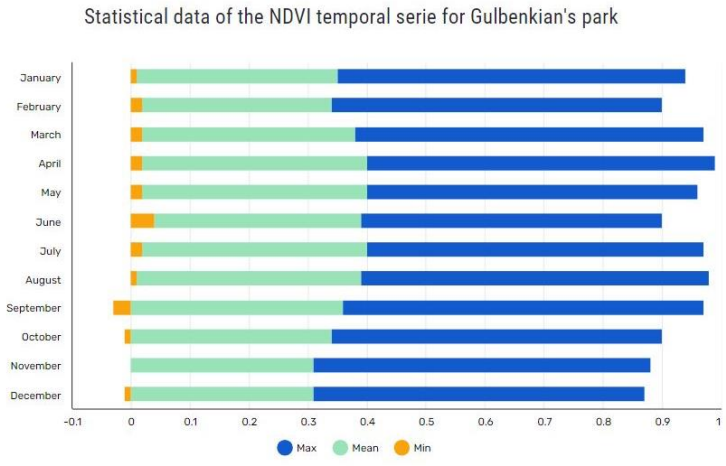


Figura 7 – Dados estatísticos relativos ao NDVI da serie temporal da Gulbenkian.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após validação de possíveis edifícios com coberturas verdes onde se validaram 200 edifícios, procedeu-se à distribuição dos mesmos pelas 24 freguesias de Lisboa (Figura 8). A freguesia com maior ocorrência de prédios com coberturas verdes é o Parque das Nações com 75 edifícios identificados, seguido de Belém com 22 edifícios. No espectro oposto, na freguesia da Penha de França e no Beato não foram identificados quaisquer edifícios com presença de cobertura verde.

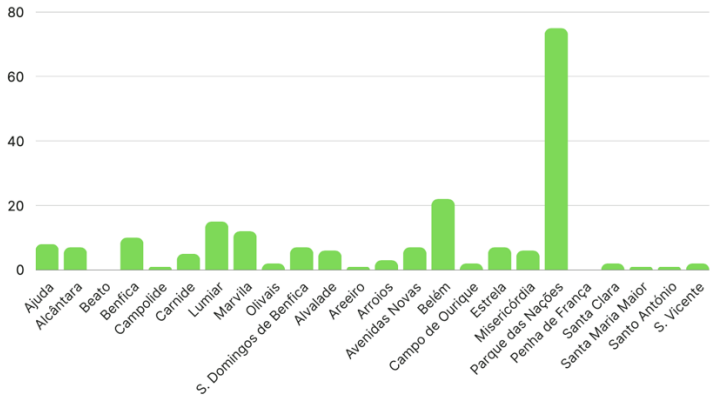


Figura 8 – Distribuição de edifícios com coberturas verdes por freguesias de Lisboa

Saber a quantidade de edifícios com coberturas verdes por freguesia constitui um importante passo no planeamento urbano para o desenvolvimento de uma cidade mais sustentável, porém as coberturas verdes não são os únicos espaços com vegetação na cidade de lisboa. Há que ter em consideração os parques e jardins, e ponderar de forma sensata locais estratégicos onde a instalação de novas coberturas verdes é mais proveitosa. Os seguintes mapas temáticos mostram as freguesias com mais edifícios com coberturas verdes (Figura 9) e as freguesias com mais parques e jardins (Figura 10).

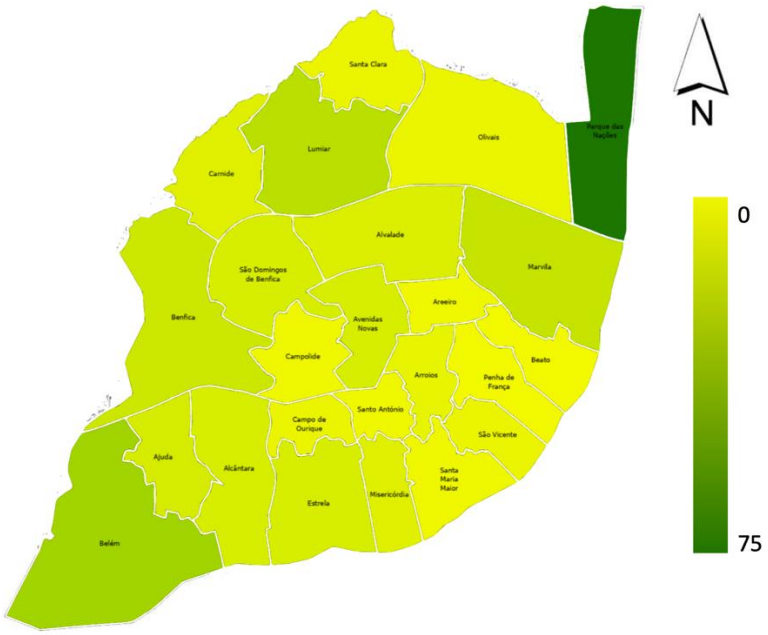


Figura 9 – Mapa temático relativo à distribuição de edifícios com coberturas verdes por freguesias de Lisboa

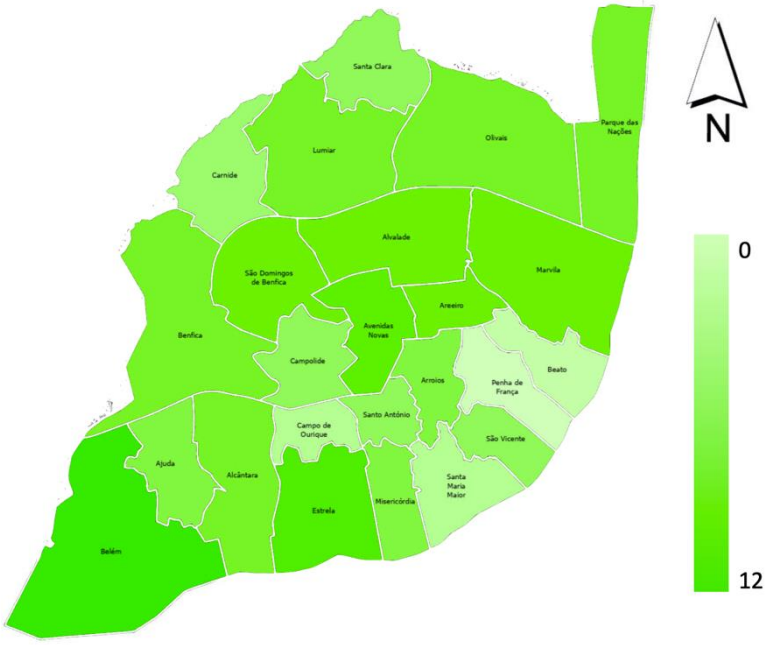


Figura 10 – Mapa temático relativo à distribuição de parques e jardins por freguesias de Lisboa

Após analisar ambos os mapas temáticos, considera-se que as freguesias onde a urgência de instalação de coberturas verdes é maior, são as freguesias a sudeste (Penha de França, Beato, Santa Maria Maior), Campo de Ourique, a Norte a freguesia de Santa Clara e a Noroeste Carnide. Apesar de Areeiro, Campolide, Santo António, Santa Maria Maior e Olivais serem pouco fartas em coberturas verdes, estas têm parques e jardins o que acaba por compensar a baixa frequência de CVs.

4 CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo, foram sentidas algumas adversidades. A imagem de satélite worldview-2 não se encontrava devidamente georreferenciada, sendo que este desfasamento é característico do processo de aquisição da imagem e apesar de terem sido aplicados métodos para o contrariar, não foi possível resolver o problema de georreferenciação a 100%. Outro aspeto importante a ser mencionado é a desatualização dos dados cedidos pela CML, no conjunto de dados referente ao limite da implementação dos edifícios de Lisboa é possível encontrar o limite de implementação de edifícios já demolidos, e, para muitos edifícios/condomínios, não existe informação relativa aos limites das garagens. Apesar dos constrangimentos foi possível identificar 200 edifícios com coberturas verdes, sendo que consideramos o método eficaz para o mapeamento de coberturas verdes. Esta metodologia pode ser aplicada a outras cidades visto não terem sido utilizadas propriedades únicas da cidade de Lisboa, e espera-se que em cidades de maiores dimensões seja possível encontrar mais edifícios com coberturas verdes a nível do solo, uma vez que quanto maior for o conjunto de dados de treino melhor será a precisão do modelo.

Numa próxima fase seria interessante avaliar, através da metodologia proposta para monitorização de CVs, as coberturas verdes identificadas nos 200 edifícios.

REFERÊNCIAS

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(28), 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Addabbo, P., Focareta, M., Marcuccio, S., Votto, C., & Ullo, S. L. (2016). Contribution of Sentinel-2 data for applications in vegetation monitoring. *ACTA IMEKO*, *5*(2), 44. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v5i2.352

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *18*(6), 2069–2094. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w

Gandini, A., Navarro, D., & Feliu, E. (2023). Identification and mapping of areas and buildings with high roof greening potential. *2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/JURSE57346.2023.10144157

Ibáñez-Álamo, J. D., Rubio, E., & Bitrus Zira, K. (2017). The Degree of Urbanization of a Species Affects How Intensively It Is Studied: A Global Perspective. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *5*. https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00041

Joshi, M. Y., & Teller, J. (2021). Urban Integration of Green Roofs: Current Challenges and Perspectives. *Sustainability*, *13*(22), 12378. https://doi.org/10.3390/su132212378

Kemp, L., Xu, C., Depledge, J., Ebi, K. L., Gibbins, G., Kohler, T. A., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J., Steffen, W., & Lenton, T. M. (2022). Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(34). https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119

Kookana, R. S., Drechsel, P., Jamwal, P., & Vanderzalm, J. (2020). Urbanisation and emerging economies: Issues and potential solutions for water and food security. *Science of The Total Environment*, *732*, 139057. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139057

Liberalesso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, *96*, 104693. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693

Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110111. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111

Mayrand, F., & Clergeau, P. (2018). Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity? *Sustainability*, *10*(4), 985. https://doi.org/10.3390/su10040985

Mutani, G., & Todeschi, V. (2020). The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. *Atmosphere*, *11*(2), 123. https://doi.org/10.3390/atmos11020123

Polo-Labarrios, M. A., Quezada-Garciá, S., Sánchez-Mora, H., Escobedo-Izquierdo, M. A., & Espinosa-Paredes, G. (2020). Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering*, *21*. https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100697

Rezaei, M., Emmanuel, N., Kim, J., & Kim, D. H. (2021). Analyzing the Impact of Green Roof Functions on the Citizens' Mental Health in Metropolitan Cities. *Iranian Journal of Public Health*. https://doi.org/10.18502/ijph.v50i5.6107

Santos, T., Tenedório, J., & Gonçalves, J. (2016). Quantifying the City's Green Area Potential Gain Using Remote Sensing Data. *Sustainability*, *8*(12), 1247. https://doi.org/10.3390/su8121247

Shahmohammad, M., Hosseinzadeh, M., Dvorak, B., Bordbar, F., Shahmohammadmirab, H., & Aghamohammadi, N. (2022). Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(52), 78228–78254. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23405-x

Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 69). https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781

Wu, A. N., & Biljecki, F. (2021). Roofpedia: Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, *214*, 104167. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167

Yuliani, S., Hardiman, G., & Setyowati, E. (2020). Green-Roof: The Role of Community in the Substitution of Green-Space toward Sustainable Development. *Sustainability*, *12*(4), 1429. https://doi.org/10.3390/su12041429

Zhang, Z., Zhao, M., Zhang, Y., & Feng, Y. (2023). How does urbanization affect public health? New evidence from 175 countries worldwide. *Frontiers in Public Health*, *10*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1096964

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DO RISCO SÍSMICO NO PREÇO DO IMOBILIÁRIO: UMA ANÁLISE DE PREFERÊNCIAS REVELADAS

João Fragoso Januário[a]; Carlos Oliveira Cruz[b]; Humberto Varum[c]; Vítor Faria e Sousa[d]

[a]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, joaodfjanuario@tecnico.ulisboa.pt

[b]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, oliveira.cruz@tecnico.ulisboa.pt

[c]CONSTRUCT-LESE, FEUP, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, oliveira.cruz@tecnico.ulisboa.pt

[d]CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal, vitor.sousa@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A região de Lisboa apresenta uma suscetibilidade a eventos sísmicos bem conhecida e documentada. Aproximadamente 27,3% dos edifícios residenciais na Área Metropolitana de Lisboa foram construídos antes da implementação de regulamentações sísmicas. Esta percentagem aumenta para 63,9% se se considerar os edifícios residenciais exclusivamente no município de Lisboa. Apesar do risco reconhecido, observou-se recentemente uma significante subida nos preços imobiliários em Lisboa, com investidores e residentes adquirindo propriedades a preços cada vez mais elevados, independentemente da sua vulnerabilidade sísmica. O mercado aparenta desconsiderar as potenciais consequências de um terramoto, sendo que, a larga maioria dos imóveis não possui seguro com cobertura de risco sísmico. Este estudo utiliza uma base de dados de 8 000 vendas de imóveis entre 2008 e 2018 e tem como objetivo investigar se os valores de mercado refletem uma preferência por propriedades menos vulneráveis a sismos. Para tal, utilizou-se uma regressão de *Fixed-Effects* com diferentes níveis de agregação de dados. A análise da literatura e os resultados indicam que o mercado não demonstra uma preferência clara por imóveis menos vulneráveis. Conclui-se que existe uma preferência por edificações mais novas ou renovadas, possivelmente menos vulneráveis, motivado não pela preocupação com a segurança, mas pelas amenidades oferecidas, como a condição do imóvel e a proximidade a áreas valorizadas.

Palavras-chave: Lisboa, mercado imobiliário, preços dos imobiliário, preferências reveladas, sismos

1 INTRODUÇÃO

O mercado imobiliário global está avaliado em, aproximadamente, US$ 217 biliões, constituindo quase 60% dos ativos globais totais (Leilani, 2017), com o mercado residencial formando o segmento mais representativo (75% do total). Lisboa, a capital portuguesa, tem observado um aumento significativo nos preços imobiliários na última década. Em 2012, foram transacionados 2,38 mil milhões de euros em imóveis residenciais na Área Metropolitana de Lisboa (AML), um valor que aumentou para 13,26 mil milhões de euros em 2022, representando um aumento de 557% em cerca de uma década. Por outro lado, Lisboa é uma região de risco sísmico moderado, tendo sido o palco de um dos mais catastróficos do século XVIII. Apesar do conhecido risco, cerca de 27,3% dos edifícios residenciais na AML foram construídos antes da implementação de quaisquer regulamentações sísmicas. Essa percentagem aumenta para 63,9% quando se consideram os edifícios residenciais exclusivamente no município de Lisboa (Borges et al., 2011; Costa et al., 2008).

O mercado imobiliário parece alheio ao risco com residentes e investidores a adquirirem propriedades a preços cada vez mais elevados. A falta de cobertura de seguro sísmico por muitos imóveis e o facto de elevada taxa de imóveis habitados pelos seus proprietários, aumentam a exposição do mercado, agravando ainda mais esse risco. De forma similar aos restantes países do sul da Europa, a compra da primeira casa é um cultural de passagem à fase adulta de qualquer cidadão, levando a que uma grande parte da riqueza das famílias portuguesas esteja concentrada em imóveis, predominantemente em residências primárias (INE, 2020). Na eventualidade da ocorrência de um evento semelhante ao de 1755, estudos anteriores estimam que o número de mortes na AML poderia ultrapassar 12 000, com vários milhares de edifícios severamente danificados ou colapsados (Costa et al., 2008). Como tal, seria de esperar que o aumento do risco fosse traduzido em descontos/prémios de mercado para os imóveis mais/menos vulneráveis.

Este estudo propõe-se a responder uma hipótese de pesquisa: "Os valores de mercado refletem uma preferência por propriedades menos vulneráveis a terramotos?". Para responder a esta questão, este artigo está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão abrangente da literatura, mostrando estudos anteriores sobre os efeitos da perceção de risco nos preços das habitações.
- O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso, com uma visão geral do *stock* habitacional de Lisboa.
- O Capítulo 4 apresenta a metodologia seguida para responder à questão de investigação proposta. Uma base de dados contendo mais de 8 000 transações de 2008 a 2018 servirá de base para esta análise. Serão utilizados vários níveis de agregação para garantir a robustez dos resultados.
- O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos por cada modelo, seguidos de uma breve discussão à luz da revisão da literatura.
- No Capítulo 6 são apresentadas algumas considerações finais.

Este artigo visa contribuir para a literatura existente sobre os efeitos da perceção de risco nos preços do mercado imobiliário, especialmente na perceção dos *stakeholders* imobiliários sobre os riscos naturais. No final, deverá oferecer *insights* sobre o processo de tomada de decisão na ponderação dos riscos sísmicos em locais de moderada sismicidade. Tendo Lisboa como o caso de estudo, investidores e decisores políticos deverão ser capazes de beneficiar dos contributos desta investigação, permitindo a sua aplicação noutras geografias, em locais com o sul de Espanha, Roménia, Eslovénia ou qualquer outra região com risco sísmico moderado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 NOTA METODOLÓGICA

A revisão de literatura foca-se, sensivelmente, nos últimos 20 anos, selecionando essencialmente artigos de 2000 a 2020, utilizando bases de dados como Web of Science, Science Direct, Elsevier e Google Scholar. Inicialmente, foram considerados artigos em inglês sobre risco no mercado imobiliário e risco de desastres naturais, principalmente em regiões de elevada atividade sísmica como os Estados Unidos, Irão, Japão e Turquia. Posteriormente, a análise centrou-se em Portugal e na Área Metropolitana de Lisboa, incluindo trabalhos em português sobre risco sísmico e o mercado imobiliário de Lisboa. Numa terceira fase foram estudadas as bases teóricas e empíricas mais relevantes na literatura sobre o processo de tomada de decisão, e em especial, em situações de risco. A revisão de literatura foi continuamente atualizada ao longo do estudo, proporcionando uma compreensão profunda sobre a reação dos mercados aos riscos naturais e a influência do contexto cultural e económico na perceção de risco, aplicando as melhores metodologias à realidade portuguesa, com foco no mercado e no parque habitacional de Portugal.

2.2 O IMPACTO DO RISCO SÍSMICO

Frequentemente, os desastres naturais resultam em mortes, danos à propriedade e destruição de bens materiais (Bennett, 1989; Beron et al., 1997; Badri et al., 2006; Lee et al., 2017). De acordo com a Base de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT)[1], os terramotos foram o terceiro desastre natural que causou os maiores danos materiais entre 1900 e 2021, ficando atrás apenas das tempestades e inundações. Neste período, os eventos sísmicos foram responsáveis por mais de 6 mil milhões de euros em danos e 1,6 milhão de mortes.

A China (652 419 mortes), o Haiti (222 593 mortes[2]) e a Indonésia (203 460 mortes) apresentam o maior número de mortes, enquanto o Japão (384 mil milhões de USD), a China (112 mil milhões) e a Itália (55 mil milhões) sofreram os danos materiais mais significativos.

Segundo Sen (1981, conforme citado por Cavallo e Noy (2011)), a própria ocorrência de desastres naturais é um evento económicos. Como tal, é de se esperar que países com maior desenvolvimento e estabilidade financeira sejam mais resilientes a choques econômicos causados por riscos naturais. Toya e Skidmore (2007) argumentam que países com maior renda, maior nível educacional, maior abertura econômica, governos menores e sistemas financeiros mais completos experimentam menores perdas devido à maior implementação de medidas preventivas para reduzir os impactos de desastres naturais. Assim, é importante destacar que a contabilização dos danos totais variará de país para país, dado que o valor das propriedades também varia.

Os danos causados por desastres naturais dependem do tipo de desastre natural e do tipo de construção. Os sismos tipicamente danificam elementos estruturais (vigas, nós, paredes portantes, etc.) e elementos não estruturais (paredes divisórias, coberturas não estruturais, mobília, instalações de AVAC, equipamentos, etc.). De forma semelhante, tempestades intensas e furacões exercem uma pressão extraordinária sobre os edifícios, podendo causar danos estruturais e não estruturais (Bradshaw, 2003). As inundações podem afetar a estrutura de um edifício ou enterrá-lo na lama,

[1] A Base de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT) é um recurso extensivo de registos de desastres naturais, criado em 1988 pelo Centro de Pesquisa sobre a Epidemiologia de Desastres (CRED), na Universidade Católica de Louvain, com o apoio da Organização Mundial da Saúde (OMS) e do Governo belga. Esta base de dados contém registos de desastres naturais ocorridos em todo o mundo, abrangendo o período entre 1900 e 2021.

[2] Num só terramoto a 12 de janeiro de 2010.

levando à perda de equipamentos e do recheio do imóvel, tornando-o inutilizável. Apesar de, na literatura, a opinião generalizada ser a de que a reação das famílias e dos mercados está mais estreitamente ligada ao choque do que ao tipo de desastre natural, é expectável que o risco seja refletido nos valores de mercado dos imóveis. Note-se que, tal como seria de esperar, a maioria dos estudos presentes na literatura foi realizada em locais de alto risco.

Brookshire et al. (1985) encontraram impactos significativos nos preços de imóveis nos Estados Unidos após o Governo do Estado da Califórnia divulgar um mapa de risco sísmico, disponibilizado através da publicação de uma lei estadual de 1974. Os autores argumentam que essa divulgação criou espaço para um novo mercado de habitações seguras na Califórnia. Contrariamente a Brookshire, Beron et al. (1997), após o sismo de Loma Prieta em 1989, encontraram evidências de que as famílias inicialmente tinham sobrestimado os riscos, levando a uma revisão em baixa do valor de mercado do risco após o evento. Palm (1990, conforme citado por Nakagawa et al. (2007)), mostrou que a legislação não afetou significativamente o mercado imobiliário, pois a maioria dos avaliadores não atribuía nenhum prémio de valoração a imóveis menos vulneráveis. A autora também constatou que os clientes raramente perguntavam sobre o risco sísmico, e poucos compradores verificavam evidências de danos anteriores causados por terramotos.

No Irão, Willis e Asgary (1997) encontraram uma diferença de preço significativa entre imóveis com maior resistência a sismos em todos os distritos da cidade de Teerão. Os autores argumentam que essa diferença de preço pode aumentar ainda mais com a divulgação adicional de informações sobre o risco sísmico. No entanto, é de notar que essa sensibilidade varia entre as áreas da cidade e os grupos socioeconómicos. Apesar do aumento de consciencialização no período pós-sismo, as Medidas de Redução de Risco de Terramoto (ERRMs) não foram amplamente utilizadas devido ao aumento dos custos de construção. Assim, pode-se concluir que medidas legislativas e o da consciencialização do risco por exposição a terramotos recentes têm apenas impacto a curto prazo no mercado imobiliário.

Naoi et al. (2009) estudaram o efeito do risco sísmico no mercado imobiliário japonês, um país com uma média anual de 1,14 eventos de magnitude igual ou superior a 5,5 na escala Richter, entre 1980 e 2000. Utilizando dados a nível nacional, os autores encontraram algumas alterações na avaliação subjetiva do risco sísmico por parte dos indivíduos após um evento sísmico. Embora não tenham encontrado evidências claras de uma correlação negativa entre a valorização e o risco sísmico regional em períodos pré-terramoto, encontraram uma correlação significativa em períodos pós-terramoto. Hidano et al. (2015) também analisaram a resposta do mercado imobiliário de Tóquio às informações divulgadas sobre a resistência dos imóveis a sismos e descobriram que imóveis em zonas de baixo risco eram valorizadas no mercado com um prémio de 13.970–17.380 JPY em relação a imóveis em zonas de maior risco. Os autores também concluíram que os preços dos imóveis recém-construídos, com padrões de segurança estrutural mais elevados, não foram significativamente afetados pelo risco, ao contrário das propriedades mais antigas.

Na Itália, Modica e Locati (2016) estudaram a resposta do mercado imobiliário ao terramoto de 2012 no Norte da Itália e encontraram evidência de uma reação exagerada provocada pelo nível de dano causado. Houve uma redução média de 4,6% nos preços após o sismo, sendo que as regiões mais afetadas pelo terramoto também foram as mais impactadas por essa redução de preços. É importante notar que moradias com melhor qualidade estrutural foram menos afetadas pela queda de preços, sugerindo que as famílias tiveram em consideração a perceção da sua resistência a eventos sísmicos.

Note-se que uma forma das famílias se protegerem das consequências económicas provocadas pelos danos materiais provocados por eventos sísmicos nos seus imóveis é através da subscrição de seguros multirriscos com cobertura para este tipo de eventos. No entanto, em várias partes do globo, verifica-

se que a cobertura por via do seguro contra eventos sísmicos nem sempre é largamente difundida. A título de exemplo, Naoi et al. (2009) afirmaram que os danos causados por terramotos não são totalmente segurados no Japão. De acordo com o EM-DAT, apenas 17,8% do total dos danos foram cobertos por seguros durante o terramoto e tsunami de Tohoku em 2011, confirmando as conclusões de Naoi et al. (2009). Os autores também argumentaram que "como um terramoto é um fator de risco exógeno característico de um local ou região específica, este deve ser refletido nos preços locais do mercado imobiliário. Estimar a exposição ao risco das populações é crucial para avaliar os benefícios das políticas de mitigação de danos causados por terramotos".

Em suma, na literatura há evidência de que fatores de risco acrescido devem ter impactos negativos nos preços do imobiliário, levando a reduções de valorização em imóveis com maior vulnerabilidade. No entanto, verifica-se de igual forma que este efeito nem sempre se materializa, dependendo do mercado, da cultura e condições socioeconómicas das populações (Brookshire et al., 1985; MacDonald et al., 1987; Willis e Asgary, 1997; Önder et al., 2004; Bin e Polasky, 2004; Hallstrom e Smith, 2005; Nakagawa et al., 2007; Fekrazad, 2019).

3 O CASO DE LISBOA

Estudos anteriores consideraram a capital portuguesa como tendo um risco sísmico moderado (Borges et al., 2001). Desta forma, um grande terramoto, como os de 1531 e 1755, teria consequências significativas no país, na sua economia, e na vida de seus habitantes. No entanto, e apesar do risco, Lisboa permanece pouco preparada para tal evento, especialmente considerando que 64% de seu stock de edifícios foi construído antes de qualquer regulamentação sísmica (Costa et al., 2008). No entanto, são visíveis as diferenças de vulnerabilidade entre as tipologias construtivas presentes no seu parque edificado. No geral, pode-se afirmar que a história da redução da vulnerabilidade em Portugal está maioritariamente associada ao terramoto de 1755 ou à aplicação de códigos de construção (Costa et al., 2008; Lopes, 2008; Jarimba, 2016).

Muitas das referências na literatura existente com enfoque na cidade de Lisboa, abordam tipologias construtivas específicas. Exemplos disso são o estudo de Simões et al. (2015), que estudaram o desempenho sísmico de edifícios “pombalinos”, “gaioleiros” e de “placa”, o de Marques et al. (2017), que estudaram os edifícios de alvenaria não reforçada e de “placa”, ou o de Caruso e Bento (2019), que avaliaram o desempenho de edifícios de alvenaria não reforçada e de edifícios de betão armado (pré-1980). A larga maioria dos estudos identificam deficiências não negligenciáveis, e por vezes severas, na resistência do edificado e no seu desempenho sísmico.

Outros focaram-se no risco global do parque edificado. A título de exemplo, em 2005 a Câmara Municipal de Lisboa lançou um conjunto de estudos setoriais de risco sísmico, em colaboração com o Instituto de Engenharia Estrutural, Território e Construção do Instituto Superior Técnico (ICIST), com o objetivo produzir recomendações a serem incluídas no Plano Diretor da cidade, tal como a definição de áreas sísmicas críticas. O documento produzido contém também recomendações sobre intervenções em edifícios existentes, como a proibição de qualquer intervenção que possa diminuir a resistência global a cargas horizontais, como a construção de novos andares superiores. Recomenda especial cuidado com os edifícios "pombalinos" e "gaioleiros". Quanto à reabilitação de edifícios, recomenda que qualquer projeto de reabilitação contenha informações detalhadas sobre a resistência sísmica do edifício e que as obras de manutenção dos edifícios mais vulneráveis sejam usadas como oportunidade para seu reforço estrutural. Por último, recomenda uma fiscalização mais rigorosa das obras de construção pela Câmara Municipal de Lisboa.

Apesar do risco e da elevada vulnerabilidade do edificado, os preços dos imóveis dispararam nos últimos anos, especialmente desde 2013. As taxas de juro baixas, as políticas de promoção do turismo e o aumento dos alojamentos de curta duração, entre outros fatores, impulsionaram o crescimento do mercado na última década, levando o país a um dos maiores aumentos na valorização do *stock* habitacional em toda a Europa, tendo o valor mediano das avaliações bancárias na capital duplicado entre 2014 e 2020[3].

O aumento das avaliações do mercado imobiliário português, a exposição das famílias e dos bancos ao risco sísmico e a inexistência de um fundo nacional de cobertura para atividades sísmicas constituem uma situação delicada que deve ser endereçada com a maior brevidade possível.

4 METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De forma a ter uma correta avaliação da influência do risco no mercado imobiliário são necessárias ter em conta várias dimensões. Desta forma, a metodologia utilizada foi desenhada de forma a capturar as possíveis causas e efeitos de uma forma o mais abrangente possível. Deve-se começar por considerar e definir o risco. No contexto da avaliação do risco de desastres naturais, o risco é frequentemente referido como uma combinação de perigo, vulnerabilidade e exposição, sendo, no entanto, por vezes simplificado como a combinação da probabilidade e das consequências. Desta forma, deve-se considerar não apenas a sismicidade histórica de Lisboa (o epicentro de eventos anteriores, magnitude e efeitos do movimento do solo - ou seja, perigo), mas também o comportamento estrutural dos edifícios e a sua resposta a um terramoto (vulnerabilidade), bem como a dinâmica populacional e demográfica (para estimar o número de feridos e mortos - ou seja, exposição) (Costa et al., 2008). No entanto, devemos recordar que este estudo se concentrará principalmente na vulnerabilidade do *stock* de edifícios de Lisboa, nas suas diferenças entre as tipologias de edifícios e bairros e seu impacto nas avaliações.

Desta forma, consideramos que são necessários ter em conta quatro pontos-chave:

- *Stock de edifícios existentes*: é o ponto fundamental para se ter uma compreensão profunda das tipologias de edifícios, a sua vulnerabilidade e distribuição espacial.
- *Vulnerabilidade do solo*: é necessário ter em conta os requisitos que cada edifício deve cumprir, tendo em consideração o solo em que está implantado, de forma a evitar o seu colapso.
- *Considerações espaciais:* uma vez que a localização é conhecida por ser um dos principais fatores na determinação dos valores imobiliários. Isto inclui fatores distintos como proximidade a transportes, jardins, escolas, etc.
- *Considerações económicas:* uma vez que que os valores dos imóveis são inevitavelmente afetados por tendências macroeconómicas, como taxas de juro, e fatores locais, como mudanças demográficas.

Embora esta lista possa não ser exaustiva de todos os fatores que afetam o mercado imobiliário (McGinnis, 2004), esses quatro grandes grupos foram considerados neste estudo como alguns dos mais importantes para a compreensão da dinâmica do mercado imobiliário.

[3] Fonte: Eurostat e INE

4.2 DADOS

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizada uma base de dados com 61 variáveis, contendo informações como os valores de venda normalizados, características físicas do imóvel (por exemplo, número de quartos, ano de construção) e distâncias de pontos de interesse, como escolas e transporte público, entre outras características. No total, foram tidas em conta 8 726 transações de apartamentos, ocorridas em Lisboa entre 2008 e 2018.

À luz dos quatro pontos-chave identificados, foi seguida uma estratégia para incluir informações sobre o *stock* de edifícios, como o número de quartos no imóvel, o ano de construção do prédio e sua condição, informações sobre a vulnerabilidade do solo, relacionando-se por georreferenciação o tipo de solo e à aceleração máxima do solo (PGA), e informações espaciais, como a distância a transportes, supermercados ou unidades de saúde. Devido à falta de dados recentes, e com granularidade apropriada, sobre o rendimento das famílias, à data da execução deste estudo, o tipo de variáveis económica propícias de serem integradas na base de dados era limitado. Desta forma, decidimos normalizar todos os valores com base no ano de venda. Embora seja reconhecido que mudanças na política fiscal, taxas de juros ou até mesmo taxas de desemprego tenham diferentes impactos em diferentes segmentos de mercado, essa normalização poderá servir como um controlo a fenómenos específicos de cada ano que com impacto transversal a todo o mercado habitacional de Lisboa.

Adicionalmente, é importante reconhecer que cada imóvel é único. A heterogeneidade dos imóveis decorre de suas diferenças na construção, condição, financiamento e localização (Balchin e Kieve, 1986; Robinson, 1979; Cupal, 2017). Portanto, o valor de mercado de uma propriedade está intrinsecamente ligado à sua localização (por exemplo, proximidade de escolas, supermercados, transporte e outras comodidades), e, portanto, espera-se que os valores imobiliários mostrem sinais de dependência espacial (Bin et al., 2008). De forma a minimizar os efeitos decorrentes deste fenómeno foi realizada uma análise espacial dos dados e foram construídos modelos utilizando diferentes níveis de agregação, nomeadamente usando as antigas freguesias (53, antes de 2013) e as novas freguesias (24). Esta estratégia foi especificamente seguida para minimizar os efeitos do que é conhecido como Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP), fenómeno que ocorre quando a delimitação espacial usada para recolher/reunir dados geográficos é "modificável" ou arbitrária, levando a que os resultados reflitam diferenças na divisão dos dados em vez de diferenças no comportamento real, uma vez que os fenómenos econômicos raramente obedecem a limites administrativos ou arbitrários.

Além disso, vieses de amostragem podem ser introduzidos quando a amostra contém apenas um subconjunto de imóveis não representativos do *stock* habitacional total. Quanto menor o tamanho da amostra em relação à população, maior a probabilidade dos seus efeitos serem visíveis. Além disso, quanto mais distantes forem as características médias dos imóveis na amostra das características reais do *stock*, maiores serão os vieses introduzidos nos resultados. De forma a minimizar estes efeitos, começou-se por comparar a amostra de imóveis com os resultados dos Censos de Edificações de 2011. Realizou-se uma comparação a três níveis: 1) ao nível da cidade; 2) ao nível das novas freguesias; e 3) ao nível das freguesias antigas. No entanto, devemos reconhecer que, dada a natureza dos dados, haverá poucas opções para lidar com uma possível disparidade entre a amostra e a população: 1) adotar uma abordagem de amostragem estratificada; ou 2) conduzir um nível menos granular de agregação.

4.3 ETAPAS

Começou-se por realizar uma Análise Exploratória de Dados, incluindo uma análise espacial e uma Análise de Componentes Principais dos dados. Durante esta fase, identificou-se um conjunto de variáveis para ser incluído no modelo de regressão.

A segunda fase consistiu na construção de um modelo de regressão utilizando o preço normalizado por metro quadrado como variável dependente. Dado o objetivo deste estudo, uma das variáveis independentes a incluir teria, necessariamente, que permitir analisar o impacto da vulnerabilidade sísmica dos imóveis no seu preço. Assim, foi desenvolvido um índice de Défice de Resistência do Edifício (BRD[4]) com base em estudos anteriores (Lagomarsino e Gionvinazzi 2006; Mota de Sá, Oliveira e Ferreira 2010, 2013; Ferreira 2012). O BRD indica, para um determinado nível de ação sísmica, o quão distante está a resistência atual de um determinado edifício da resistência necessária ou, neste caso, da vulnerabilidade necessária para evitar o colapso estrutural de acordo com a EMS-98. Dada a vulnerabilidade necessária (V_{req}) e a vulnerabilidade atual (V_{ui}) de um edifício, seu BRD é calculado da seguinte forma (EQ 1):

$$BRD = \frac{\Delta V}{V_{req}} \qquad \text{[EQ 1]}$$

onde ΔV é a diferença entre as vulnerabilidade atual e a requerida para evitar o colapso. O valor do BRD foi calculado para cada imóvel e adicionado como variável à base de dados. De referir que foram seguidas duas abordagens para calcular a vulnerabilidade atual. A primeira abordagem atribuiu a vulnerabilidade atual tendo por base apenas o ano de construção do edifício. Uma tipologia de construção foi então atribuída automaticamente (alvenaria ou betão armado (BA)), bem como um valor correspondente (ver Tabela 1). Cada classe de vulnerabilidade representa um grupo de edifícios com comportamento esperado semelhante sob ação sísmica (Mota de Sá et al., 2013). Isso constitui uma abordagem mais simples, mas expedita, para a atribuição da vulnerabilidade atual.

Tabela 1 - Vulnerabilidade atual média por tipologia. Fonte: Ferreira (2012)

Tipologia	**V_{ui}**
Alvenaria (<1945)	0,70
BA (1946-1960)	0,60
BA (1961-1985)	0,50
BA (>1985 e ≤ 5 pisos)	0,40
BA (>1985 e > 5 pisos)	0,44

De forma a obter uma estimativa mais refinada da vulnerabilidade atual (V_{ui}), foi utilizada também uma segunda abordagem baseada não apenas no ano de construção, mas também na localização do edifício. Utilizou-se o Censos de edifícios de 2011 que classifica cada edifício na cidade de Lisboa de acordo com o ano de construção (num total de 10 classes), o tipo de estrutura (num total de 6 classes)

[4] Building Resistance Deficit

e algumas outras características, como o tipo de cobertura e revestimento. Utilizando o ano de construção e o tipo de estrutura (com base em seus principais elementos resistentes), encontrou-se um total de 60 categorias iniciais diferentes, correspondendo ao número total de pares possíveis de combinação das duas variáveis. Dadas as semelhanças entre algumas classes, utilizaram-se dados presentes na literatura de forma a agrupar os grupos iniciais em 24 classes apenas. De seguida, foi atribuída a cada imóvel uma tipologia construtiva (de acordo com EMS-98) juntamente com um valor para a vulnerabilidade atual estimada. Os valores base da vulnerabilidade foram os recolhidos nos estudos de Lagomarsino e Giovinazzi (2006), Oliveira et al. (2004) e Ferreira (2012). Adicionalmente, foram considerados para cada imóveis fatores de modificação (FM) que introduzem aumentos ou decréscimos de vulnerabilidade, com base em características como o número de pisos ou a condição do edifício.

Com base no trabalho de Oliveira et al. (2019), foi feito o mapeamento da aceleração ao nível do solo (Peak Ground Aceleration (PGA)), para a localização de cada imóvel, utilizando por base a norma portuguesa para as condições sismo próximo e para o nível de importância dos edifícios residenciais5. A partir da PGA estimada, foi possível calcular a intensidade I_0, tal como enunciado em Mota de Sá et al. (2010) (EQ 2):

$$I_0 = \frac{log\ PGA - 0{,}014}{0{,}3} \qquad \text{[EQ 2]}$$

Tendo a intensidade calculada, é possível estimar a vulnerabilidade requerida para um determinado edifício evitar o colapso estrutural de acordo com o EC8. Essa vulnerabilidade necessária (Vreq) pode ser calculada da seguinte forma (EQ 3):

$$V_{u_{req}} = 1{,}82576 - 0{,}178444 I_0 \qquad \text{[EQ 3]}$$

Apesar das vantagens práticas de usar um índice para descrever a vulnerabilidade, existem limitações associadas. A título de exemplo, reconhece-se que a duração do movimento do solo é especialmente importante para degradar estruturas, como alvenaria não reforçada (Rossetto et al., 2014), o que não é capturado pelo valor base da vulnerabilidade requerida. A heterogeneidade na construção de edifícios mais antigos também pode representar limitações ao usar um único indicador. No entanto, pode-se argumentar que o fator de modificação relativo à condição de um edifício, usado para calcular sua vulnerabilidade atual, já leva em conta os efeitos aumentados do solo numa estrutura em pior estado de conservação estrutural.

Seguidamente realizou-se um teste de Hausman para determinar se o algoritmo de Fixed-Effects (FE) ou o de Random-Effects (RE) era o mais apropriado, tendo-se optado por um modelo de FE (com efeitos fixos de entidade). Este controlo de entidade é usado para minimizar os efeitos da dependência espacial. No entanto, os coeficientes ainda podem mostrar um viés positivo, uma vez que o número de períodos T em análise é pequeno (10 pontos por freguesia, um por ano) (Abdallah et al., 2015). Implementou-se o seguinte modelo (EQ 4):

$$\log(p_{it}) = \alpha + \delta X_{it} + \beta BRD_{it} + \mu_i + \phi_t + \varepsilon_{it} \qquad \text{[EQ 4]}$$

onde $\log(p_{it})$ é o preço médio de venda normalizado ao ano de imóveis na freguesia i no ano t; X_{it} é um conjunto de variáveis explicativas relevantes (incluindo número de quartos, área do piso, ano de construção, distância para a estação/paragem de autocarro mais próxima e tipologia construtiva); BRD

[5] Veja-se http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Dinamica/mine/EC8_1_Portugues.pdf

é o Défice de Resistência do Edifício (BRD); Os efeitos fixos ao nível da freguesia (μ_i) controlam todas as características invariantes no tempo dentro de cada freguesia e efeitos fixos no tempo (ϕ_t) controlam choques anuais transversais a toda a cidade; ε_{it} é o termo de erro para a freguesia i no ano t.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise exploratória inicial demonstrou uma sobreposição entre a distribuição espacial dos valores de imóveis mais elevados, a maior vulnerabilidade dos edifícios e o maior risco de inundação, nomeadamente nas freguesias da Misericórdia, Santa Maria Maior, Campolide e Avenidas Novas. Estas são freguesias centrais da cidade, sugerindo assim que sua localização é um dos principais fatores que contribuem para o preço dos imóveis. Uma análise de correlação demonstrou também que a condição do edifício (0.338), a condição do apartamento (0.336), o ano de construção (0.277), e o andar (0.099) são algumas das variáveis que apresentam as maiores correlações positivas com os preços normalizados. Estes resultados são consistentes com as expectativas iniciais, uma vez que é expectável que imóveis mais recentes e em melhores condições sejam mais atrativos para potenciais compradores, portanto, com maior valor de mercado. Apartamentos em andares mais altos também têm valores de mercado superiores, uma vez que desfrutam de menos ruído e poluição, e muitas vezes têm vistas melhores do que os andares inferiores. Uma correlação negativa dos preços com a distância até o CBD (-0.163) também mostrou que a localização é um fator primordial na formação de preço. De forma a minimizar possíveis efeitos do MAUP, foram utilizados os valores brutos para a análise, além de uma agregação em antigas freguesias (com tamanhos menores, assim mais aproximados das unidades de análise ideais homogéneas) e de uma agregação nas freguesias novas (conforme definido pela Lei n.º 56/2012). Os resultados foram consistentes em todos os níveis de agregação. A análise do BRD mostrou que os valores médios mais elevados estão localizados nas freguesias de São Nicolau (0.838), Madalena (0.721) e São Paulo (0.627), no centro da cidade, em algumas das localizações mais caras de Lisboa, junto ao rio Tejo.

Os preços geralmente demonstraram um padrão de *spill-over* do centro da cidade para suas periferias, sem qualquer consideração por variações espaciais no risco sísmico. O Parque das Nações, um bairro mais recente e com uma população com estatuto económico elevado, também demonstrou preços mais altos apesar da maior distância ao centro da cidade. Uma análise de PCA revelou que uma parte significativa da variância dos dados (25,46%) poderia ser explicada pelo primeiro componente, que poderá ser identificado como relacionado à proximidade com o rio e à centralidade, e pelo segundo fator (19,26%) relacionado com a condição do edifício e do próprio imóvel.

Na segunda fase, foram construídos quatro modelos de Fixed-Effects (Tabela 2). Note-se que após cada regressão, realizou-se uma análise de autocorrelação espacial dos resíduos da regressão para garantir a validade dos resultados. Os modelos construídos para diferentes níveis de agregação, mostraram um coeficiente negativo para o BRD (BRD_PROXIMO) e coeficientes positivos para o número de pisos (FLOOR). Também é possível concluir que a condição do edifício e dos apartamentos, bem como o número de pisos no edifício, impactam positivamente no valor do imóvel. A segunda abordagem de BRD, mais detalhada, aparenta produzir melhores resultados na modelação dos preços dos imóveis. Apesar do impacto significativo das variáveis BRD nos modelos das antigas freguesias, devemos ser cautelosos na interpretação dos resultados, dada a alta correlação da vulnerabilidade com a idade do edifício, o que pode revelar uma preferência por edifícios mais novos em vez de uma preferência direta por uma menor vulnerabilidade a atividades sísmicas. Além disso, note-se a área parece insignificante no modelo, o que seria contraintuitivo. No entanto, é importante referir que a variável dependente é o preço por metro quadrado.

Além disso, a análise dos resultados permite concluir que a utilização das antigas freguesias é uma abordagem geralmente melhor para a modelação dos dados. Este facto era expectável uma vez que unidades espaciais de menor dimensão deverão representar uma dinâmica de mercado mais homogénea. As regressões que utilizaram as freguesias antigas não revelaram autocorrelação espacial do termo de erro, mostrando assim a validade dos resultados. Os melhores resultados foram obtidos para o segundo modelo de freguesias antigas (baseado no ano de construção e localização), com um R^2 de 21,39%, seguido pelo primeiro modelo de freguesias novas, com a primeira abordagem de atribuição de BRD, com um R^2 de 10,61%.

Tabela 2 - Resultados das regressões de FE

	BRD – Primeira Abordagem				**BRD – Segunda Abordagem**			
	Freguesias Antigas		**Freguesias Novas**		**Freguesias Antigas**		**Freguesias Novas**	
const	0.597***	0.519***	0.662***	0.594***	0.475***	0.403***	0.578***	0.484***
BUILDING_2	0.159***	0.155***	0.075**	0.083**	0.151***	0.153***	0.095***	0.108***
APARTMENT1	0.078**	0.076**	0.051*	0.049*	0.112***	0.112***	0.052*	0.052*
AREA	-0.001	--	-0.0001	--	-0.0005	--	9.18e-5	--
FLOOR	0.022*	--	-0.0005	--	0.020	--	-0.012	--
BRD_PROXIMO	-0.436***	-0.427***	-0.177	-0.207	-	--	--	--
BRD_PROXIMO_POND	--	--	--	--	-0.223**	-0.221**	-0.0002	0.002
BUILDING_F	--	0.014***	--	0.011***	--	0.014***	--	0.009*
Entidades	53	53	23	23	52	52	23	23
Períodos	11	11	11	11	11	11	11	11
R2	18.86%	19.13%	8.49%	10.61%	20.48%	21.39%	9.54%	10.57%
Autocorrelação Espacial de Resíduos	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim

Refira-se ainda que os resultados não contrastam com a literatura existente. Embora se reconheça que, tal como mencionado por Naoi et al. (2009), sendo o risco sísmico um risco exógeno ao imóvel este deveria refletir-se no seu valor, a literatura também mostra que a maioria dos efeitos de redução de preços ocorre após a divulgação de informações de risco em locais de alto risco sismicidade (ver, por exemplo, Naoi et al. (2009)), e especialmente em situações pós-terramoto (como demonstrado por Modica e Locati (2016)).

6 CONCLUSÕES

Lisboa é considerada uma cidade de risco sísmico moderado, tendo registado dois eventos importantes em sua história, em 1531 e 1755. No entanto, 64% do seu *stock* de edifícios foi construído antes da implementação de qualquer regulamentação sísmica, constituindo um risco à segurança e bem-estar dos seus habitantes. A escalada dos preços no mercado imobiliário nos últimos anos aumentou o de risco financeiro da banca e das famílias. Este estudo procurou explorar se os valores de mercado refletem uma preferência por propriedades menos vulneráveis a sismos. Com base na análise da literatura e nos resultados, podemos concluir que o mercado não reflete necessariamente uma preferência por propriedades menos vulneráveis a sismos. Embora, em teoria, seja expectável que este risco seja refletido no valor de mercado de um imóvel, os resultados demonstram que o mercado valoriza edifícios mais novos e em melhor estado, impulsionado não pela preocupação com a segurança em si, mas pelas comodidades oferecidas pelo imóvel, tal como a sua localização. A análise também revela que os investidores parecem estar alheios a riscos naturais como sismos, conforme demonstrado pela fraca associação entre os preços e a distribuição espacial de imóveis com maior vulnerabilidade a riscos naturais.

O progresso feito neste estudo proporcionou uma base ao desenvolvimento políticas públicas para mitigar o risco sísmico, em especial em locais de risco sísmico moderado. Contudo, também levantou várias questões que poderão ser exploradas em novas linhas de investigação: que fatores socioeconómicos específicos contribuem para as diferenças na perceção do risco e nas ações observadas nos diferentes grupos em Lisboa? Como podem estes fatores ser explorados para promover uma resposta mais eficaz ao risco sísmico? Quais são as potenciais implicações da indiferença do mercado em relação ao risco sísmico no planeamento urbano a longo prazo, no desenvolvimento de infraestruturas e nos esforços de resposta a desastres naturais? Como podem os *stakeholders* e os decisores políticos colmatar esta lacuna para garantir um ambiente construído mais resiliente? Estas são algumas das questões cuja reposta poderá contribuir para a mitigação de risco e para um ambiente construído mais seguro e resiliente.

REFERÊNCIAS

Abdallah, W., Goergen, M., & O'Sullivan, N. (2015). Endogeneity: how failure to correct for it can cause wrong inferences and some remedies (Version 1). Loughborough University. https://hdl.handle.net/2134/17490

Badri, S. A., Asgary, A., Eftekhari, A. R., & Levy, J. (2006). Post-disaster resettlement, development and change: a case study of the 1990 Manjil earthquake in Iran. Disasters, Volume 30(4), pp. 451-468. DOI: 10.1111/j.0361-3666.2006.00332.x

Balchin, P. N., & Kieve, J.L. (1986). Urban land economics (3ed) London: McMillan, 1986.

Bennett, M. J. (1989). Lessons Learned from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989. Volume 1045. US Government Printing Office.

Beron, K. J., Murdoch, J. C., Thayer, M. A., & Vijverberg. W. (1997). An Analysis of the Housing Market before and after the 1989 Loma Prieta Earthquake. Land Economics, Volume 73(1), pp. 101–113. DOI: 10.2307/3147080

Bin, O., & Polasky, S. (2004). Effects of flood hazards on property values: Evidence before and after hurricane Floyd. Land Economics, 80(4), 490-500. DOI: 10.2307/3655805

Bin, O., Kruse, J. B., & Landry, C. E. (2008). Flood hazards, insurance rates, and amenities: Evidence from the coastal housing market. Journal of Risk and Insurance, Volume 75(1), pp. 63-82. DOI: 10.1111/j.1539-6975.2007.00248.x

Borges, J., Fitas, A., Bezzeghoud, M., & Teves-Costa, P. (2001). Seismotectonics of Portugal and its adjacent Atlantic area. Tectonophysics. Volume 331(4), pp. 373-387. DOI: 10.1016/S0040-1951(00)00291-2

Brookshire, D. S., Thayer, M. A., Tschirhart, J., & Schulze, W. D. (1985). A Test of the Expected Utility Model: Evidence from Earthquake Risks. Journal of Political Economy, Volume 93(2), pp. 369–389. DOI: 10.1086/261304

Costa, A.C., Sousa, M.L., Carvalho, A., & Coelho, E. (2008). Seismic Loss Scenarios Based on Hazard Disaggregation. Application to the Metropolitan Region of Lisbon, Portugal. In: Oliveira, C.S., Roca, A., Goula, X. (eds) Assessing and Managing Earthquake Risk. Geotechnical, Geological And Earthquake Engineering. vol 2. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-3608-8_21

Cavallo, E., & Noy, I. (2011). Natural disasters and the economy—a survey. International Review of Environmental and Resource Economics. Volume 5(1), pp. 63-102. DOI: 10.1561/101.00000039

Cupal, M. (2017). Sales Comparison Approach Indicating Heterogeneity of Particular Type of Real Estate and Corresponding Valuation Accuracy. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. Volume 65, pp.977-985. DOI: 10.11118/actaun201765030977.

Fekrazad, A. (2019). Earthquake-risk salience and housing prices: Evidence from California. Journal of Behavioral and Experimental Economics (formerly The Journal of Socio-Economics), Elsevier, Volume 78(C), pp. 104-113. DOI: 10.1016/j.socec.2019.01.001

Ferreira, M. A. (2012). Risco Sísmico em Sistemas Urbanos. Instituto Superior Técnico. Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~monicaf/Tese_MAF.pdf (visitado a 5 de novembro, 2021)

Hallstrom, D. G., & Smith, K. (2005) Market responses to hurricanes, Journal of Environmental Economics and Management, Volume 50(3), pp. 541-561. DOI: 10.1016/j.jeem.2005.05.002

Hidano, N., Hoshino, T., & Sugiura, A. (2015). The effect of seismic hazard risk information on property prices: Evidence from a spatial regression discontinuity design, Regional Science and Urban Economics, Volume 53, pp. 113-122, ISSN 0166-0462, DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2015.05.005.

Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering. Volume 4, pp. 415-443. DOI:10.1007/s10518-006-9024-z.

Lee, M. & Hong, J. H, & Kim, K. (2017). Estimating Damage Costs from Natural Disasters in Korea. Natural Hazards Review. Volume 18. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000259.

Leilani, F. (2017). Report of the Special Rapporteur on adequate housing as a component of the right to an adequate standard of living, and on the right to non-discrimination in this context, New York, New York, USA: United Nations. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/861179 (visitado a 26 de maio, 2024)

Instituto Nacional de Estatística (INE) (2020). Inquérito à Situação Financeira das Famílias 2020 (Dados definitivos). Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=569549494&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt (visitado a 29 de maio, 2024)

MacDonald, D. N., Murdoch, J. C., & White, H. L. (1987). Uncertain Hazards, Insurance, and Consumer Choice: Evidence from Housing Markets. Land Economics, University of Wisconsin Press, Volume 63(4), pp 361-371. DOI: 10.2307/3146293

Modica, M., & Locati, M. (2016). Housing Market Response to 2012 Northern Italy Earthquake: The role of house quality and changing risk perception. SEEDS Working Papers. 4/2016. Disponível em: http://www.sustainability-seeds.org/papers/RePec/srt/wpaper/0416.pdf (visitado a 26 de junho, 2023)

Mota de Sá, F., Oliveira, C. S., & Ferreira, M. A. (2010). SIRIUS - INDICADOR DE RISCO SÍSMICO NO ESPAÇO URBANO. SÍSMICA 2010 – 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica. Conference Paper. Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~monicaf/SISMICA_104.pdf (visitado a 5 de novembro, 2021)

Mota de Sá, F., Oliveira, C. S., & Ferreira, M. A. (2013). SIRIUS, Seismic Risk Indicator in Urban Space. Earthquake Spectra, Volume 29(2), pp. 573–595. DOI: 10.1193/1.4000149

Nakagawa, M., Saito, M., & Yamaga, H., (2007). Earthquake risk and housing rents: Evidence from the Tokyo Metropolitan Area. Regional Science and Urban Economics, Elsevier, Volume 37(1), pp. 87-99. DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2006.06.009

Nakagawa, M., Saito, M., & Yamaga, H., (2007). Earthquake risk and housing rents: Evidence from the Tokyo Metropolitan Area. Regional Science and Urban Economics, Elsevier, Volume 37(1), pp. 87-99. DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2006.06.009

Naoi, M., Seko, M., & Sumita, K. (2009) Earthquake risk and housing prices in Japan: Evidence before and after massive earthquakes. Regional Science and Urban Economics, Volume 39(6), pp. 658-669, ISSN 0166-0462, DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2009.08.002.

Oliveira, C.S., Ferreira, M.A., & Mota de Sá, F. (2004) Seismic Vulnerability and Impact Analysis: Elements for Mitigation Policies. XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova 25-29 gennaio 2004.

Önder, Z., Dökmeci, V., & Keskin, B. (2004). The Impact of Public Perception of Earthquake Risk on Istanbul’s Housing Market. Journal of Real Estate Literature, Volume 12(2), pp.181–194. DOI: 10.1080/10835547.2004.12090136

Robinson, R. (1979). Housing economics and public policy. Palgrave Macmillan London. DOI: 10.1007/978-1-349-16069-3

Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D.N. & Maqsood, T. (2014), Guidelines for empirical vulnerability assessment, GEM Technical Report 2014-08 V1.0.0, 140 pp., GEM Foundation, Pavia, Italy, doi: 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.11. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/21620143.pdf (visitado a 15 de novembro, 2021)

Toya, H., & Skidmore, M. (2007). Economic development and the impacts of natural disasters. Economics letters, Volume 94(1), pp. 20-25. DOI: 10.1016/j.econlet.2006.06.020

Willis, K. G., & Asgary, A. (1997). The Impact of Earthquake Risk on Housing Markets: Evidence from Tehran Real Estate Agents. Journal of Housing Research, Volume 8(1), pp. 125–136. http://www.jstor.org/stable/24833635

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

INTERLIGAÇÃO DAS INFRA-ESTRUTURAS DE ESTRADAS, ENERGIA, ÁGUA E SANEAMENTO DO MEIO NA REGIÃO DE MAPUTO

Sultane Júlio Setimane[a], Anastácia da Graça salvador Machaieie Chale[b] Domingos Augusto Macucule[c], Ruy Moreira Cravo[d]; José Rufino Diogo[e]

[a]Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Arquitetura e Planeamento Fisico, Av. Julius Nyerere no 3453, Campus Principal +258 878011130; +258 848011030, +25821496011, Maputo, Moçambique, ssetimane@ymail.com

[b]Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Arquitetura e Planeamento Fisico, Av. Julius Nyerere no 3453, Campus Principal +258828090410, +25821496011, Maputo, Moçambique, machaieiechale@gmail.com

[c]Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Arquitetura e Planeamento Fisico, Av. Julius Nyerere no 3453, Campus Principal +258 847685278, +25821496011, Maputo, Moçambique, dommacucule@yahoo.com.br

[d]Universidade Politécnica, Av. Paulo Samuel Kankhomba, no1011, +258823585250, +258823133700, Maputo, Moçambique, moreiracravoruy@gmail.com

[e]Universidade Politécnica, Av. Paulo Samuel Kankhomba, no1011, +258823585250, +258823133700, Maputo, Moçambique, joeddiogo@gmail.com

RESUMO

A infra-estrutura económico e social é um conjunto de serviços primordiais para o desenvolvimento socioeconómico de uma região, contribuindo para equilibrar as condições de oportunidade iguais nas parcelas por ela servidas. O presente artigo versa sobre o desenvolvimento da região de Maputo provido pela interligação de infra-estruturas de estradas, energia, água e saneamento. O mesmo tem por objectivo avaliar a contribuição dessas infra-estruturas no desenvolvimento regional da zona de Maputo. Para a realização deste estudo, recorreu-se a estudos já realizados, consulta bibliográfica, observação directa e captação de fotos. Neste contexto, foi possível identificar a interligação das infra-estruturas nas zonas urbanas, suburbanas e rurais. Concluiu-se que a interligação das infra-estruturas na região de Maputo é feita de forma vertical, isto é: elas interligam-se das redes maiores para as menores. Além disso, é mais notório o desenvolvimento económico e social nas zonas urbanas com melhores serviços de infra-estruturas, em detrimento das zonas suburbanas e rurais. A falta de planeamento das infra-estruturas, nas zonas suburbanas e rurais faz com que haja, uma exclusão da cidadania da população que vive nesses espaços.

Palavras-chaves: Interligação, Infra-estruturas, Desenvolvimento Regional, Região de Maputo

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo descreve sobre o desenvolvimento económico e social ao nível da região de Maputo provido pela interligação das infra-estruturas de estrada, energia, água e saneamento com o objectivo de avaliar as contribuições das infra-estruturas no desenvolvimento regional da zona de Maputo. A interligação das infra-estruturas, traduz-se na estrutura da rede de estradas, a de energia e a de abastecimento de água e saneamento do meio.

Nos ultimos 10 anos, a região de Maputo sofreu uma renovação urbana com a construção da estrada circular que liga a cidade de Maputo à provincia de Maputo pasando pelo distrito de Marracuene. Além da construção da estrada circular foi, de igual modo, construida a ponte Maputo – Katembe, fazendo a ligação entre a cidade de Maputo e o distrito municipal da Katembe.

A construção destes dois empreendimentos trouxe para a região de Maputo uma nova imagem, valorizando assim alguns locais que antes não tinham nenhum valor. Com a passagem da estrada circular, foram indemnizadas mais de 1200 famílias, que moravam ao longo do corredor, por onde foi concebida a estrada. Na sequência desse emprendimento, as populações circo-visinhas beneficiaram-se, de forma directa ou indirecta, com o provimento da estrada, ganhando emprego, oportunidade de negócio, a valorização da sua terra, entre outros ganhos que a estrada proporcionou, tais como a iluminação pública, os serviços de saneamento, etc.

De acordo com Ferreira (2018), as redes de interligação têm como finalidade assegurar a ligação entre redes de transporte, mas também entre redes de distribuição de energia, abastecimento de água e tratamento de resíduos sólidos. Podendo pertencer a nível nacional, regional ou local.

De acordo com [World Bank, 1994, p.2] apud Benitez, (1999), a infra-estrutura pode proporcionar grandes benifício ao crescimento económico, mitigação da pobreza e sustentabilidade ambiental, só quando presta serviços que atendem à demanda efectiva com eficiência.

1.2. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA REGIÃO DE MAPUTO

A região de Maputo é situada no sul de Moçambique, nas margens da baía de Maputo, é uma região contínua e inclui os Municípios de Maputo Cidade, Matola, distrito de Boane, distrito da Moamba e o distrito de Marracuene, com uma área de cerca de 2.621 km^2, possui uma população de cerca de 2.630.212 habitantes. (INE, 2017)

Pela sua natureza geoestratégica, a Região de Maputo conheceu um rápido crescimento, nos últimos anos, motivado pelas condições sócio espaciais que esta oferece, como a disponibilidade de espaço, a proximidade da cidade, de equipamentos sociais, a facilidade de busca de sustento, dentre outros.

Esta Região ocupa uma posição central e estratégica, em termos de infra-estrutura, actividades económicas, educação e saúde. Nela, concentra-se a maior parte dos serviços e sedes dos grandes grupos económicos, empresas públicas e privadas, podendo-se citar os Portos de Maputo e Matola (o segundo maior complexo portuário do continente africano); o Aeroporto Internacional de Maputo, o maior Parque Industrial (MOZAL) e um dos maiores corredores de desenvolvimento, que permite a ligação entre os países vizinhos como Zimbabwe, Botswana, Swatine e África do Sul, por vias rodoviária, ferroviária e aérea. (MAE, 2005)

Em termos de população, a Região de Maputo registou uma evolução significativa da população, nos bairros periféricos de Marracuene e Matola, onde se regista grande parte da densidade populacional e a procura de terra pela população proveniente do distrito de Maputo (MAE, 2005), o que demonstra a polarização que estes sofrem, em relação à capital. Nos últimos anos, nota-se um grande desenvolvimento dos bairros, junto às novas infra-estruturas de transportes, destacando-se a construção da nova estrada circular ligando a cidade de Maputo aos Município da Matola, Boane e o distrito de Marracuene, formando um anel.

Ao longo dos anos, foi-se verificando a tendência elevada, da densidade populacional das zonas já urbanizadas, principalmente no centro da cidade, e a expansão territorial acoplada com o crescimento demográfico, nas zonas suburbanas, caracterizadas pela carência de infra-estruturas adequadas e dos serviços básicos.

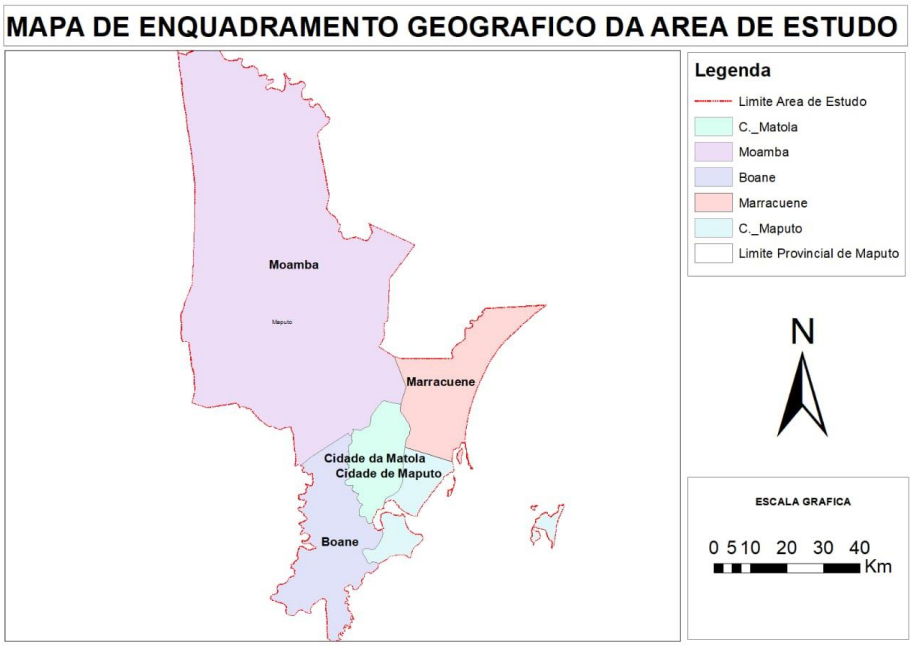


Figura 1 - Região de Maputo

Distribuição da população pelos 5 distritos/municípios que compõem a Região de Maputo.”de acordo com o quadro 1.

Quadro 1 - Distribuição da população da região de Maputo por Distrito

Município	Sede	Área total (Km^2)	População	Densidade Populacional
Cidade de Maputo	Cidade de Maputo	300	1 080 277	3670
Matola	Matola	373	1 032 197	2.767
Boane	Vila de Boane	820	210 367	256.5
Moamba	Vila de Moamba	4628	88 583	19.1
Marracuene	Vila de Marracuene	666	218 788	328.5
Total		**6787**	**2 630 212**	

2. DADOS E MÉTODOS

A construção metodológica que norteia este artigo comporta uma simbiose de vários métodos (Qualitativo, Quantitativo, Monográfico, Histórico e Bibliográfico), aliando-os ao hermenêutico – reflexivo para o alcance efetivo do referencial teórico e histórico da interligação das infra-estruturas e desenvolvimento regional da região em estudo.

Para sustentar esta tese foram empregues os métodos e as técnicas de recolha de dados, utilizados nos procedimentos metodológicos de (Hammes, 2005), para o qual, “na metodologia, descreve-se o caminho a ser percorrido e os instrumentos teóricos a serem aplicados, durante a pesquisa”. Em conformidade com a singularidade do fenómeno da interligação das infra-estruturas e desenvolvimento regional da zona de Maputo, o trabalho iniciou com a revisão bibliográfica que permitiu construir o quadro teórico que sustentou a realização do trabalho de campo e análise de dados. Na recolha de dados, na região em estudo, aplicou-se a técnica de observação direita, permitindo a captação fotográfica das infra-estruturas em toda extensão, como também, foi possível entrevistar alguns moradores aleatoriamente a fim de se inteirar sobre a evolução da região.

3. REDES DE INTERLIGAÇÃO DAS INFRA-ESTRUTURAS DE ESTRADAS, ENERGIA, ÁGUA E SANEAMENTO

3.1. ESTRADAS

De acordo com AASHTO (2012). E CRIR (2001), o sistema de classificação da rede de estradas depende do critério adoptado pela entidade competente, tendo em conta aspectos legais, antecedentes históricos e requisitos administrativos.

Segundo JICA (2001), propõe uma classificação combinada que inclui estradas de tronco, recomendada pelo Plano de Estrutura da Área Metropolitana de Maputo. O mesmo propõe a classificação em quatro categorias: estrada de tronco principal, estrada de tronco, estrada secundária e estrada local, que use os mesmos critérios para a classificação funcional da rede de estradas.

De acordo com Sebastião (2021), afirma que, por mais que existam diferenças na nomenclatura e aplicação, no geral, todos os sistemas de classificação são funcionais. Uma rede de estradas consiste numa hierarquia de três níveis, com nível mais alto dividido em dois subgrupos. Cada nível possivelmente pode ser sujeito a mais subdivisões, de acordo com os requisitos locais.

Segundo IBGE (2001), a maior parte dos países da Europa, América, Ásia e África, nas suas normas classificam as estradas em quatro categorias a saber: quanto a hierarquia, a jurisdição, a área e proximidade de aglomerados populacional e categoria técnica. De acordo com o Quadro 2, pode se observar a classificação.

Quadro 2 – Classificação das estradas em categorias

Quanto a hierarquia	**Quanto a jurisdição**	**Quanto a área e proximidade de aglomerados populacional**	**Quanto a categoria técnica segundo as normas**
Estradas primárias	Estradas federais	Estradas urbanas	Classe especial, (acima de 2.000 veículos por dia)
Estradas secundárias	Estradas estaduais	Estradas rurais	Classe I, (1.000 até 2.000 veículos por dia)
Estradas terciárias	Municipais	Estradas suburbanas	Classe II, (500 à 1.000 veículos por dia)
Estradas vicinais	Vicinais		Classe III, (até 500 veículos por dia)
Estradas não classificadas			Classe IV, esta classe divide - se em duas partes, onde compreende em
			Classe IV A, (50 à 300 veículos por dia)
			Classe IV B, (menos de 50 veículos por dia)

A rede moçambicana respeita uma hierarquia na classificação das estradas, implementada em 2000, seguindo os critérios estabelecidos no Decreto-Lei nº 50/2000.

De acordo com o Boletim da República (BR) (2000), o sistema de classificação de estradas tem como grande objectivo promover a funcionalidade das mesmas. Para a região em estudo a rede de estradas está classificada em: primária, secundária, terciária, vicinais, urbanas e não classificadas.

3.2. ENERGIA ELÉTRICA

As redes de interligação têm como finalidade assegurar a ligação entre redes de transporte, mas

também entre redes de distribuição. Podendo pertencer a países ou regiões vizinhas além disso, podem ser geridas por empresas diferentes. Qualquer rede de energia eléctrica europeia funciona interligada com 220kV ou 400kV e uma frequência comum de 50Hz. Este funcionamento tem como vantagens, no caso de perda de fontes geradoras de energia eléctrica (Ferreira, 2018).

Em Moçambique, a interligação é semelhante à da europa, podendo se diferenciar no funcionamento de níveis de tensão que varia de 110kV a 500kV e com uma frequência idêntica de 50Hz. Para a região de Maputo funciona interligada com 11kV a 33kV, com a excepção da industrial de alumínio Mozal, que faz uma interligação de 330kV vinda da África do Sul.

Produção Transmissão Distribuição Consumo

Figura 2 - Produção, Transmissão, Distribuição e Consumo de energia eléctrica

3.3. ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A rede de distribuição de água é a unidade do sistema de abastecimento que conduz água para os pontos de consumo (habitações particulares, Prédio, indústrias entre outros). É formada por um conjunto de tubulações e peças especiais dispostas convenientemente de forma a garantir o bom atendimento dos pontos de consumo (Guedes, 2018)

A interligação tem como finalidade assegurar o abastecimento de água entre as fontes de captação de águas superficial bem como das águas subterrâneas. Podendo ser do sistema público ou mesmo dos operadores privados a serem geridos por diversos gestores (empresas).

Na região de Maputo, a rede de interligação da infra-estrutura de abastecimento de água é feita a partir de dois sistemas nomeadamente, o superficial e o de águas subterrâneas.

O sistema de águas superficiais é captado a partir dos rios Umbeluzi e Incomati, e por via de adução é transferida para Estação de Tratamento de Água (ETA), da ETA é retirada para tanques de elevação e de conservação que por sua vez através de adutoras transferem para áreas de abastecimento. A região de Maputo possui 12 centros distribuidores, em que cada um deles está acoplado a uma rede de distribuição. Os dois sistemas fundem-se no centro distribuidor da Machava, que garante a continuidade da distribuição da água à cidade de Maputo. De acordo como documenta a figura 3.

Manacial (captação) | Estacão de Tratamento de água | Tanque de elevação e conservação de água | Centro distribuidor de Mathalemele e Guava | Fontenário Publico, torneira particular dentro do quintal

Figura 3: Interligação de rede de abastecimento de água na região de Maputo

Os sistemas de águas subterrâneas são feitos a partir de perfuração de furos de água, do furo são captadas para tanques de elevação e conservação de água, por sua vez é reconduzida para centros distribuídos privados, dos centros é transportada por adução para fontenários privados ou torneiras canalisadas em residências particulares. Pode-se observar de acordo com Figura 4, abaixo.

Furo de água privados, furo de água com Bomba manual | Tanque de elevação e conservação de água | Fontenário Privado, torneira particular

Figura 4 – Sistema de interligação da rede de abastecimento de águas subterrâneas na região de Maputo

3.4. SANEAMENTO

A Direção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento (DNAAS) é a entidade responsável pelo saneamento, a nível sectorial, não obstante o papel do Município e as atribuições da AIAS, em gerir todo o serviço de saneamento e de construir as infraestruturas. Na Região de Maputo, existe uma rede

de coletores que serve cerca de 60% dos residentes da cidade de Maputo, a qual está ligada à ETAR do Infulene que, neste momento, encontra-se em reabilitação e ampliação, para aumentar a sua capacidade de encaixe. Enquanto isso, a zona alta continua a fazer as suas descargas no mar. Importa referir a existência da ETAR do Zimpeto, que também serve a uma pequena cidadela, a Vila Olímpica.
Quase toda a Região de Maputo usa o Saneamento localizado, com a excepção de uma parte da zona cimento da cidade de Maputo. A gestão das lamas fecais é feita individualmente, pelas famílias, que contactam serviços privados de limpeza de fossas. Nos bairros menos desenvolvidos, usam-se latrinas melhoradas, que são encerradas quando enchem, abrindo-se outra, ao lado.
Os provedores dos serviços de saneamento também estão organizados em associações, sendo estes serviços licenciados pelo Município. Recentemente, foi aprovada a tarifa de saneamento a ser paga pelos munícipes, nas cidades de Maputo e Matola. A referida tarifa/taxa está acoplada à factura de água, pressupondo-se que os que são servidos por FPA's não serão abrangidos. Atualmente, o Banco Mundial está a financiar várias iniciativas de saneamento, em todo o país, incluindo os serviços de gestão de lamas fecais. Os Municípios têm um papel preponderante, na gestão dos serviços de saneamento do meio.

4. INFRA-ESTRUTURAS E O DESENVOLVIMENTO REGIONAL

De acordo com a visão de Andion (2003), o desenvolvimento é sinónimo de crescimento, progresso e aumento de riqueza, caracterizando o estagio ecónomico, social e político de uma comunidade com altos índices de rendimento dos factores de produção (capital, trabalho e recursos naturais).
Segundo Oliveira e Lima (2003), apud Madureira (2015), ao se falar do desenvolvimento regional deve-se ter em conta a participação da sociedade local no planeamento continuo da ocupação do espaço e na distribuição dos beneficios do processo de crescimento.
Desenvolvimento Económico de um país ou estado – nação é o processo de acumulação de capital e incorporação de progresso técnico ao trabalho e ao capital que leva ao aumento da produtividade, dos salários, e do padrão médio de vida da população. A medida mais alta de desenvolvimento económico é a do aumento da renda por habitante, porque esta mede aproximadamente o aumento geral da produtividade (Bresser-Pereira, 2008).
De acordo com Myrdal (1957) apud, Benitez (1999), diversos motivos afectam o desenvolvimento regional e a de infra-estrutura tem participação directa, indirecta ou velada nas diversas teorias de desenvolvimento regional.
Segundo North (1975) apud Benitez (1999), relata que uma região só alcança o desenvolvimento regional quando esta se especializa em actividades terceárias e produz para exportação. Para atingir

este estágio, os recursos energéticos têm importância decisiva, e aos custos de transporte atribui-se um papel fundamental.

A infra-estrutura, ao criar condições favoráveis para o desenvolvimento de empresas, industrias e emprego, ressalta sua importância sobre a actividade económica ao propiciar melhores condições para a produção. Dai que a infra-estrutura pode apresentar efeitos directo ou indirectos sobre o emprego, a renda, o progresso técnico e outras variáveis económicas (Benitez, 1999).

Na perspectiva de Benitez (1999), a infra-estrutura de forma directa, por intermedio de serviços públicos é considerada como um bem final por melhorar o bem-estar e a qualidade de vida daqueles que a consomem. E de forma indirecta, a infra-estrutura afecta o bem estar, as actividades e processos produtivos por meio de sua caracteristica de bem público intermédio, que afecta a actividade económica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo teve como resultados uma avaliação trivial, sob ponto de vista, das três infra-estruturas em estudo e o contributo de cada uma delas ao desenvolvimento regional, da região de Maputo. Importa realçar que cada uma das infra-estruturas apresenta uma certa característica específica como ilustra o mapa abaixo, assim como a respectiva descrição.

A interligação das estradas na região de Maputo é feita a partir das estradas Nacionais (primárias, secundárias, terciárias e vicinais). Ao nível dos municípios há estradas Municipais (estradas urbanas). Quanto aos distritos não municipalizados, estão as estradas (não classificadas), de acordo com a Figura 5, a baixo.

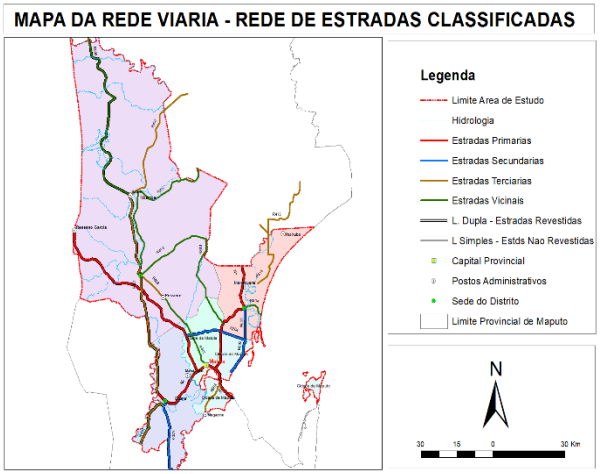


Figura 5 - Rede de estradas na região de Maputo

Os provimentos destas estradas são dados a três entidades responsáveis por prover, assistir em manutenção e interromper a circulação mediante as necessidades da região. De acordo com o Quadro 3, a baixa.

Quadro 3 - Entidades responsáveis no provimento das infraestruturas de estrada na região de Maputo

Entidade	MOPRH	Conselho Municipal	Governo do Distrito
Estradas	Primárias	Estradas Urbanas	Estradas não classificadas
	Secundárias		
	Terciárias		
	Vicinais		

Para a região em estudo as estradas primárias interligam-se com os principais portos e caminhos-de-ferro da cidade de Maputo e da província de Maputo, com as principais fronteiras do Zimbabwe, Botswana, Eswatine e África do Sul. Enquanto as estradas secundárias interligam-se com as estradas primárias, fazendo uma conexão entre os principais portos marítimos e fluviais, centros comercias, terminais de carga indústrias, centros agrícolas e estações ferroviárias. As estradas terciárias interligam-se, com os principais centros comerciais, terminais de carga, dos caminhos-de-ferro e principais centros agrícolas, ao nível dos distritais, com as estradas secundárias e primárias. As estradas vicinais urbanas e as não classificadas interligam-se entre si bem como, com as estradas terciárias, por se registar um baixo nível de tráfego.

O desenvolvimento registado na região de Maputo provido pelas infra-estruturas de estradas, permitiu concluir que há 10 anos a região de Maputo beneficiou-se da construção da circular de Maputo que liga a província de Maputo com a cidade de Maputo, numa forma anelar, passado pelo distrito de Marracuene; na mesma época, houve a construção da ponte Maputo-Katembe. Estes dois empreendimentos construídos, valorizaram a terra das famílias afectadas bem como foi uma mais-valia para os residentes daquela região. Se se tiver em conta que isso proporcionou novos postos de emprego as famílias, que ali residem, trouxe oportunidade de negócios dentre outro ganhos.

A infra-estrutura eléctrica a sua interligação é feita por três níveis de tensão nomeadamente, a alta, média e a baixa tensão. O nível de alta tensão é a via de transporte da fonte de produção para as principais subestações do país. Ela é feita com uma capacidade de 66 KV entre fases. A interligação da energia é tida a partir da subestação de MFULENE de seguida distribuída para a Cidade de Maputo e a província de Maputo. Ao nível da média tensão é uma linha de transmissão com tensão superior a 1kV e igual ou inferior a 66kV. A interligação desta linha é feita de acordo com o tipo de consumo. Ela recebe da alta tensão, a transforma para média tensão e distribui energia eléctrica por toda a região de Maputo. A distribuição é variada de 11kV a 33kV mediante os consumidores. O maior consumo é

feito pelo nível de baixa tensão, com uma tensão entre fases igual ou inferior a 1kV. O alto nível de consumidores desta tensão é devido a sua natureza de fornecer ao consumo doméstico.

Quanto ao desenvolvimento regional da região de Maputo provido pela interligação da energia eléctrica, pode-se medir pelo número de postos de transformação de energia que a região possui. O número de postos de transformação de energia que uma região, comunidade ou local dispõe, permite inferir a hipótese que a mesma é desenvolvida na medida da existência de muitos postos de trabalho, provida pelas indústrias ali localizadas ou mesmo dos serviços públicos ou privados. A existência de maior empregabilidade garante que a população residente daquela região demanda de renda salarial, poder de compra, aumento da renda, ditando assim o desenvolvimento (Bresser-Pereira, 2024).

A região em estudo, carateriza-se por um desenvolvimento alto para a província de Maputo, concretamente, no distrito da cidade da Matola, por registar um dos maiores parques industrial e seguido da cidade de Maputo. Já para os distritos de Boane, Marracuene e Moamba o seu desenvolvimento é tido pela especialidade das práticas agrícolas, extracção mineira de recursos naturais e pela existência de postos de trabalhos públicos, privados e etc.

Com relação a interligação do abastecimento de água e saneamento, a região de Maputo, observa uma competição no fornecimento, desses serviços o que, de certa forma, tem sido benéfico para os consumidores. A competição referida recai entre o sector público e o privado, em crer prestar melhores serviços aos consumidores.

Dado o facto da conetividade existente, entre o sector privado e o público, chega-se ao entendimento, que a opção da escolha dos consumidores, faz com que a região em estudo, registe um desenvolvimento vigoroso no abastecimento de água e no saneamento o que contribui na melhoria da qualidade de vida das populações ali existentes.

6. CONCLUSÕES

A região de Maputo faz a sua interligação das infra-estruturas de estradas, energia assim como do abastecimento de água e saneamento partido das redes gerais para as mais particulares.

As infra-estruturas de estradas na região em estudo, fazem uma interligação com as infra-estruturas de energia, redes de abastecimento de água e saneamento do meio em zonas urbanizadas. Porem se constata a ausência da interligação das infra-estruturas ao nível das zonas informais (assentamentos informais).

A ausência da interligação das infraestrutus nas zonas informais, deve-se ao facto de serem zonas não urbanizadas, com registo de ocupações desordenadas. A mesma ausência da interligação é também notada, nas zonas rurais, marcada pela baixa densidade da rede de estradas que as zonas acarretam.

Dos parágrafos anteriores, conclui-se que é necessário investir na urbanização das regiões, porque só assim é que as regiões poderão se beneficiar de infra-estruturas e os seus serviços ao benefício do bem-estar.

O desenvolvimento regional da região de Maputo provido pelas infra-estruturas acima referenciadas destaca-se pela valorização dos espaços onde a população reside. Isto é, por ter passado uma rede de estradas, uma rede eléctrica, uma rede de abastecimento de água e os serviços de saneamento, a população ganhou novos postos de empregos, iluminação pública, novas industriais, bem como abastecimento de água potável de qualidade e um saneamento condigno.

REFERÊNCIAS

AASHTO. (2012). *PAVEMENT MANAGEMENT GUIDE.* EUA: AASHTO.

Andion, C. (5 de Agosto de 2003). Analise de redes e desenvolvimento local sustentavel. *Analise de redes e desenvolvimento local sustentavel*, pp. 37-54.

Benitez, R. M. (19 de JUNHO de 1999). A INFRA-ESTRUTURA, SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES E SEU REFLEXO SOBRE O PRODUTO REGIONAL. *A INFRA-ESTRUTURA, SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES E SEU REFLEXO SOBRE O PRODUTO REGIONAL*, pp. 275-306.

BR. (21 de Dezembro de 2000). *Decreto Lei nº 50/2000.* Obtido de Decreto Lei nº 50/2000: https://archive.gazettes.africa/archive/mz/2000/mz-government-gazette-series-i-supplement-dated-2000-12-21-no-51.pdf

Bresser-Pereira, L. C. (03 de Abril de 2024). *TEXTO-BÁSICO-AULA-6-Crescimento-E-Desenvolvimento.* Obtido de CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO: http://cmpdi.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/269/2020/01/TEXTO-B%C1SICO-AULA-6-Crescimento-E-Desenvolvimento.pdf

CRIR. (2001). *Draft Code of Practice for the Geometric Design of Trunk Roads.* Pretoria, RSA: Division of Roads and Transport Tecnology.

ENERGIA, M. D. (2011). *Estratégia de Desenvolvimento de Energia Novas e Renováveis .* Maputo: PNENR.

Estatistica, I. N. (2017). *Censo Populacional (saneamento, Lixo, Energia, Agua por Localidades).* Maputo - Moçambique: INE.

Ferreira, J. T. (2018). *Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Media e Baixa Tensao - Estágio na Helenos, S.A.* Coimbra: ISEC.

Guedes, P. H. (2018). REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA . *Aula-8-Distribuição-Parte1*. Brasil: Universidade Federal de Pelotas .

Hammes, J. (2005). *Orientacoes e Normas para Trabalhos Cientificos .* Porto Alegre: Universidade Catolica do Rio Grande do Sul.

INE. (2017). *Saneamento, Lixo, Energia e Agua por Localidades .* Maputo : INE.

JICA. (2001). *Estudo Sobre Plano Director e Estudo de Viabilidade para o Desenvolvimento de Estradas da Cidade de Maputo.* MAPUTO: JICA.

Madureira, E. M. (Julho/ Dez de 2015). DESENVOLVIMENTO REGIONAL: PRINCIPAIS TEORIAS. *Revista Thema et Scientia - Vol 5*, 2.

MAE. (2005). *Perfil do Distrito de Marracuene.* Maputo: MAE.

Muiuane. (2014). *Avaliação dos Aquiferos da Região Sul .* Maputo.

Sebastião, S. (2021). *Modelagem de um Sistema de Informacao para Gestao Sustentavel da Rede de estradas do Municipio de Maputo.* Maputo .

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

A SUSTENTABILIDADE DOS REVESTIMENTOS TRADICIONAIS

Isabel Torres[a,b]

[a] Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, itorres@dec.uc.pt

[b]Itecons, Coimbra, Portugal

RESUMO

Os revestimentos das fachadas dos edifícios são o seu elemento protetor e desempenham um papel fundamental na sua preservação e estanquidade. Estes revestimentos são a camada mais externa das construções e como tal são naturalmente os mais expostos a condições ambientais adversas e a inúmeras agressões mecânicas ou de outra índole, que podem provocar o aparecimento de patologias diversas, obrigando assim à execução trabalhos de reabilitação.

Diversos parâmetros devem ser tidos em conta para que se possa proceder a uma escolha o mais adequada possível de argamassas de reabilitação/argamassas para construções novas. Devem-se considerar as características dos suportes, as características dos revestimentos existentes, as condições ambientais, etc. Hoje em dia em dia, sabe-se que há outro parâmetro que temos que ter em conta, mas que nem sempre é considerado: a sustentabilidade.

O que se pretende com este artigo é fazer uma análise comparativa da sustentabilidade dos diversos componentes das argamassas tradicionais (agregados, ligantes, etc.) e da sua forma de aplicação de modo a que se possa promover a utilização de argamassas tradicionais cada vez mais sustentáveis.

Palavras-chave: Revestimentos tradicionais, revestimentos de fachadas, sustentabilidade das argamassas tradicionais

1 INTRODUÇÃO

O tema "sustentabilidade dos revestimentos tradicionais", devido à imensa vastidão de revestimentos/assuntos que poderiam ser abordados obriga a fazer um pequeno enquadramento e, de alguma forma, limitar a extensão do artigo.

A abrangência do próprio tema sustentabilidade, obriga também a introduzir algumas "restrições". Neste artigo serão essencialmente abordadas as questões energéticas, de deposições de resíduos e os recursos não renováveis. Quanto ao tipo de revestimentos tradicionais, serão referidos os revestimentos de paredes mais tradicionais que possuímos na nossa construção: os rebocos. Dentro dos rebocos, por vezes, designamos como rebocos tradicionais aqueles que são preparados em obra. Será esta a terminologia usada neste artigo, embora os conceitos/definições possam ser também alargados aos rebocos pré-doseados em fábrica. O objetivo é abordar a sustentabilidade de rebocos com os ligantes mais usados em edifícios antigos como seja a terra, a cal aérea ou a cal hidráulica face aos rebocos com ligantes mais recentes como são os cimentos.

O que se pretende é levantar algumas questões que façam, mais uma vez, meditar, não só sobre a questão da reabilitação e dos revestimentos dos edifícios antigos, mas também sobre os revestimentos de edifícios novos, nos quais continuamos a aplicar rebocos como revestimento das fachadas. Pretende-se abordar a sua maior ou menor sustentabilidade e como podemos promover o seu aumento.

2 SUSTENTABILIDE DA CONSTRUÇÃO

2.1 CONCEITOS GERAIS

De acordo com relatório "Nosso Futuro Comum" (também conhecido como Relatório Brundtland) da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, publicado em 1987 (Brussels, 2018), a sustentabilidade é um conceito amplo e multifacetado que se refere à capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades.

Tendo em conta este conceito geral de sustentabilidade, será que é importante aumentar a sustentabilidade da construção? É crucial por diversas razões, tanto ambientais quanto económicas e sociais. A indústria da construção é responsável por elevadas emissões de gases de efeito estufa, que se podem reduzir com o uso de materiais mais eco eficientes. O uso eficiente de recursos naturais como a água e a redução da extração e utilização de recursos finitos contribui também para uma maior sustentabilidade. Quanto aos resíduos sabemos que a promoção da sua redução, reutilização e reciclagem, diminuindo a quantidade a enviar para aterros, reduz o impacto ambiental associado à sua disposição em aterro. O uso de materiais reciclados e recicláveis pode transformar resíduos em recursos valiosos, contribuindo para uma economia circular. A promoção da eficiência energética resulta em economia de custos e redução da pegada de carbono. A integração de fontes de energia renovável ajuda a reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Além destas razões ambientais, de gestão de resíduos e de eficiência energética existem outras razões de qualidade do ambiente, económicas e de responsabilidade social, igualmente importantes. De facto, os edifícios sustentáveis proporcionam um ambiente interno mais saudável, com melhor qualidade do ar, iluminação natural, ventilação adequada e controle de humidade, que melhora a saúde e o bem-estar dos ocupantes. Quanto às razões económicas pode-se referir-se que, por um lado a eficiência energética e o uso eficiente dos recursos levam a uma redução dos custos operacionais ao

longo da vida do edifício e por outro lado os edifícios sustentáveis têm maior valor de mercado. Finalmente pode-se também referir que adotar práticas de construção sustentável pode melhorar a reputação de empresas e organizações, contribuindo para o desenvolvimento de comunidades mais resilientes e sustentáveis e promovendo a qualidade de vida.

A adoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção é então fundamental para que se promova um futuro mais sustentável e mais saudável para todos e principalmente para as gerações futuras.

Face a estas exigências como poderemos então aumentar a sustentabilidade das argamassas e contribuir para uma construção também ela mais sustentável?

Uma argamassa é constituída por diversas componentes, nomeadamente:

- Um ou mais ligantes, agregados, água, possíveis aditivos/adjuvantes.

Quanto aos ligantes podemos ter:

- Construções antigas: terra, cal aérea e cal hidráulica;
- Construções novas: cal hidráulica e cimento

Quanto aos agregados podemos ter:

- Agregados naturais: areias do rio, de areeiros ou desperdícios de pedreiras;
- Agregados reciclados

2.2 SUSTENTABILIDADE DOS LIGANTES

Os ligantes devem ter, como propriedade fundamental, a capacidade de aglomerar uma porção elevada de agregados, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência. Em conjunto com a água formam uma pasta que deve garantir estabilidade aos rebocos, quando em contacto com o meio ambiente e durante o processo de secagem.

Os ligantes podem ser inorgânicos e orgânicos. Dentro dos ligantes inorgânicos temos os ligantes aéreos e os ligantes hidráulicos. Os hidráulicos são constituídos por pós finos que, adicionados com água, formam uma pasta que endurece devido à reação química entre o pó e a água. Podem endurecer ao ar ou imersos. Os aéreos não endurecem imersos pois necessitam de dióxido de carbono para os transformar em carbonatos. Os orgânicos são os hidrocarbonetos e resinas sintéticas (Leal, A. 2009).

A cal aérea é obtida a partir do calcário, fundamentalmente constituído por $CaCO_3$, com mais ou menos impurezas. A cal hidráulica natural (NHL) obtém-se de calcários com o máximo de 20% de argila (calcários margosos), contendo, portanto, compostos argilosos (SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3), a cal hidráulica artificial (HL) provém da mistura de hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio pré-determinada. No caso do cimento Portland, o seu fabrico pressupõe a utilização de calcários margosos ou a mistura de calcário com argila, variando a componente argilosa entre 20% e 40%. O clínquer, que é obtido após a transformação térmica das matérias-primas para a produção do cimento contem teores em CaO (60% e 68%), em SiO_2 (17% e 25%), em Al_2O_3 (2% a 9%) e em Fe_2O_3 (0,5% e 6%). A adição de gesso, é efetuada na altura de moagem do clínquer resultante do processo de cozedura, de forma a produzir cimento CEM em que o teor de calcário e sílica reativos deverá ser superior a 50%. Os compostos básicos MgO, K_2O e Na_2O estão normalmente presentes de forma residual nas matérias-primas destes materiais.

Sabemos que os diferentes tipos de ligantes possuem características diferentes que tornam uns mais adequados para construções antigas, nomeadamente a terra (Dias, I. 2013), a cal aérea e a cal hidráulica e outros mais adequados para construções novas como a cal hidráulica e o cimento.

Mas, em termos de sustentabilidade, serão todos igualmente sustentáveis? Todos provêm da natureza e de recursos não renováveis, mas as eventuais temperaturas de cozedura envolvidas são bem distintas e podem fazer desde logo alguma diferença entre a sustentabilidade de uns em relação à sustentabilidade de outros.

Estamos a falar de temperaturas de cozedura entre os 0ºC para a terra e cerca de 1450º C para o cimento, passando pela cal aérea e pela cal hidráulica com temperaturas intermédias, sendo a temperatura de cozedura da cal aérea mais baixa que a temperatura de cozedura da cal hidráulica (Figura 1).

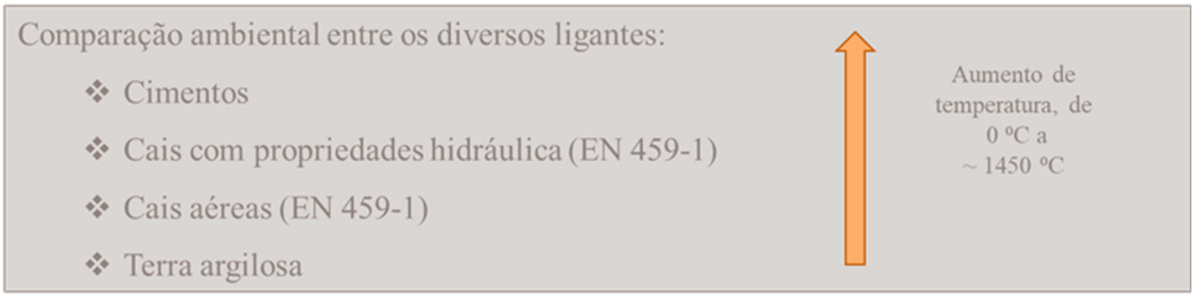


Figura 1: Comparação ambiental entre diversos ligantes.

A cal foi um dos primeiros produtos industriais conhecidos pelo homem e o seu uso como ligante foi predominante até ao aparecimento do cimento, na década de 50/60 do século passado (Martins, V. 2012). A necessidade de mão de obra especializada envolvida em toda a sua preparação foi uma das principais razões para o seu abandono. Hoje em dia com o conhecimento da forte incompatibilidade existente entre o cimento e as paredes de edifícios antigos (Figura 2), o uso deste tipo de ligante foi reativado e de acordo com o relatório "Competitividade dos Setores Europeus de Cimento e Cal" as indústrias de cal e gesso representam mais de 20 milhões de toneladas anuais e uma faturação de 4,2 mil milhões de euros, com 15 mil empregos diretos. No mesmo relatório é referido que cerca de 18% dessa produção de cal é direcionada para materiais de construção e engenharia civil, nomeadamente para incorporação em argamassas para substituição parcial ou total do cimento, contribuindo assim para uma construção mais sustentável (Menezes, M et al, 2012)

Além de maior sustentabilidade, as argamassas de cal comparadas com as de cimento possuem maior permeabilidade ao vapor, que é muito importante para aplicação em suportes antigos, permitindo uma melhor capacidade de secagem dos mesmos e um comportamento mais plástico também muito interessante para os suportes mais antigos que são, por natureza, mais deformáveis.

Outras vantagens das argamassas de cal fase às de cimento:

- permitem a colmatação das fendas (dissolução-precipitação de $CaCO_3$)
- possuem menor presença de sais (menos eflorescências)
- permitem uma redução da pegada de carbono e cumprem os critérios de construção sustentável

Figura 2: Incompatibilidade entre argamassa de cimento e paredes de edifícios antigos.

2.3 SUSTENTABILIDADE DOS AGREGADOS

Os agregados são um dos principais componentes da argamassa e desempenham um papel fundamental nas propriedades físicas e mecânicas das mesmas. São responsáveis por conferir volume, resistência e trabalhabilidade às argamassas. São adicionados à mistura, preenchendo os vazios entre os grãos de ligante e diminuindo a quantidade de ligante necessário.

Provêm da desagregação de rochas, que podem ser siliciosas (do rio ou de areeiro) ou calcárias (desperdícios de pedreiras). Os agregados têm uma forte influência no comportamento das argamassas. Há vários fatores, como sejam, a dureza, a forma dos grãos, a granulometria, a porosidade que afetam o comportamento da argamassa. A areia funciona como esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante.

A areia do areeiro em comparação com a areia do rio é mais áspera, tem grãos mais angulosos e mais impurezas. Tem maior capacidade de aderir ao ligante. Mas como tem maior superfície especifica obriga a maior adição de água, o que conduz a maior retração. Por seu lado, a areia do rio é mais "lavada" tem grãos mais rolados que conferem menor resistência.

Ambas devem possuir algumas características comuns como: granulometrias adequadas à utilização, inalterabilidade a agentes externos, compatibilidade química com ligantes e ausência de substâncias nocivas, etc.

Em termos de sustentabilidade, existirá alguma diferença entre elas? Pouca, pois ambas são recursos naturais não renováveis.

Poderemos aumentar a sustentabilidade intervindo no tipo de agregado? A substituição parcial de agregados correntes, especificamente extraídos como recurso natural, por outros resultantes de subprodutos ou resíduos industriais, tem muitas vantagens ao nível da sustentabilidade, quer pela redução de consumo de recursos naturais, quer pela diminuição energética ao nível da extração e transporte, quer ainda pela redução de resíduos a depositar em aterro.

Têm sido diversos os resíduos incorporados em argamassas.

O aproveitamento de resíduos/subprodutos para incorporação em argamassas apresenta então vantagens em três aspetos:

- Reutilização de material desperdiçado com consequente redução do volume de material depositado em aterro
- Redução da produção de ligantes e/ou extração rochas e areias
- Eventual melhoria das propriedades das argamassas

Esta incorporação, confere também a valorização económica e ambiental destes resíduos, promovendo o conceito de sustentabilidade, com a diminuição da sua deposição em aterro.

Investigações desenvolvidas no Itecons têm analisado a incorporação em argamassas de diversos tipos de resíduos.

- Resíduos de cerâmica de barro vermelho em argamassas de cal: a incorporação de resíduos cerâmicos de barro vermelho (Figura 3) em argamassas de revestimento é uma técnica com vários milhares de anos, anterior ao período do Império Romano. Em Portugal são ainda visíveis, em ruínas dessa época, vários exemplos de revestimentos com a incorporação deste tipo de material, como são os casos de Troia e Conímbriga. Em granulometria fina podem eventualmente atuar como pozolanas, melhorando algumas características das argamassas de cal aérea, conferindo-lhes propriedades hidráulicas. Poderão também permitir a redução da quantidade de ligante e, como tal, reduzir as emissões poluentes e o consumo de recursos naturais e de energia inerentes da sua produção. Em granulometrias adequadas, mais grossas, podem revelar-se um bom substituto do agregado tradicional natural, potenciando a redução de materiais de origem natural e a reutilização de materiais depositados em aterro. Argamassas essencialmente destinadas à reabilitação (Gina, M. et al, 2014).

Figura 3: Resíduos de cerâmica de barro vermelho.

- Resíduos de casca e palha de arroz: a cultura do arroz terá sido introduzida em Portugal no reinado de D. Dinis, no Baixo Mondego, zona que continua a ter uma enorme produção de arroz gerando grandes quantidades de resíduos. A deposição de resíduos tem-se agravado muito nas últimas décadas. Casca e a palha do arroz possuem baixo peso específico, biodegradação lenta e composição rica em sílica e fibras. As argamassas obtidas com a incorporação de casca e palha de arroz (Figura 4) apresentaram leveza, boa absorção acústica e bom isolamento térmico. Com esta incorporação atingem-se dois objetivos: reutilizar os resíduos da cultura do arroz e melhorar o comportamento térmico de argamassas(Torres, I et al, 2016).

Figura 4: Resíduos de casca e palha de arroz.

- Resíduos de casca de ovo: são um subproduto gerado em grande quantidade pela indústria alimentar e avícola, e também pelo setor da restauração e atividades domésticas. O potencial de resíduos de casca de ovo de Portugal aproxima-se das 14 mil toneladas por ano. Nos estudos realizados foram introduzidos, em substituição parcial da areia, resíduos de casca de ovo triturados e secos (Figura 5) em estufa, em 4 percentagens distintas, e foi analisado o seu comportamento físico e mecânico após 28 dias de cura. Verificou-se que a introdução da casca de ovo permitiu melhorar o comportamento higrotérmico, apesar das perdas registadas em termos de resistência à tração por flexão. Verificou-se uma aparente melhoria da resistência adesiva e todos os parâmetros correspondentes ao desempenho higrotérmico sofreram melhorias significativas, proporcionais ao aumento da quantidade de casca de ovo introduzida nas composições. Os resultados obtidos foram interessantes e confirmaram a viabilidade de aproveitamento deste tipo de resíduos para incorporação em argamassas em substituição do agregado (Gina, M. 2018).

Figura 5: Resíduos de casca de ovo.

- Resíduos de lama de ETAR: As águas residuais para poderem ser escoadas para o mar ou rio são previamente tratadas nas ETARs. O seu tratamento passa por diversas fases: primário, secundário e terciário, das quais resultam resíduos de natureza orgânica – as lamas de ETAR. Em Portugal a produção anual de lamas é elevada e apenas uma pequena percentagem é reciclada como adubo para solos agrícolas. A valorização é muito reduzida, verificando-se uma deposição em aterro ainda com algum significado. Incorporando-as em materiais de construção, nomeadamente argamassas, conseguimos reduzir essa deposição em aterro contribuindo para uma maior sustentabilidade ambiental. Para o efeito, foram estudadas argamassas de cimento com introdução lamas de ETAR tratadas e secas em estufa (Figura 6) em substituição parcial do cimento, em 3 percentagens distintas, e foi analisado o seu comportamento físico e mecânico após 28 dias de cura. Foram também analisadas argamassas com introdução de lamas calcinadas e os resultados obtidos foram comparados com os

resultados obtidos para argamassas com introdução de lamas não calcinadas. Foi possível concluir que a introdução de lamas de ETAR em argamassas pode ser uma solução para o reaproveitamento das mesmas evitando a sua deposição em aterro. Por outro lado, verificou-se que a calcinação das lamas poderá não ser interessante, na medida em que a melhoria dos parâmetros avaliados neste estudo não foi significativa e a calcinação envolve custos energéticos elevados (Isabel Torres et al 2018).

Figura 6: Resíduos de lamas de ETARs.

3 COMPORTAMENTO EM SERVIÇO

Serão apenas os diversos componentes das argamassas que podem contribuir para a sua maior sustentabilidade? Quando avaliamos as características das argamassas em que nos baseamos para proceder à escolha daquela que melhor se adequará ao fim a que se destina fazemo-lo em laboratório, sobre provetes com medidas específicas e executamos os ensaios de acordo com a normalização aplicável existente. Será que após aplicação sobre os diferentes suportes o comportamento das argamassas vai ser o mesmo e as suas propriedades vão ser as mesmas? Não. O comportamento após aplicação no suporte vai alterar-se e por isso é muito importante conhecer o comportamento das argamassas em serviço.

Com o desenvolvimento, no Itecons em colaboração com o IST, de um projeto de investigação (IF_MORTAR) foi possível avaliar a influência de diversos tipos de suportes em diversos tipos de argamassas. Com esse objetivo em mente foram caracterizados diversos tipos de suportes, usuais para aplicação de argamassas, nomeadamente, tijolo cerâmica maciço e vazado, blocos de betão corrente e leve, placas de betão e pedra calcaria. Foram também caracterizados diversos tipos de argamassas usuais nos nossos edifícios, nomeadamente argamassas de cimento, de cal hidráulica e de cal aérea, por duas vias diferentes: numa primeira fase foram determinadas as suas características através da execução de provetes laboratoriais moldados em moldes metálicos (Figura 7), que foram ensaiados de acordo com a normalização aplicável e numa segunda fase, as argamassas foram aplicadas sobre os diversos suportes (Figura 7) e, após o período de cura adequado, essas argamassas foram destacadas dos suportes e foram caracterizadas com o mesmo tipo de ensaios, embora com as devidas adaptações devido à sua espessura. No final, e por comparação das características obtidas em ambas as fases foi possível avaliar as alterações introduzidas pela a aplicação das argamassas em suportes com diferentes características. Foi possível concluir que quanto mais porosos forem os suportes, maior influência irão ter nas propriedades analisadas. Com este conhecimento adicional sobre o comportamento das argamassas é possível proceder à sua escolha de uma forma mais sustentável. Se sabemos, por exemplo, que determinada argamassa após aplicação no suporte têm a sua resistência mecânica aumentada, podemos escolher uma argamassa “mais fraca”, com menos ligante, para responder às nossas exigências de comportamento mecânico, tornando a nossa escolha mais sustentável.

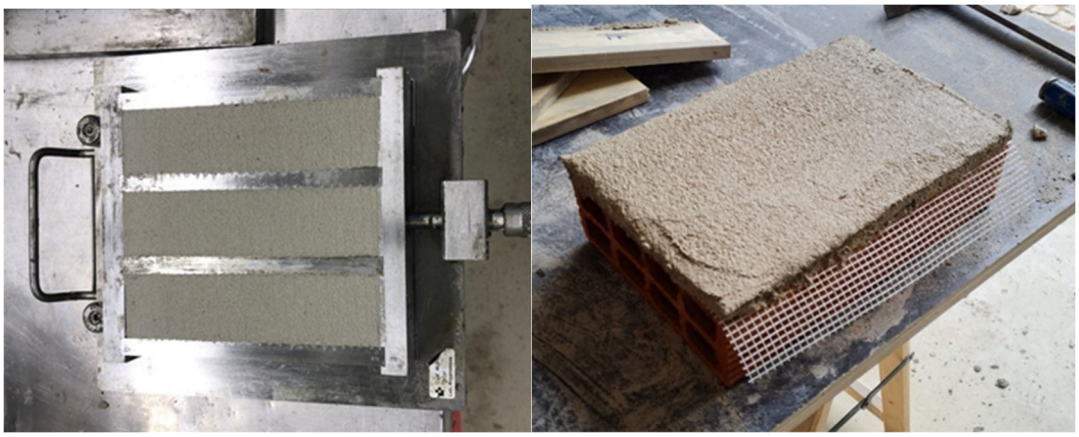


Figura 7: Argamassas em provetes laboratoriais e aplicadas em suportes.

4 CONCLUSÕES

Os revestimentos das fachadas de edifícios à base de argamassas continuam um tipo de revestimento muito utilizado, quer seja em trabalhos de reabilitação com argamassas de cal aérea ou cal hidráulica quer seja em construções novas com argamassas de cal hidráulica ou de cimento.

Na sua composição usamos ligantes, agregados, água e, por vezes, adjuvantes e aditivos vários.

Para proceder à escolha mais adequada da argamassa a utilizar devemos ter em consideração as características das próprias argamassas e também as características dos suportes onde elas irão ser aplicadas. Para trabalhos de reabilitação temos que garantir que haja compatibilidade entre a argamassa escolhida e os elementos existentes, nomeadamente as argamassas e os suportes.

Atualmente existe um novo "parâmetro" a considerar na escolha das argamassas aplicar, quer seja em reabilitação que seja em construção nova: a sua sustentabilidade. Sabemos que a produção de ligantes como cal aérea, cal hidráulica ou cimento envolvem a exploração de recursos naturais não renováveis (rochas calcárias) e consumos energéticos mais ou menos elevados com a extração e cozedura das referidas rochas. Sabemos também que a utilização de areias naturais envolve também o consumo de recursos naturais não renováveis e consumos energéticos associados à sua extração. Torna-se então cada vez mais importante pensar na redução do consumo de recursos naturais e na redução dos consumos energéticos associados, de forma a tornar as argamassas mais sustentáveis. Como foi referido a utilização de resíduos pode ser uma boa alternativa que tem vindo a ser progressivamente estudada com resultados muito promissores. Com esta utilização estamos não só a reduzir o consumo de recursos não renováveis e os consumos energéticos como estamos também a reduzir a deposição em aterro dos resíduos. O conhecimento do comportamento das argamassas "em serviço" é também outro elemento a ter em consideração e que pode tornar a escolha das argamassas a utilizar numa escolha mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

Eires R, Cardoso C, Camões A. Argamassas de terra e cal reforçadas com fibras naturais. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5, 6 e 7 de março de 2014, Guimarães, Portugal

Leal A. Argamassas tradicionais de revestimento de paredes: fendilhação e sua reparação. Tese Msc, Engenharia Civil. 2009. ISEL. Lisboa. Portugal

Dias, I. Desenvolvimento e Caracterização de Argamassas de Cal Aérea e Terra: A Influência da Terra como Agregado Parcial. Tese Msc, Engenharia Civil. 2013. FCT Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. Portugal

Martins, V. Argamassas Sustentáveis de Baixa Retração. Tese Msc, Engenharia Civil. 2012. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Guimarães. Portugal

Sousa, V, Pereira, F, Brito, J. Rebocos Tradicionais: Principais Causas de Degradação. Revista Engenharia Civil – UM, Número 23, 2005

Menezes, M. Veiga, MR. Santos, A. Técnicas tradicionais de revestimentos históricos exteriores. Relato de entrevistas com artífices sobre as técnicas tradicionais de revestimentos de cal. Technical Report · January 2012. https://www.researchgate.net/publication/282869082

Gina Matias, Paulina Faria, Isabel Torres (2014). Lime mortars with ceramic wastes: characterization of components and their influence on the mechanical behavior. Construction and Building Materials – Volume 73, 30 December 2014, Pages 523–534. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108

Torres, Isabel; Matias, Gina (2016). Incorporação de palha e casca de arroz em argamassas: estudo do seu comportamento. Congresso Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimoni- REHABEND 2016.

Gina M. Matias, Isabel M. Torres, Paulo Silva, Cecília Silva. Argamassas com incorporação de casca de ovo". III Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimentos. Coimbra, 11 e 12 de outubro de 2018.

Isabel Torres, Gina Matias, Sara Fonseca. Efeito da calcinação de lamas de ETAR no comportamento de argamassas. 3º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (CLB – MCS 2018). Coimbra, 14-16 fevereiro 2018

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024
6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal

IMPACTO DO ENVELHECIMENTO NATURAL NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE CAL – CASO DE ESTUDO

Ana Rita Santos[a]; Maria do Rosário Veiga[a]

[a] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, arsantos@lnec.pt

[b] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, rveiga@lnec.pt

RESUMO

No âmbito do Projeto EEA Grants - Culture Programme 2014-2021 "Coastal Memory Fort", o Laboratório Nacional de Engenharia Civil desenvolveu e caracterizou diversas soluções de argamassas de revestimento, respeitando os critérios de compatibilidade e autenticidade com os materiais originais existentes, de modo a fornecer uma base para selecionar a formulação de argamassas de reparação a adotar na reabilitação do Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo, no concelho da Lourinhã.

As argamassas de revestimento do Forte estão sujeitas a condições ambientais e climáticas muito severas. Estes fatores são de difícil reprodução em laboratório, o que torna desejável uma avaliação em condições reais de aplicação. Para o efeito, foram aplicadas, em painéis experimentais, em muros do Forte de Paimogo, seis soluções de revestimento, à base de cal área, com o intuito de avaliar os efeitos do envelhecimento natural no desempenho físico-mecânico e na durabilidade destas argamassas. Para tal, foi realizado um acompanhamento e monitorização, através de ensaios *in situ*, dessas aplicações.

Nesta comunicação, apresenta-se a metodologia adotada na avaliação do desempenho e discutem-se os resultados obtidos, em conjunto com as características obtidas em ensaios laboratoriais. Finalmente, seleciona-se a solução a recomendar para a reabilitação do Forte.

Palavras-chave: Argamassas, Forte, Reabilitação, Desempenho, Durabilidade

1 INTRODUÇÃO

Localizado na encosta da Praia de Paimogo, no concelho da Lourinhã, o Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo, mais conhecido por Forte de Paimogo está classificado como Imóvel de Interesse Público desde 1957. Concebido para defender a linha costeira a norte de Lisboa, que se desenvolvia desde o Forte de Peniche até Cascais, foi edificado no século XVII (a partir de 1674), integrando a segunda linha de defesa da barra do Rio Tejo (SIPA, 2023).

O Forte, como outras construções edificadas ao longo da linha costeira, está sujeito a um ambiente húmido e salino, assim como a condições climáticas muito agressivas, tais como ventos fortes transportando sais, elevadas amplitudes térmicas, intensa radiação solar e muitos ciclos de molhagem/secagem. Os revestimentos, que têm como função principal proteger as alvenarias, são particularmente expostos a estas ações exteriores, e portanto, em geral, os primeiros a apresentar sinais de degradação (Figura 1).

Figura 1 – Forte de Paimogo e o elevado nível de degradação dos rebocos exteriores (2023)

O estudo dos revestimentos e as ações de conservação e restauro do Património edificado tem adquirido nas últimas décadas grandes avanços técnicos e científicos. A conservação dos materiais originais sempre que tal se verifica possível e a seleção adequada das técnicas construtivas aliada à utilização de materiais com características idênticas aos originais, permitem preservar a autenticidade dos edifícios históricos, mas também permitem um desempenho adequado a longo prazo e a durabilidade de todo o conjunto.

No âmbito do Projeto EEA Grants - Culture Programme 2014-2021 “Coastal Memory Fort”, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. desenvolveu e caracterizou diversas soluções de argamassas de revestimento, respeitando os critérios de compatibilidade e autenticidade com os materiais originais existentes, de modo a constituir uma base para a seleção da formulação de argamassas de reparação a adotar na reabilitação do Forte de Paimogo.

As ações realizadas iniciaram por um registo das composições e características das alvenarias e argamassas que integram o edifício (Veiga *et al*., 2022). Deste registo concluiu-se que as alvenarias originais são constituídas por blocos de pedra (arenitos compactos e calcários negros) de dimensões variáveis e baixa absorção de água. As argamassas originais do Forte são argamassas de cal aérea e areias siliciosas lavadas, com traços ricos em cal. As argamassas são também elas ricas em elementos conquíferos e areias calcárias, compatíveis com o ambiente geológico do Forte. Foram igualmente encontrados nódulos de cal de dimensão significativa. Verificou-se que as argamassas de revestimento originais se encontram sãs dos pontos de vista químico e físico, com resistências elevadas e permeabilidades à água moderadas (Veiga *et al*., 2022), concluindo-se que são muito duráveis e adequadas às condições locais. Como tal, foram tomadas como referência para a formulação e seleção

das soluções de revestimento a adotar na intervenção a realizar. Na sequência da ação anteriormente preconizada, foi desenvolvida uma metodologia de análise de diversas formulações de argamassas com materiais compatíveis aos originais. Esta metodologia envolveu, numa primeira fase, uma extensa campanha laboratorial (Santos e Veiga, 2023, Santos *et al.*, 2023), e posteriormente, após seleção de um conjunto de formulações estudadas na primeira fase, análise do desempenho destas quando expostas às condições climáticas e ambientais do Forte (Veiga e Santos, 2023), uma vez que as condições ambientais severas a que as argamassas irão estar sujeitas, e até mesmo o tipo de suporte e as técnicas construtivas, são fatores de difícil reprodução em condições laboratoriais, o que torna desejável, sempre que possível, uma avaliação em condições reais de aplicação em paralelo com uma avaliação mais detalhada em laboratório.

Para o efeito, foram aplicadas, em painéis experimentais, à escala real, em muros do Forte de Paimogo, seis soluções de revestimento, à base de cal área, com o intuito de avaliar os efeitos do envelhecimento natural no desempenho físico-mecânico e na durabilidade destas argamassas. Para tal, foi realizado um acompanhamento e monitorização, através de ensaios *in situ*, destas aplicações. A decisão sobre a solução a recomendar para aplicação na obra de reabilitação do Forte de Paimogo foi tomada tendo como base o desempenho das argamassas nas aplicações *in situ* e em toda a campanha laboratorial.

2 TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

Com o objetivo de avaliar os efeitos do envelhecimento natural de, aproximadamente, um ano, no desempenho físico-mecânico e na durabilidade das argamassas de revestimento, foram selecionadas quatro composições de argamassa a aplicar em painéis experimentais à escala real (Ca+Cv30%:M_2, Ca+Cv30%:M_3, Ci:Ca:M_2 e Ci:Ca:M_3), que se considerou terem apresentado globalmente os melhores desempenhos na fase anterior do projeto (Santos *et al*., 2023a e b; Veiga e Santos, 2023), tendo em conta o tipo de suporte e as condições de cura a que as argamassas de reparação vão estar sujeitas no Forte. Adicionalmente foram selecionadas mais duas composições de argamassa, idênticas às anteriores, mas apenas com cal aérea apagada como ligante (Ca:M_2 e Ca:M_3), que foram consideradas como referência para análise dos resultados obtidos.

A composição das soluções selecionadas para aplicação *in situ*, assim como as características dos materiais utilizados descrevem-se no Quadro 1 e no Quadro 2, respetivamente.

Quadro 1 – Composição das argamassas em estudo

Composição		Traço (vol.)	Razão água/ligante
Ca+Cv30%:M_2	Cal aérea + cal viva 30% (% vol. cal) + mistura de areia M_2*	(1:0,3):(2,3:0,3)	1,6
Ca+Cv30%:M_3	Cal aérea + cal viva 30% (% vol. cal) + mistura de areia M_3+	(1:0,3):(2,5:0,1)	1,6
Ci:Ca:M_2	Cimento + Cal aérea + mistura de areia M_2*	1:3:(10,8:1,2)	1,7
Ci:Ca:M_3	Cimento + Cal aérea + mistura de areia M_3+	1:3:(11,4:0,6)	1,8
Ca:M_2	Cal aérea + mistura de areia M_2*	1:(1,8:0,2)	1,7
Ca:M_3	Cal aérea + mistura de areia M_3+	1:(1,9:0,1)	1,7

* **mistura de areia M_2**: 90% areia de rio Tejo, d = 0/4 mm + 10% areia calcária, d = 0/1mm;
\+ **mistura de areia M_3**: 95% areia de rio Tejo, d = 0/4 mm + 5% areia calcária, d = 0/1mm.

Quadro 2 – Características dos materiais utilizados na composição das argamassas de reboco

Material	Sigla	Identificação	Baridade (kg/m³)
Ligante	**Ca**	Cal aérea cálcica hidratada em pó_CL90-S, Lusical (H100)	359
	Cv	Cal aérea cálcica viva micronizada_CL90-Q (R5, P2), Lusical	729
	Ci	Cimento Portland branco_CEM II/B-L 32.5R, Secil	926
Areia	**M_2**	Mistura de Areia (90% Areia de Rio Tejo 0/4mm e 10% Areia Calcária 0/1mm)	1479
	M_3	Mistura de Areia (95% Areia de Rio Tejo 0/4mm e 5% Areia Calcária 0/1mm)	1470

2.2 APLICAÇÃO *IN SITU*

As soluções selecionadas foram preparadas *in situ* e aplicadas em painéis com dimensões aproximadas de 1,00 x 1,60 m cada um, num muro circundante do Forte, com uma orientação solar Oeste (Figura 2) (figura 2). Todas as aplicações foram executadas por técnicos da Câmara Municipal da Lourinhã acompanhados por técnicos do LNEC e durante o período em que decorreram as aplicações (agosto de 2022) observaram-se condições atmosféricas caracterizadas, em geral, por tempo soalheiro (22 ± 2°C) e seco (humidade relativa aproximada de 65%), com leve brisa de vento (windguru.cz).

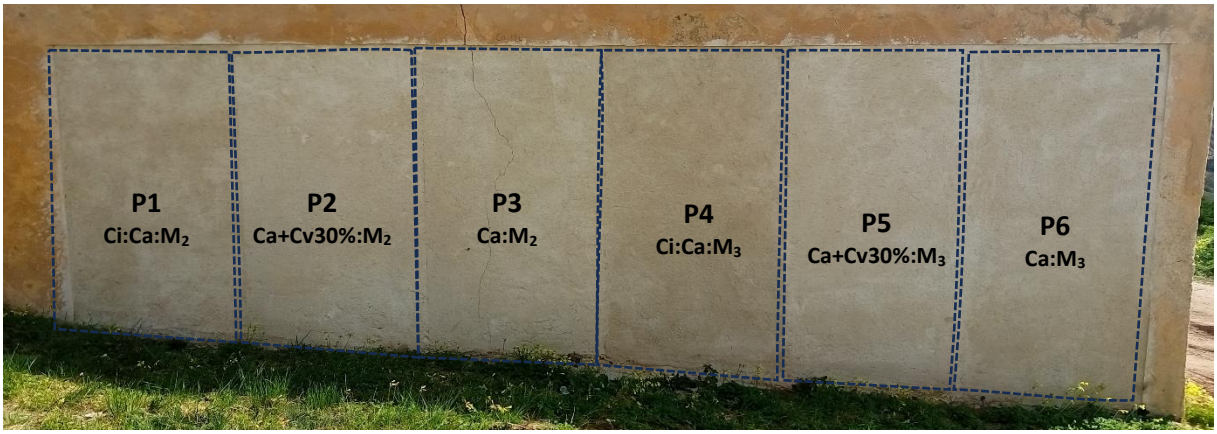


Figura 2 – Aspeto geral e identificação dos painéis após a aplicação das camadas de reboco

Previamente ao reboco foi aplicado um chapisco (24 horas antes), de modo a garantir uma melhor aderência do reboco ao suporte. Para não introduzir mais variáveis na análise do desempenho, a composição do chapisco foi idêntica à do reboco, mas com teores de água mais elevados. O reboco foi depois aplicado em duas camadas, sendo a primeira para uniformizar a superfície para a camada subsequente. A 1ª camada de reboco apresentou uma espessura variável entre 1,0 e 3,0 cm e a 2ª camada de reboco foi de 1,5 ± 0,5 cm. Posteriormente, foi ainda aplicada uma camada de acabamento, não pigmentada em metade do painel e pigmentada na outra metade, com a mesma composição usada para as camadas de reboco, no entanto, a areia siliciosa (areia do Rio Tejo) foi utilizada com uma granulometria inferior a 1 mm, com uma espessura de 0,5 ± 0,2 cm.

Nas aplicações tiveram-se os seguintes cuidados:

- antes da aplicação de cada camada procedeu-se à limpeza da superfície e humedecimento da camada anterior;
- as argamassas foram aplicadas com o mínimo de água de amassadura necessária para uma trabalhabilidade adequada, para evitar uma porosidade e retração excessivas (Quadro 1);

- cada camada de argamassa foi aplicada com colher de pedreiro, apertada com talocha ou com colher de pedreiro e de seguida sarrafada com régua metálica;
- em todos os painéis, foi respeitado um tempo de secagem de cerca de uma semana entre a 1ª e a 2ª camada de reboco. O chapisco foi aplicado 24 horas antes da aplicação da 1ª camada de reboco. A camada de acabamento só foi aplicada vários meses depois (aproximadamente 260 dias após o início das aplicações), porque se pretendeu avaliar previamente o comportamento das primeiras camadas.

Durante as aplicações não foram registadas quaisquer anomalias nas argamassas, tendo estas apresentado um bom aspeto final, após a aplicação. De salientar, a presença de uma fenda em profundidade do suporte na zona onde foi efetuado o painel P3 (Ca:M_2).

2.3 METODOLOGIA ADOTADA

Para o cumprimento do objetivo estabelecido, numa primeira fase, foram definidas e preparadas diversas formulações de argamassa, numa campanha experimental realizada em laboratório (Santos *et al.*, 2023a e b; Veiga e Santos, 2023); os resultados dos ensaios físico-mecânicos obtidos nesta fase permitiram, numa fase posterior, a seleção de quatro formulações para aplicação em painéis experimentais à escala real em muros do Forte e a comparação desses resultados com os obtidos *in situ*. Adicionalmente foram aplicadas mais duas composições de argamassa, com apenas cal aérea apagada como ligante, que foram consideradas como referência para análise dos resultados obtidos.

2.3.1 Análise *In Situ*

A monitorização do desempenho das argamassas aplicadas nos painéis experimentais foi realizada entre setembro de 2022 (28 dias após a aplicação da 2ª camada de reboco) e agosto de 2023. Durante a campanha de ensaios, para além das observações visuais e registo fotográfico, foram também realizados ensaios não destrutivos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico com ultrassons e avaliação da dureza superficial com durómetro Shore A; após esta data, foram ainda realizados ensaios para avaliar a aderência ao suporte e a permeabilidade à água sob baixa pressão. Os métodos de ensaios utilizados estão seguidamente descritos:

- Ensaio com durómetro (Figura 3a) – O ensaio baseia-se nas normas NP ISO 7619 e ASTM D2240 e permite avaliar a dureza superficial do revestimento. Para a sua execução utilizou-se um durómetro Shore A, que possui na sua extremidade um pino que quando pressionado contra o material, pela ação da mola, sob carga normalizada, indica a resistência à penetração, que se traduz no movimento de um ponteiro ao longo de uma escala de 0 a 100: quanto maior o seu valor maior é a dureza e a coesão superficial.
- Ensaio com ultrassons (Figura 3b) – O ensaio foi executado segundo a norma EN 12504-4, utilizando o método indireto (os transdutores colocados na mesma superfície) com uma distância de 20 mm entre eles. No ensaio foi utilizado o aparelho Steinkamp Ultrasonic tester BP-7, para determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, com o objetivo de avaliar a compacidade e a rigidez do revestimento aplicado.
- Ensaios com tubos de Karsten (Figura 3c) – A técnica de ensaio, descrita na norma EN 16302, permite avaliar a permeabilidade à água sob baixa pressão das argamassas em estudo e consiste em medir a quantidade de água absorvida através de uma determinada área de reboco, após um período definido, empregando os tubos de Karsten.

- Ensaio de arrancamento *pull-off* (Figura 3d) – O ensaio baseia-se na norma EN 1015-12 e permite avaliar a capacidade de aderência da argamassa ao suporte. O ensaio consiste na extração, com máquina *pull-off*, de uma pastilha metálica, que é previamente colada ao revestimento. A máquina de ensaios mede a força necessária para proceder ao arrancamento da pastilha.

(a) (b) (c) (d)

Figura 3 – Realização de ensaio *in situ*: (a) dureza superficial; (b) módulo de elasticidade dinâmico com ultrassons; (c) permeabilidade à água sob baixa pressão; (d) aderência ao suporte

2.3.2 Análise laboratorial

Previamente às aplicações *in situ*, as composições selecionadas (Quadro 1) foram preparadas em laboratório, de acordo com a norma europeia EN 1015-2; contudo, com a utilização de uma elevada percentagem de cal viva nas formulações das argamassas Ca+Cv30%:M_2 e Ca+Cv30%:M_3, foi necessário adequar o método normalizado de mistura, uma vez que, após alguns minutos da amassadura, estas composições perdiam a sua plasticidade e trabalhabilidade, tornando a sua aplicação muito difícil (Santos *et al.*, 2023a e b). Após a moldagem das argamassas em moldes normalizados (40 × 40 × 160 mm), estes foram colocados em sala condicionada a 20 ± 2 °C de temperatura e 65 ± 5% de humidade relativa, durante os primeiros 7 dias, sendo que nos primeiros três 3 dias as argamassas foram sujeitas a uma aspersão diária com água. Após este período, as argamassas foram retiradas dos moldes normalizados e deixados nas mesmas condições higrotérmicas até à data de ensaio.

A água a adicionar em cada mistura de argamassa foi determinada com base em testes práticos de aplicabilidade, como a necessária para garantir uma trabalhabilidade adequada para uma argamassa de revestimento. Após a definição do teor de água de amassadura por este método, foi fixado para cada mistura o teor de água e o espalhamento correspondente, que passaram a ser usados para toda a campanha experimental (Quadro 1).

A caracterização laboratorial efetuada às argamassas no estado endurecido, sobre provetes prismáticos (40x40x160 mm), aos 28, aos 90 e aos 180 dias, consistiu na avaliação das resistências mecânicas, através dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, segundo as especificações da norma europeia EN 1015-11, e na determinação do módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância, descrito na norma NP EN 14146. O grau de compacidade das argamassas foi determinado através do ensaio de porosidade aberta (NP EN 1936). O comportamento hídrico das argamassas foi avaliado através dos ensaios de absorção de água por capilaridade (EN 15801) e de secagem (EN 16322).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE *IN SITU*

3.1.1 Observação visual

Aproximadamente 28 dias após a aplicação da 2ª camada de reboco (setembro de 2022), a observação dos rebocos aplicados mostrou, em todos os casos, um bom aspeto geral, sem fissuras, empolamentos ou outros defeitos visíveis. Apenas foi verificada na zona superior do Painel 2 (Ca+CV30%:M_2) o surgimento de alguma fissuração por retração cuja maior abertura registada foi de 0,85 mm (Figura 4).

Ao fim de 145 dias (janeiro de 2023), após um período de chuva intensa, todos os painéis continuavam com um bom aspeto geral. No entanto, registou-se a presença de microrganismos, nomeadamente na zona superior do painel Ca:M_3 e o aparecimento de uma fissura no painel P3 (Ca:M_2), com o mesmo desenvolvimento e extensão da fenda já registada no suporte, cuja maior abertura registada foi de 1,30 mm (Figura 5). A fissuração observada anteriormente no Painel 2 (Ca+CV30%:M_2), manteve-se inalterada. Nos restantes dias de monitorização (março, abril, maio, junho e agosto de 2023) não foram registadas quaisquer anomalias, falta de coesão ou desenvolvimento da fissuração já observada nas camadas de reboco.

Em maio de 2023 foi aplicada a camada de acabamento em cada um dos painéis (pigmentada e não pigmentada), tendo-se verificado, após a aplicação, que o aspeto final de todos os painéis era bom, sem fissuração nem pulverulência, embora com manchas visíveis na camada de acabamento pigmentada na altura da realização dos primeiros ensaios (aproximadamente 7 semanas após a sua aplicação); contudo, verificou-se que as manchas não comprometem o desempenho das argamassas e mantiveram-se inalteradas até agosto (Figura 6).

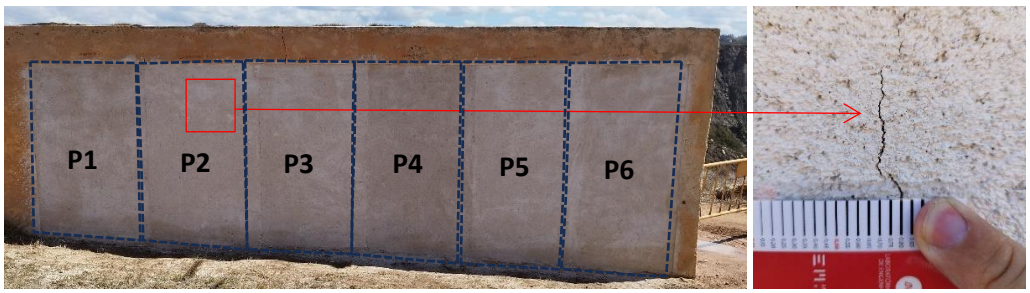


Figura 4 – Fissuração observável na 2ª camada de reboco da argamassa Ca+CV30%:M_2

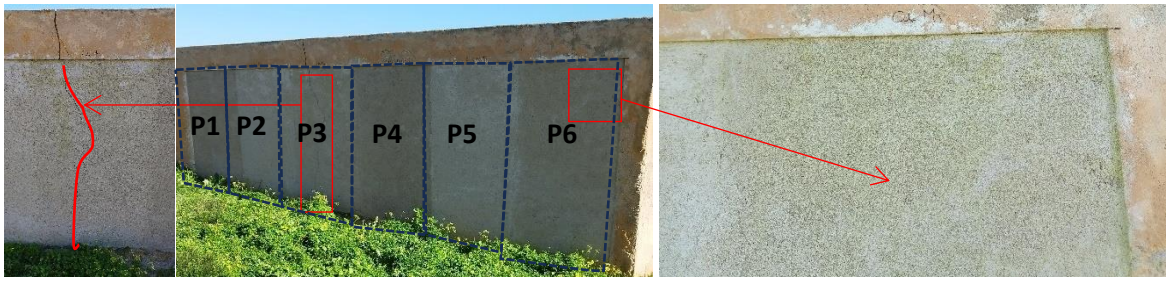


Figura 5 – Presença de microrganismo, visíveis na superfície dos rebocos, nomeadamente nas argamassas Ca:M_2 e Ca:M_3 e o surgimento da fissura no reboco Ca:M_2

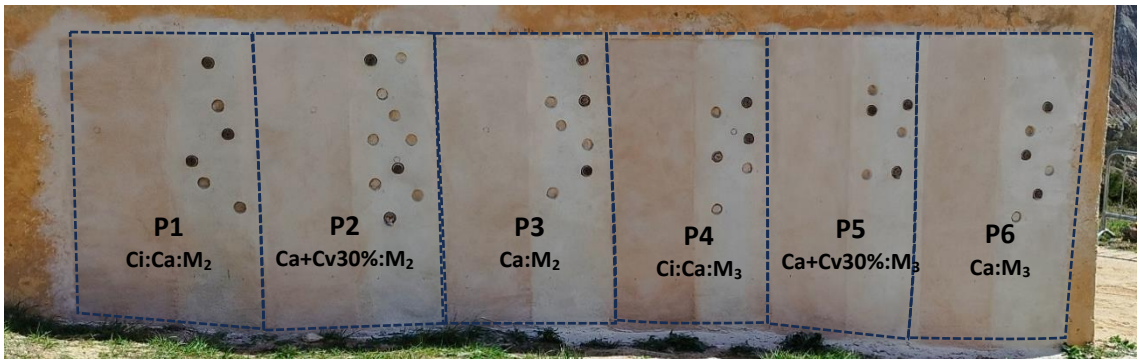


Figura 6 – Aspeto final dos painéis em agosto de 2023

3.1.2 Desempenho físico-mecânico

Os resultados dos ensaios realizados sintetizam-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Síntese dos resultados obtidos nos painéis

Painel	Sobre o reboco (2 camadas)										Sobre o acabamento não pigmentado				
	Setembro 2022		Janeiro 2023		Março 2023		Abril 2023		Maio 2023		Junho 2023		Agosto 2023		
	ME_US	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	σ (Tip. Rotura)
P3 Ca:M2	3005	84	3691	82	4052	80	3589	84	588	83	1400	82	1600	86	0,01 (B)
P6 Ca:M3	3870	78	4321	82	4660	80	4511	82	2856	87	2352	84	1713	81	0,03 (B)
P2 Ca+Cv30%:M2	3240	79	4242	84	3913	83	3038	87	1968	87	2481	86	3173	83	< 0,01 (B)
P5 Ca+Cv30%:M3	2179	80	4333	79	4000	86	5266	87	3540	86	3177	86	2394	86	0,01 (B)
P1 Ci:Ca:M2	5337	73	7735	80	7865	81	8059	87	3605	92	3616	83	4166	84	0,12 (B)
P4 Ci:Ca:M3	4670	82	6524	82	7454	87	5255	88	3830	85	4119	88	4169	82	0,09 (B)

ME_US – Módulo de Elasticidade por Ultrassons (MPa); **D*** – Durómetro (Shore A); **σ** - **Tip. rotura** - Tensão de Aderência (N/mm^2) e tipologia predominante de rotura**

*Escala Durómetro (Shore A): <30 – muito fraca (perda de coesão em profundidade); 30 - 50 – fraca (perda de coesão intermédia); 50 – 70 – moderada (perda de coesão superficial); 70 - 87 – normal (bom estado de conservação); > 88 – muito dura (bom estado de conservação)

**Tipologia de rotura (predominante): Padrão A – Rotura Adesiva (no plano do revestimento – suporte); Padrão B – Rotura Coesiva (no seio do revestimento); Padrão C – Rotura Coesiva (no seio do suporte).

Os resultados apresentados no Quadro 3 mostram que os valores de dureza superficial com durómetro Shore A apresentam, em geral, a mesma ordem de grandeza para todas as composições, com um ligeiro aumento com aplicação do acabamento, quando comparada com as argamassas de reboco com a mesma idade (setembro 2022 *vs* junho 2023). Os valores são ligeiramente superiores para as argamassas com cimento na sua composição, e em geral aumentam com a utilização de 5% da areia calcária (M_3) em relação às argamassas com 10% (M_2), talvez devido a microfissuração provocada pela maior percentagem de finos da areia calcária.

O ensaio com ultrassons mostra, em geral, um aumento da rigidez e compacidade das argamassas com cimento (Ci:Ca) em relação às outras composições. No entanto, a elevada rigidez destas argamassas, com módulos de elasticidade superiores às argamassas originais (2960-5940 MPa) pode transmitir às alvenarias mais deformáveis tensões elevadas e assim degradá-las de forma mais rápida. Por outro

lado, as argamassas com cal viva na sua composição, aplicadas nos painéis, apresentam um desempenho mecânico bastante satisfatório com módulos de elasticidade moderados, nomeadamente a formulação com utilização de 5% da areia calcaria (M_3), não existindo perdas de resistência significativas ao longo do tempo de cura. Os valores de módulos de elasticidade por ultrassons são da mesma ordem de grandeza das argamassas originais exteriores (5940 MPa).

Todas as composições de argamassa, nomeadamente as que contêm cal aérea como único ligante (Ca e Ca+Cv30%), apresentam valores de aderência ao suporte reduzidos sendo o padrão de rotura predominantemente coesivo entre a primeira camada de reboco e o suporte. Os baixos valores obtidos podem ser justificados pelo baixa profundidade de carbonatação do revestimento, nomeadamente da 1ª camada de reboco, mesmo após 1 ano de aplicação (Figura 7), pelo que é previsível que as características mecânicas destes aumentem consideravelmente a longo prazo. No entanto, os valores determinados são da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados na literatura para argamassas de renovação de cal aplicadas em alvenarias de pedra (Veiga *et al*., 2009; Santos *et al*., 2018 e 2020).

No que se refere ao comportamento à água (Figura 8), o ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão, com tubos de Karsten, mostrou que, em geral, a utilização de 10% da areia calcária (M_2) reduz a absorção em relação às argamassas com 5% (M_3), com exceção da argamassa de referência (Ca) onde a argamassa com 10% de areia calcária (Ca:M_2) se apresenta muito mais permeável que Ca:M_3 , provavelmente devido à fissuração existente. A baixa permeabilidade da argamassa Ca:M_3 pode justificar a presença de microrganismos observados neste painel (Figura 5). As argamassas com cal viva na sua composição são as mais absorventes.

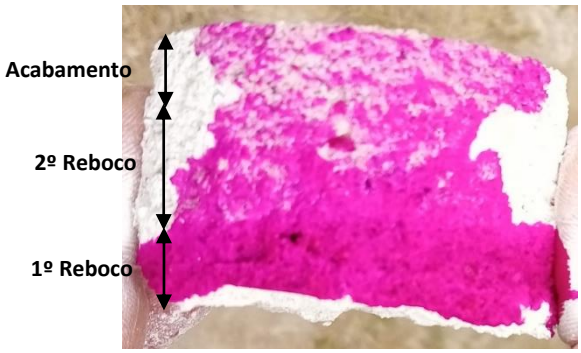


Figura 7 – Verificação da profundidade de carbonatação do revestimento, após a execução de uma carote para o ensaio de *pull-off*, com um indicador químico colorimétrico – solução de fenolftaleína
(Após aspersão da superfície de fratura, é incolor para uma situação de carbonatação, e apresenta uma coloração rosada em situações de não carbonatação)

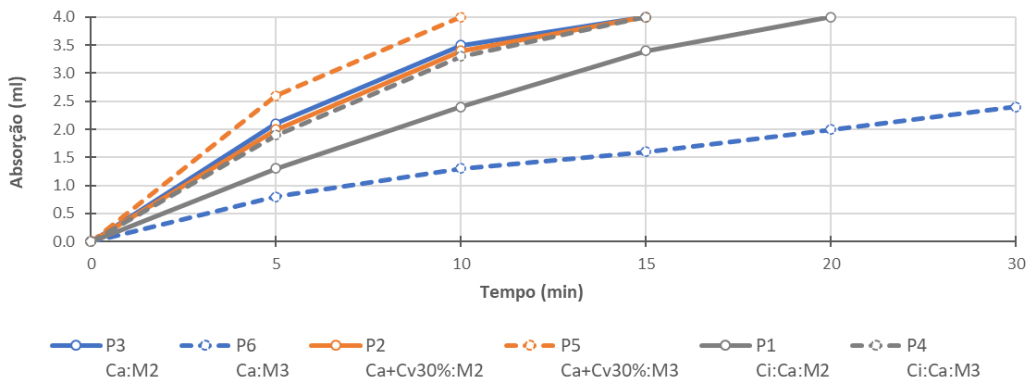


Figura 8 – Resultado médio do ensaio com os tubos de Karsten nos painéis *in situ* (não pigmentado)

3.2 ANÁLISE LABORATORIAL

No Quadro 4 são apresentados os resultados médios obtidos nos ensaios de laboratório sobre os provetes prismáticos das 4 argamassas de revestimento selecionadas e aplicadas *in situ*. As duas composições de argamassa, com apenas cal aérea apagada como ligante, foram apenas consideradas como referência para análise dos resultados obtidos nas aplicações *in situ*, não tendo sido estas analisadas laboratorialmente.

Quadro 4 – Propriedades físicas obtidas nas argamassas preparadas em laboratório.

Ensaio	Idade	Ca+Cv30%:M_2	Ca+Cv30%:M_3	Ci:Ca:M_2	Ci:Ca:M_3
MV (kg/m³)	28 d	1696	1697	1755	1756
	90 d	1735	1739	1773	1774
	180 d	1739	1745	1776	1771
Po (%)	28 d	28	28	28	28
	90 d	27	27	28	28
	180 d	28	27	28	28
RT (N/mm²)	28 d	0,43	0,46	0,32	0,27
	90 d	0,56	0,58	0,31	0,34
	180 d	0,68	0,67	0,35	0,33
RC (N/mm²)	28 d	0,58	0,47	0,60	0,53
	90 d	0,93	0,86	0,75	0,70
	180 d	1,27	1,41	0,71	0,73
ME_FR (MPa)	28 d	2259	2266	1988	2066
	90 d	3150	3147	2393	2480
	180 d	3547	3539	2420	2566
Durómetro* (Shore A)	28 d	87	91	86	89
	90 d	91	92	88	89
	180 d	91	90	90	91
CC (kg/m²·min$^{1/2}$)	28 d	2,0	1,9	2,9	2,9
	90 d	1,9	2,0	3,0	2,8
	180 d	1,9	1,9	3,0	2,8

MV – Massa volúmica aparente; **P_0** – Porosidade aberta; **RT** – Resistência à tração por flexão; **RC** – Resistência à compressão; **ME_FR** – Módulo de Elasticidade por frequência de ressonância; **CC** - Coeficiente de capilaridade

*Escala Durómetro (Shore A): <30 – muito fraca (perda de coesão em profundidade); 30 - 50 – fraca (perda de coesão intermédia); 50 – 70 – moderada (perda de coesão superficial); 70 - 87 – normal (bom estado de conservação); > 88 – muito dura (bom estado de conservação)

Em geral, todas os provetes de argamassa apresentam um ligeiro aumento da compacidade e da resistência mecânica com o tempo de carbonatação, embora nem sempre essa variação se reflita em redução da porosidade aberta. Os resultados mecânicos (Quadro 4) indicam que todas as composições de argamassa apresentam resistências mecânicas relativamente baixas e valores moderados de módulo de elasticidade.

A adição de cimento branco à cal aérea hidratada (composições Ci:Ca) leva a um ligeiro aumento da massa volúmica das argamassas aplicadas em provetes prismáticos, no entanto com alterações pouco significativas nos valores de porosidade aberta das argamassas. Por outro lado, as argamassas com 30% de cal viva apresentam valores mais elevados de resistência mecânica que as argamassas Ci:Ca, nomeadamente a longo prazo (180 dias). Adicionalmente, dos 90 para os 180 dias, os provetes prismáticos apresentam uma evolução muito significativa em relação às composições Ci:Ca. Este bom comportamento das argamassas Ca+Cv30% vai de encontro ao defendido por alguma literatura (Loriot, 1774; Sickels-Taves e Allsopp, 2005), que afirma que a utilização de cal viva tende a aumentar a resistência mecânica das argamassas de cal aérea.

Os resultados obtidos com o Shore A, apresentam a mesma tendência, com um ligeiro acréscimo da dureza superficial nas argamassas com adição de cal viva na sua composição. No que se refere ao comportamento à água por capilaridade as argamassas em estudo apresentam valores elevados de coeficiente de capilaridade, como é típico das argamassas de cal. Contrariamente às aplicações *in situ*, as argamassas com cimento na sua composição apresentam velocidades de absorção de água superiores às argamassas com de cal viva.

A variação do teor de areia calcaria de 10% (M_2) para 5% (M_3) na composição da argamassa tende a aumentar a sua compacidade e, consequentemente, as suas resistências mecânicas, assim com reduzir a absorção de água das argamassas. A maior percentagem de finos da areia calcária M_2, no entanto, pode potenciar a microfissuração, o que conduz a uma diminuição do seu desempenho.

4 SELECÇÃO DA ARGAMASSA DE REPARAÇÃO

Face aos resultados obtidos em laboratório e posteriormente com as aplicações à escala real em painéis experimentais, considera-se que a solução de revestimento de cal aérea + 30% de cal viva e 5% de areia calcária (Ca+Cv30%:M_3), apresentou o melhor desempenho global, com resistências e deformabilidades adequadas e comportamento à água equilibrado, para este caso de estudo. Esta é também a solução mais compatível em termos composicionais com as argamassas originais. A principal desvantagem detetada desta composição foi a fraca aderência ao suporte o que pode torná-las mais vulneráveis à degradação. No entanto, verificou-se o baixo teor de carbonatação das camadas mais internas, o que pode ter contribuído para os valores mais reduzidos. Contudo, é expetável que os valores tendam a incrementar devido à progressão da carbonatação.

Assim, considera-se recomendar a solução Ca+Cv30%:M_3, ao traço volumétrico de (cal aérea apagada:cal viva micronizada) : (areia siliciosa:areia calcária) (1:0,3):(2,5:0,1), como sendo a solução mais adequada para conservação das paredes exteriores do Forte. No entanto, dado que esta composição revelou aderência reduzida ao suporte, recomenda-se que a aplicação seja realizada em camadas de pequena espessura (não superior a 20 mm) e o tempo de aplicação entre a primeira camada do reboco e o chapisco seja superior a 1 semana, de modo a favorecer a carbonatação da camada mais interna.

5 CONCLUSÕES

Com o intuito de selecionar as soluções de argamassas de conservação a aplicar na reabilitação do Forte de Paimogo, foi desenvolvida uma metodologia de análise que envolveu numerosos ensaios de caracterização física e mecânica de diversas composições de argamassas de revestimento, utilizando métodos e provetes normalizados, assim como a avaliação das características e da durabilidade de 6 aplicações em painéis experimentais de argamassas sujeitas a condições de exposição no ambiente do Forte.

Todas as soluções selecionadas para este estudo se regeram pelo princípio da compatibilidade com os materiais originais do Forte do ponto vista composicional (químico e mineralógico), físico e mecânico e procuraram respeitar a autenticidade material do edifício, aproximando-se o mais possível das soluções originais. Com base nas análises laboratoriais e *in situ* realizadas, conclui-se que a solução de revestimento exterior de: cal aérea hidratada + 30% de cal viva com areia siliciosa e 5% de areia calcária (Ca+Cv30%:M_3) apresenta o melhor desempenho global, com resistências e deformabilidades adequadas e comportamento à água equilibrado, para este caso de estudo, sendo estas também as soluções mais aproximadas em termos composicionais às argamassas originais. No entanto, o processo

de aplicação deverá ser otimizado, com tempos de aplicação entre camadas superior ao que foi definido inicialmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Lhoist Portugal, Secil Argamassa, Lena Agregados e Lotevias pelo fornecimento dos materiais. Assim como à Câmara Municipal da Lourinhã que acompanhou as aplicações experimentais *in situ*. Este trabalho é uma contribuição para o projeto de Investigação e Inovação LNEC 2021-2027 "MICR - Métodos Integrados de Conservação e Reabilitação do Património Edificado" (0803/1102/24170).

REFERENCIAS

Loriot, A.J. (1774) Mémoire sur une découverte dans l'art de bâtir. De L'imprimerie de Michel Lambert, rue de la Harpe, près Saine Côme, Paris. Acessível online: https://archive.org/details/mmoiresurunedcou00lori/mode/2up, consultado em janeiro de 2023.

Santos, A.R., Veiga, M.R., Matias, L., Santos Silva, A., de Brito, J. (2018) Durability and compatibility of lime-based mortars: the effect of aggregates Infrastructure, 3 (3): 34. https://doi.org/10.3390/infrastructures3030034.

Santos, A.R., Veiga, M.R., Sabala, B. (2023a) Desenvolvimento de argamassas de substituição para o Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo: Seleção da solução de revestimento. Relatório 280/2023 – DED/NRI.

Santos, A.R., Veiga, M.R., Santos Silva, A. (2023b) Characterization and assessment of performance of innovative lime mortars for conservation of building heritage: Paimogo's fort, a case study. Applied Sciences, 13, 4679. https://doi.org/10.3390/app13084679.

Santos, A.R., Veiga, M.R., Santos Silva, A., de Brito, J. (2020) Tensile bond strength of lime-based mortars: The role of the microstructure on their performance assessed by a new non-standard test method, Journal of Building Engineering, 29, 2020, 101136. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101136.

Sickels-Taves, L.B., Allsopp, P.D. (2005) Lime and its place in the 21st century: Combining tradition, innovation, and science in building preservation. In International Building Lime Symposium 2005, Orlando, Florida, 9 -11 de março.

SIPA (2023) Forte no Lugar de Paimogo/Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo. Acessível online: http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6327, janeiro 2023.

Veiga, M.R., Santos Silva, A., Marques, A.I., Sabala, B. (2022) Caracterização das argamassas existentes no Forte de Nossa Senhora dos Anjos do Paimogo. Relatório 67/2022 – DED/NRI.

Veiga, M.R., Santos, A.R. (2023) The challenge on development of repair mortars for historical buildings in severe marine environment: Paimogo Fort, a case study. In: Bokan Bosiljkov, V., Padovnik, A., Turk, T. (eds). Conservation and Restoration of Historic Mortars and Masonry Structures. HMC 2022. RILEM Bookseries, vol 42: 507-522. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_41.

Veiga, M.R., Velosa, A., Magalhães, A.C (2009) Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: characterization and performance evaluation. Construction and Building Materials, 23:318-327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003.

Índice de autores

Autores	Artigos
Aelenei, Daniel	1249 1250 1291 1294
Aguiar, Amanda L. D.	1435
Aguiar, Amanda O.	1174
Aguiar, José B.	1126 1369 1542
Aguilar, Maria T. P.	1197 1198 1402
Aguirre, Cristina V.	1450
Albino, Carlos	1146
Aleixo, João A. F.	1499 1513
Alexandre, Jonas	1125 1173 1174 1175
Almada, Bruna S.	1197
Almada, Thais C.	1440
Almeida, Edna S.	1227
Almeida, Emily	1130
Almeida, João	1317 1323
Almeida, Manuela	1502 1504
Almeida, Rian C.	1217
Almeida, Ricardo M. S.	1133 1141 1168 1276 1320
Alnezami, Salem	1224
Alpalhão, João	1102
Alves, Ana D.	1520
Alves, Claudiele A.	1480
Alves, Leonardo F.	1212
Amado, Franco D. R.	1444
Amario, Mayara	1431 1435
Andrade, Clarissa S.	1503
Angeiras, Carlos	1523
Anjos, Marcos A. S.	1209 1223 1230 1260 1388 1476
Anjos, Paulo N. M.	1319
Antonio, Julieta	1323
Antunes, Luís	1514

Autores	Artigos
Antunes, Paulo	1322
Antunes, Vítor	1161 1375
Araújo, Adolpho G.	1532 1535
Araujo, Arthur F.	1334
Araújo, Gonçalo R.	1414 1458
Ariotti, Layse	1216
Armando, João	1357
Arruda, Mário	1405
Artoni, Frederico	1179
Ascensão, Guilherme	1193 1196 1312 1316
Azenha, Miguel	1500
Azevedo, Afonso R. G.	1125 1129 1157 1174 1175 1286
Azevedo, Aires F. F.	1110
Azevedo, Álvaro V.	1310
Baêta, Bruno E. L.	1448
Bakatovich, Aliaksandr	1364
Balboa, Andrea	1497
Baltazar, Luis G.	1251 1252
Barbosa, Gabriela	1504
Barbosa, Marcella	1230
Barbosa, Normando P.	1399
Barra, Júlia G. D.	1167
Barraza, Madeleing T.	1157 1286 1527
Barreira, Eva S. B.	1141 1168 1169
Barreto, Douglas	1179 1289
Barreto, Sandra M.	1160
Barros, Amanda D.	1169
Barros, Ilana M. S.	1209 1256
Bartels, Giovanna S.	1374
Bastos, David	1362
Batista, Carlos	1308
Batista, Fernanda P.	1156

Autores	Artigos
Batista, Isabela	1125
Bauer, Elton	1108 1113
Beirante, Mariana	1109
Belgas, Maria L.	1429 1430
Bellei, Poliana	1201 1374 1418 1451 1488
Bene, Bruno M.	1428
Benjamin, Edinéia A.	1402
Bentes, Isabel	1344
Bento, Luciano R. R.	1480
Bento, Rita	1330
Berenguer, Romildo A.	1411
Bernardo, Luís F. A.	1413
Bersch, Jéssica D.	1216 1419
Bertini, Alexandre A.	1119 1149
Bertoli, Gabriela M.	1529
Bertuol, Daniel A.	1219
Beschorner, Lucas V.	1517
Betancur, Daniela G.	1450
Bezerra, Augusto C. S.	1300 1402 1443 1466
Bezerra, Diego P.	1233 1234 1469
Bezerra, Francisco F. P.	1315
Bezerra, Ulisses T.	1209
Bicelli, Antonio R.	1405
Bogas, José	1159 1185 1186 1189 1497 1540
Bona, Sara	1229
Bonito, Maria B. N.	1366
Borges, Paulo H. R.	1300
Bourgeois, Inês	1322
Bragança, Luís	1441
Branco, Adriana P.	1492
Branco, Fernando	1405
Branco, Fernando G.	1311 1313 1429 1430

Autores	Artigos
Branco, Luiz A. M.	1480
Branco, Verônica C.	1244
Brandão, Rafael S.	1421
Brandão, Verônica	1415 1417
Bravo, Miguel	1107 1347 1348 1349 1498 1350
Brigas, Fábio	1114
Briga-Sá, Ana	1432 1449
Brito, Jorge	1107 1190 1224 1239 1246 1269 1317 1338 1347 1348
	1349 1350 1362 1368 1482 1483 1485 1511 1512
Bueno, Rafael P. C.	1424
Burgos, Lucas R.	1119 1149
Bustamante, Marión	1150
Cabaço, António	1310
Cabral, Antonio E. B.	1519
Cabral, Antônio E. B.	1149 1465 1386 1387
Cabral-Fonseca, Susana	1325 1408
Cabrita, Diogo	1325
Caldas, Lucas R.	1279 1304 1334
Calle, Ivan F. O.	1307
Calvetti, Diego	1436
Camões, Aires	1127 1128 1230 1523
Campos, Cristiane C.	1215
Campos, Liszandra F. A.	1388
Campos, Marcus	1415
Cândido, Stella O.	1383
Canha, Carlos	1171
Cano, Diana G.	1450
Canto, João	1161 1375
Cantor, Pedro	1405
Capuzzo, Valdirene	1357
Caraballo, Manuel	1312 1316
Cardoso, Henrique L.	1336

Autores	Artigos
Carneiro, Arnaldo M. P.	1532 1535
Carneiro, Gessivaldo O.	1288
Carneiro, Joaquim A. S.	1244
Carneiro, Juliane	1125
Caro, Ágata G.	1511 1512
Carvalhido, Flávia	1336
Carvalho, Beatriz T.	1296
Carvalho, Isabelle V.	1235
Carvalho, José M. F.	1426 1443
Carvalho, Tomás A.	1460
Carvalho, Victor R.	1448
Castillo, Mayela	1533
Castro, Mylena A.	1433
Castro, Wilamy V.	1124 1363
Castro-Gomes, João P.	1219
Cerqueira, Gustavo C.	1124
Cerqueira, Niander A.	1173 1174 1175
Cesar, Cristina G.	1536
Chahud, Eduardo	1402
Chale, Anastacia G.	1339
Chale, Anastácia G. S.	1438
Chaves, Jéssica F. N.	1315
Chaves, Luís	1308
Chinelatto, Adriana S. A.	1372
Chiroli, Daiane M. G.	1384
Chotoli, Fabiano	1221
Cilla, Marcelo	1221
Clovandi, Giovana M.	1235
Coelho, António L.	1242
Coelho, Guilherme B. A.	1400 1401
Comoretto, Letícia	1531
Conceição, Ana L. S.	1227

Autores	Artigos
Conceição, Diogo	1327
Constantino, João	1325
Constantino, Joaquim	1253
Coopman, Emma	1324
Cordeiro, Elisabete	1242
Cordeiro, Guilherme C.	1238
Corrêa, Marco	1127
Correia, João R.	1324 1325 1342 1408 1546
Cosentino, Livia	1210 1257
Costa, Alanielly S.	1260
Costa, Aníbal G.	1520
Costa, António A.	1404 1462
Costa, Bruna E. B.	1444
Costa, Dória	1543
Costa, Eduarda M.	1418
Costa, Elnatan L.	1442
Costa, Heloina N.	1519
Costa, Mateus G. M.	1401
Costa, Vítor	1332
Costa, Vivianne M.	1247
Coura-Sobrinho, Jerônimo	1421
Couto, Carlos	1264
Couto, João P. P.	1499 1513
Couto, Paula	1187 1188
Coz-Diaz, José	1509
Cravo, Ruy M.	1438
Cruz, Bruna R.	1473
Cruz, Carlos O.	1377
Cruz, Helena	1506 1507
Cruz, Miguel C. V.	1400
Cruz, Paulo	1230
Cruz, Ricardo	1159 1185 1186 1189

Autores	Artigos
Cruz, Rosenira S.	1444
Cunha, Gustavo L. S.	1260
Cunha, Joana P.	1142
Cunha, Lorena R.	1227
Cunha, Maria	1325
Cunha, Sandra	1126 1542
Custódio, João	1514 1543
Dafico, Letícia C. M.	1168
Delgado, João	1222
Demaj, Armando	1544
Demoliner, Carlos A.	1467
Dessuy, Thainá Y.	1216
Dias, Adriana	1485
Dias, Ana P. S.	1415 1451 1488
Dias, Cleber M. R. hyperref[paper:1221]1221 1288	1213
Dias, Ilídio S.	1165
Dias, Leonardo S.	1209 1223 1260 1476
Dias, Sara	1317
Dina, Pinto	1280
Diniz, Dayse H.	1426
Diogo, José F. R.	1428 1438 1464
Dionísio, Amélia	1419
Diosdado, Antonio J.	1316
Dreossi, Carla R. F.	1228
Duarte, António	1542
Duarte, António P. C.	1190 1405
Duarte, Rogério	1102
Duarte, Sónia	1506 1507
Dutra, Ricardo P. S.	1388
Eires, Rute E.	1523 1531
Erkizia, Edurne	1147

Autores	Artigos
Estrócio, Ana	1326
Evangelista, Luís	1107
Falcão, Ana P.	1330 1376
Falcão, Isabela S.	1472 1474
Fanha, Paulo	1455
Faria, Andreia C.	1197
Faria, Paulina	1114 1362 1508
Farias, Lidianne N.	1176
Farias, Marcelo M.	1385
Farinha, Catarina B.	1362
Félix, Adriano S.	1399
Felix, Emerson F.	1472
Félix, Emerson F.	1474
Fernandes, Jorge	1210 1257
Fernandes, Maria M. L.	1287
Fernández-Muñiz, Zulima	1509
Ferrão, Paulo	1414 1458
Ferreira, Ana	1492
Ferreira, Ana T.	1526
Ferreira, Duarte	1127
Ferreira, Felipe	1129
Ferreira, Gisleiva C. S.	1281 1433
Ferreira, Isabel	1294
Ferreira, João G.	1544 1545
Ferreira, Maria T.	1404
Ferreira, Matheus H. D.	1197
Ferreira, Patrícia	1366
Ferreira, Petra	1373
Ferreira, Tayná C. S.	1256
Ferreira, Thássia I. B.	1442
Ferreira, Tiago M.	1455
Ferreira, Victor M.	1146 1276 1312 1316 1320 1322

Autores	Artigos
Ferreira, Victor V. O.	1212
Fialho, Beatriz C.	1383
Fideles, Bruna T. M.	1387
Figueiredo, Aline S.	1424 1426 1443
Figueiredo, António	1133 1196 1276 1320 1332
Figueiredo, Elói	1375
Figueiredo, Helene	1128
Figueiredo, Pamella F.	1480
Filho, Idalmo P. R.	1124
Filho, Leonel M. S.	1223
Filho, Mauro J. S.	1119
Filho, Romildo D. T.	1176 1334 1431 1435
Firmo, João P.	1324
Flores-Colen, Inês	1165 1201 1289 1368 1374 1418 1419 1451 1488 1498
Fonseca, Bruno S.	1105 1167 1205
Fonseca, Susana C.	1514
Fontoura, Júlia F.	1490
Fontul, Simona	1507
Forero, Javier	1107
Fraga, Yuri S. B.	1237
Francisco, André	1249
Freire, Teresa	1114 1445
Freitas, Elisabete F.	1244
Freitas, Maria S.	1412
Frías, Moisés	1147
Frison, Caroline B.	1436
Gago, António S.	1544
Galera, Antonio L.	1436 1439
Galvão, Ana	1453
Garcia, Dayana C. S.	1402
Garcia, Rita	1522
García, Rosario	1147

Autores	Artigos
Garrido, Mário	1325 1342 1408 1546
Gaspar, Florindo	1364 1445 1460
Gaspar, Luís	1445
Gaspar, Pedro L.	1420
Gava, Giovanna	1130
Giordani, Caroline	1262
Gleize, Philippe J. P.	1286
Gloria, M'hamed Y. R.	1431
Godinho, Luís M. C.	1313
Goes, Pablo	1539
Góes, Pablo B.	1530
Gomes, Augusto M.	1171
Gomes, Igor S. P.	1244
Gomes, João C.	1253
Gomes, Júlia E. S.	1386
Gomes, Larissa S.	1386
Gomes, Maria G.	1159 1189 1291 1294 1330 1414 1458 1487 1492
Gomes, Ricardo	1229
Gomes, Ricardo	1414 1458
Gomes, Ricardo I.	1362
Gómez, Esteban C.	1450
Gomide, Fernanda P. B.	1441
Gonçalves, Dayana K. C.	1198
Gonçalves, Margarida	1133
Gonçalves, Marta	1337
Gonçalves, Miguel C.	1242
Gonçalves, Sandra C.	1319
Gonçalves, Teresa D.	1528
Grabois, Thiago M.	1279 1304 1334
Granja, José	1500
Grespan, Ana P. B.	1262
Grigoleto, Flávia M.	1466

Autores	Artigos
Guarín, Santiago U.	1450
Guedes, Kamila G.	1387
Guedes, Manuel C.	1414 1458
Guerra, Cristina	1161
Guerra, Fernanda L.	1262
Guerreiro, João	1545
Guerreiro, Luís	1545
Guido, Adolpho	1538
Guimarães, Ana S.	1156 1222
Guimarães, Camila C. C.	1277
Guimarães, Cleidson C.	1152 1214
Guimarães, Teresa M.	1378
Hasan, Tarikul	1408
Henao, Juan S. A.	1160
Henriques, Pedro G.	1240
Hirashima, Simone Q. S.	1421
Holanda, Francisco G.	1533
Holanda, Maruska L. S.	1111
Holanda, Raphael V. C.	1533
Hosseini, Seyedsajjad	1545
Ibrahim, Mustafa	1269
Jacinto, Cláudia	1210 1257
Januário, João F.	1377
Jaramillo, Yhan P. A.	1450
Jerónimo, Alexandre	1449
Jesus, Carlos	1127
Jesus, Taynah A.	1351
jia, Zhiyou	1126
Jiménez, José R.	1511 1512
João, Castro G.	1280
John, Vanderley M.	1288
Jorge, Marco	1408

Autores	Artigos
Jorge, Patrício	1521
José, Costa	1521
JR., Armando L. M.	1433
Junior, Adilson P.	1210 1257
Junior, Alex N.	1232
Junior, Celso C. M.	1319
Junior, Davi A.	1157
Junior, Elias S. N.	1173
Junior, Eloy F. C.	1441
Junior, Holmer S.	1245
Junior, Milton F. S.	1319
Junior, Othon O. M.	1110
Junior, Raildo A. F.	1518
Júnior, Renato N. C.	1536
Júnior, Sérgio G. S.	1209
Junior, Walfrides M. S.	1124
Kadivar, Marzieh	1245
Kamida, Helio M.	1152
Kaptan, Kubilay	1128
Kassim, Dany	1246 1269
Kern, Andrea P.	1526
Kosteski, Luis E.	1434
Krüger, Patrícia	1372
Kurda, Rawaz	1224
Kuzminykh, Artur	1500
Lamaa, Ghandy	1190 1511 1512
Lamas, Pedro	1112
Langner, Marcelo	1320
Lanzinha, João C.	1526
Lara, Luis F. S.	1300 1466
Latosinski, Karina T.	1531
Leal, Ana I.	1346 1382

Autores	Artigos
Lechuga, Antonio M. M.	1511 1512
Leite, Ana B.	1415
Leite, Monica B.	1518
Lemos, Helena	1542
Letelier, Viviana	1150
Lima, Letícia S. S.	1384
Lima, Mayara C.	1215
Lima, Paulo R. L.	1152 1176 1214
Lima, Rosa C. G.	1307
Linares-Alemparte, Pilar	1521
Lira, Evelly S.	1287
Lisboa, Tais M.	1356
Lobo, Cândido J. S.	1465
Lopes, Lucas V.	1502
Lopes, Maria L. C.	1169
López-Gayarre, Fernando	1509
Lordsleem, Alberto C.	1503
Lourenço, Lúcio	1515
Lubeck, André	1219
Machado, José S.	1506
Machado, Raúl	1105
Machado, Raul M.	1205
Machete, Rita	1330
Machini, Wesley	1323
Maciel, Jorge L. M.	1287
Macucule, Domingos A.	1438
Madalena, Jonathan A. P.	1173
Magalhães, Fernanda C.	1418 1451 1488
Magalhães, Margareth S.	1247
Magalhães, Pedro N. M.	1439
Maia, Joana	1138 1139 1142 1378
Maia, José V. R.	1230 1260 1476

Autores	Artigos
Maia, Lino M. S.	1169 1193
Maior, Paulo M. S.	1535
Malheiro, Raphaele L. M.	1110 1127 1128 1225 1212 1233 1234 1285 1469
Mania, Edrian	1152
Manso, Maria	1161 1375
Mantelatto, André	1500
Manzano, Manuel A. R.	1307
Marangon, Ederli	1434
Marchiori, Fernanda F.	1436 1439
Marco, Fernanda	1286
Margalho, Élida M.	1244
Mariani, Bruna B.	1227
Mariano, Edurado F.	1433
Marínez, Sagrario	1147
Marques, Ana	1460
Marques, Ana I. M.	1507 1544
Marques, Caio M. L.	1212
Marques, Karina M.	1426
Marques, Sheyla K. J.	1153
Martin, Paulo	1530
Martin, Paulo	1539
Martins, Cláudia	1337
Martins, Isabel	1188 1485
Mascarenhas, Jorge	1429 1430
Massola, Daniel	1281
Masuero, Angela B.	1216 1262 1271 1419
Masuero, Joao R.	1271
Mateus, Artur	1460
Mateus, Daniel	1375
Mateus, Rafaela	1392
Mateus, Ricardo	1210 1257
Matias, Luís	1507

Autores	Artigos
Matos, Ana F. F.	1363 1410
Matos, Cristina	1432
Matos, José P.	1396
Matos, Raquel V. P.	1520
Matosinho, Wender M.	1480
Mattoso, Ana P.	1542
Medeiros, Camila M.	1442
Medeiros, Fernanda K.	1209 1223 1260 1476
Medeiros, Marcelo H. F.	1385
Meichtry, Rubens S.	1434
Meira, Gibson R.	1412
Meireles, Inês	1396 1398 1415 1417
Melo, Abcael R. S.	1386 1387
Mendes, Adélio	1222
Mendes, Elias O.	1223
Mendes, Maria P.	1451 1488 1498
Menezes, Mariana M.	1480
Menezes, Renato C.	1153
Milani, Ana P.	1473
Miquithaio, Ângelo	1543
Mira, Ronaldo T.	1450
Miranda, Lisandra C.	1137 1143
Miranda, Vasco	1376
Miranda, Vidália M. C.	1137 1143
Modesto, Alice	1112
Molin, Denise C. C.	1262 1419
Monteiro, Cristina M.	1432
Monteiro, João	1250
Montero-Chacón, Francisco	1509
Montes, Frank F.	1421
Monti, Hector M. P.	1135
Moraes, Ana C. F.	1435

Autores	Artigos
Moraes, Marcio L. V.	1354 1355
Moraes, Maurílio	1530
Morais, Bruna	1522
Morais, Filipa	1514
Morais, Ivan B.	1389
Moreira, Joaquim	1274 1336
Moreira, Nicollas O.	1451 1488
Moreira, Othon	1128
Moreira, Vynicius B. S.	1217
Moreno, Ana	1147
Moreno, Jaime	1147
Morgado, João	1348
Mota, Ian B.	1434
Mota, Rogério	1507
Mothe, Geórgia	1129
Moura, Alan S.	1519
Moura, Camila R.	1281
Moura, Cristopher A. M.	1197
Moura, Marinara A. N.	1433
Moura, Rita	1545
Mourão, André B.	1389
Nabais, Martim	1159 1186
Naranjo, Oscar	1312
Nascimento, Emanuel P.	1476
Nascimento, Luan M. A.	1444
Nascimento, Matheus L. M.	1410
Natalli, Juliana	1129
Nepomuceno, Eduarda	1515
Nepomuceno, Miguel	1344
Neto, Daniel S. C.	1518
Neto, Gilberto A. S.	1152 1214
Neto, Jaime C. R.	1434

Autores	Artigos
Neto, José A. G.	1399 1411
Neto, Jose A. S.	1388
Neto, Paulo P. C.	1475
Neves, Diana	1168
Neves, Jose	1359
Nóbrega, Aline F.	1212 1217 1225 1233 1234 1256 1285 1469
Nogueira, Ricardo E. F.	1465
Nogueira, Rita	1269 1540
Nunes, Francisco	1251
Nunes, Ítalo B. S.	1256
Nunes, Joaquim T.	1142 1378
Nunes, Júlia R. C.	1421
Nunes, Lina	1507
Obando, Gustavo J.	1160
Ocaranza, Laura	1379
Oleaga, Asier	1147
Oliveira, Adelmar	1347
Oliveira, Ana C. R.	1279 1304
Oliveira, Ana M.	1526
Oliveira, António D.	1127
Oliveira, Daniel R.	1301
Oliveira, Dayana R. B.	1467
Oliveira, Joel R. M.	1244
Oliveira, Kelly C.	1517
Oliveira, Marilia	1225
Oliveira, Miguel J.	1311 1337
Oliveira, Mónica	1196
Oliveira, Paulo J. V.	1313
Oliveira, Rafael P.	1173
Oliveira, Rui A. F.	1536
Pachamama, Raphael N.	1508
Pacheco, Ana	1359

Autores	Artigos
Pacheco, João N.	1482 1483 1485
Pacheco-Menor, Maria C.	1368
Padinha, Viviana M.	1346
Paiva, Anabela	1340
Paiva, Schneider A.	1399 1411
Palha, Rachel P.	1532
Palmero-Marrero, Ana I.	1156
Paredes, María V.	1147
Parente, Manuel	1500
Parreira, José	1349
Passuello, Ana	1529
Paula, Andreia	1237
Paula, Andréia	1236
Paula, Ed C. R.	1215
Paula, Heber M.	1215 1277
Paula, Júnia N.	1389
Paula, Larissa	1219
Paulo, Adão	1359
Pederneiras, Cinthia M.	1338 1362
Pedro, João B.	1242
Pedrosa, Ana R.	1445
Pedroso, Marco F.	1139 1477
Pedroso, Pedro F.	1462
Peixoto, Ricardo A. F.	1424 1426 1443 1448
Pena, Liciane A.	1424
Pereira, Alcides	1521
Pereira, Cláudio H. A.	1111
Pereira, Eduardo	1351 1372 1385
Pereira, Fábio	1344
Pereira, Iully	1129
Pereira, José M. C.	1392
Pereira, Júlia	1492

Autores	Artigos
Pereira, Luís	1322
Pereira, Luís F. M.	1313
Pereira, Manoel M. B.	1411
Pereira, Manuel F. C.	1368 1419 1451 1488 1498
Pereira, Mara	1357
Pereira, Sabrina L. D.	1232
Pereira, Sandra	1340 1344
Pereira, Sílvia	1514
Pereira, Simão	1514
Pereira, Yoleimy A.	1239
Pérez, Carlos L.	1509
Pérez-Hernández, Yosbel	1497
Pernes, Joana M. S.	1376
Pessis, Anne M.	1530 1535
Pessoa, Afonso	1350
Piloto, Paulo	1264
Pimentel, João M. C.	1137 1143
Pinchard, Leo	1488
Pinheiro, Divino G. L.	1182 1183
Pinho, Fernando	1112
Pinto, Alexandre	1106
Pinto, Ana P. F.	1105 1167 1205
Pinto, Armando	1392
Pinto, Deesy G.	1373 1413
Pinto, João	1252
Pinto, Jorge	1340 1344
Pinto, Mariana	1514
Pinto, Mônica C.	1334
Pires, Laís A. S.	1410
Pires, Sofia M.	1105 1205
Pochyly, Alice	1357
Polli, Felipe H.	1351

Autores	Artigos
Pontes, Iago C.	1388
Possan, Edna	1130 1232 1467
Prado, Lisiane P.	1472
Prata, Joana	1522
Proença, Melissa P.	1467
Queiroz, Brendhy T.	1518
Queiroz, Jéssica C.	1213
Queiroz, José H. M.	1212
Quinhones, Andre	1171
Ramirez, Anibal M.	1307
Ramos, Jorge	1359
Ramos, Lucas T. S.	1389
Ramos, Nuno M. M.	1138 1139 1142 1378
Real, Luís E.	1521
Real, Paulo V.	1264
Real, Sofia	1159 1185 1186 1189
Rebelo, Filipe	1276
Regis, Rafaella C.	1465
Regis, Rogério C.	1465
Rêgo, João H. S.	1111 1182 1183 1236 1237 1315
Rei, Margarida	1382
Reis, Cristina	1340
Reis, Elvys D.	1389
Reis, Pedro V. C.	1227
Reis, rui	1128
Resende, Douglas	1424 1443
Resende, Lais	1300
Rezende, Marco A.	1508
Rezvani, Seyed	1188
Ribas, Manuel	1141
Ribeiro, António B.	1311 1514
Ribeiro, Daniel	1221

Autores	Artigos
Ribeiro, Filipe	1308
Ribeiro, Kamirã B.	1235
Ribeiro, Yanh	1274 1336
Ribeiro, Yasmin S.	1454
Rigo, Eduardo	1130
Risson, Kathleen	1467
Rivetti, Marianna L. S.	1227
Rocha, Alexandre	1369
Rocha, Aretuza K.	1517
Rocha, Eudes	1530 1538 1539
Rocha, Eudes A.	1532
Rocha, Fabíola L. M.	1217 1233 1234 1285 1469
Rocha, Kalley C. S.	1442
Rocha, Lucas S. N.	1227
Rocha, Stéphanie	1193
Rodrigues, António M.	1291 1294
Rodrigues, Anderson C. S.	1354 1355
Rodrigues, Fernanda	1229
Rodrigues, Hugo F.	1109 1322 1520
Rodrigues, José	1185
Rodrigues, Leonardo	1222
Rodrigues, Luan G.	1434
Rodrigues, Maria F. S.	1520
Rodrigues, Pedro C.	1240
Rodrigues, Viviane D.	1411
Rodríguez, José M. F.	1511 1512
Rojas, Moisés F.	1183
Rombe, Josefa V. M.	1464
Romeiro, Thália R.	1108
Romero, Jose R. H.	1228
Romero, María I.	1498
Rosa, Inês C.	1324 1325

Autores	Artigos
Rosa, Suélen C.	1439
Rucha, Madalena	1167
Ruviaro, Artur	1221
sá, Thomas S. W.	1334
Sales, Leane P. B.	1233 1285
Sales, Rosemary C.	1198
Salles, Pedro V.	1466
Salvado, Filipa	1187 1188
Salvado, João P. F.	1267
Samagaio, António	1133
Sanjuán, Miguel Á.	1315
Santana, Henrique	1221
Santana, Tamires C.	1518
Santos, Ana R.	1524
Santos, André A.	1137 1143
Santos, António	1250
Santos, Bruno	1138 1139
Santos, Bruno V.	1111
Santos, Cristina	1432
Santos, Cristovão	1344
Santos, Emile M.	1223
Santos, Julia	1538
Santos, Larissa G.	1472 1474
Santos, Lucas A. F.	1431
Santos, Maria C.	1420
Santos, Moisés	1344
Santos, Nayara M.	1426
Santos, Paulo	1522
Santos, Pedro M. N.	1227
Santos, Silvio X. X.	1480
Santos, Tereza S. M.	1518
Santos, Tiago F. A.	1411

Autores	Artigos
Santos, Wesley	1256
Sarmento, Antover P.	1277
Sarmento, Raquel	1487
Sasso, Henrique	1271
Sbroio, Ivair	1281
Schmid, Aloísio L.	1440
Sedira, Naim	1344
Segundo, Iran G. R.	1244
Sena-Cruz, José	1408 1515
Sequeira, Lucas	1107
Serafim, Maria J. S.	1235 1236 1237
Serna, Rossana V.	1450
Setimane, Sultane J.	1438
Seyedsa, Mobinasadat	1245
Shahid, Md T.	1342 1546
Silva, Alana	1364
Silva, Ana	1165
Silva, André	1540
Silva, António S.	1508 1543
Silva, Arthur	1357
Silva, Bruno S.	1173
Silva, Cicero J. V.	1287
Silva, Cristina M.	1346 1366 1376 1379 1382 1398 1453
Silva, Daniela	1138 1139
Silva, Filipe	1340
Silva, Guilherme J. B.	1197 1198
Silva, Helena	1514
Silva, Iranilza C.	1285
Silva, Jhennifer L. B.	1217
Silva, Joana	1539
Silva, Joaquim P.	1161
Silva, José D. S.	1356

Autores	Artigos
Silva, Jose M.	1454
Silva, José M.	1455
Silva, Joyce	1538
Silva, Karrolaine T. S.	1448
Silva, Kleymer H. P.	1236 1237
Silva, Luis M. C.	1486
Silva, Luíz G.	1125
Silva, Maria J. F.	1187 1188 1310
Silva, Mariana	1225
Silva, Marilucia S.	1175
Silva, Matheus S.	1113
Silva, Maykon	1108
Silva, Nathalia A.	1334 1435
Silva, Paulo	1109
Silva, Pedro R.	1131
Silva, Ricardo	1127
Silva, Rui V.	1190 1224 1239 1246 1451 1488 1511 1512
Silva, Santos	1311
Silva, Tayná F.	1433
Silva-Afonso, Armando	1229
Silvestre, José D.	1374 1404 1462 1477 1485 1490 1515 1546
Silvestre, Tiago	1325
Silvoso, Marcos M.	1296
Simões, Nuno	1522
Soares, Marcele	1433
Soares, Ricardo	1201 1202
Sobrinho, Carloswelligton	1345 1406
Soeira, Bruno	1142 1378
Sotomayor, Cristian	1533
Sousa, Albano N.	1201 1202
Sousa, Ana B.	1242
Sousa, Ângela	1445

Autores	Artigos
Sousa, Ãngela	1114
Sousa, Elton B.	1121 1301
Sousa, Everton C. F.	1433
Sousa, Hipólito	1274 1336 1436 1439
Sousa, Maicon S.	1444
Sousa, Pedro M.	1260
Sousa, Vitor F.	1377 1396 1398 1415 1417
Souto, Maria E. N.	1217
Souza, Ana L. R.	1108 1113
Souza, Andrea R.	1138 1139 1142 1378
Souza, Douglas G. S.	1386
Souza, Jessica S.	1363
Souza, Jéssica S.	1410
Souza, Kamylla C.	1300
Souza, Letícia S. M.	1285 1469
Souza, Madson L.	1119 1386
Souza, Matheus	1108
Souza, Ronny F. M.	1153
Souza, Thiago F.	1444
Stolz, Carina M.	1431
Suazo, Alejandro	1150
Suazo-Hernándeza, Jonathan	1150
Suescum-Morales, David	1246
Tadeu, António	1317
Taecke, Mathis	1324
Tambara, Luís	1125
Tarlattini, Stefano	1161
Teixeira, Eduardo C.	1442 1476
Teixeira, Elisabete	1257
Teixeira, Henriqueta	1291 1294 1487
Teixeira, Jorge	1336 1436
Teixeira, Joyce	1279

Autores	Artigos
Teixeira, Luís M. F.	1137 1143
Teixeira, Rúben	1375
Tenza-Abril, Antonio J.	1497
Texeira, Jorge	1274
Tiago, Carlos	1405
Tiago, Patrícia	1346 1382
Timm, Janaine F. G.	1529
Tinoco, Jonathan V. A.	1307
Tokumoto, Miriam S.	1319
Tolosa, Ricardo A. C.	1160
Tomasio, rui	1106
Torres, Isabel	1501
Torres, Leonardo V. N.	1264
Torres, Maurício	1529
Trindade, Ana C. C.	1245
Trindade, Joanna	1405
Triper, Stefani	1130
Valencia, Javier	1482 1483
Valente, António	1432
Valente, Isabel B.	1369
Valenzuela, Martin	1316
Vargas, Alexandre S.	1219 1531
Varum, Humberto S. A.	1377
Vasconcelos, Gustavo B.	1517
Vasques, Lucas P.	1315
Vegas, Iñigo	1147
Veiga, Maria R.	1524
Veiga, Rosário	1338 1362 1419
Vela, German	1196 1332
Velasco, Laura F.	1238
Velasco, Reila V.	1296
Velez, Victor G.	1450

Autores	Artigos
Velosa, Ana	1109
Veloso, Rita C.	1138 1139 1142 1378
Ventura, João	1138 1142
Veras, Vinícius C. P.	1119 1149
Vettorazzi, Egon	1196
Vicente, Romeu S.	1133 1146 1168 1196 1276 1320 1332
Vicente, Thiago S.	1209
Viegas, João C.	1521
Vieira, Carlos	1157
Vieira, Flávia F.	1281
Vieira, Vinicius S.	1234
Vigil, Raquel	1147
Vilhena, António	1188
Virtuoso, Francisco	1171
Vitor, Marta R.	1453
Volosciuc, Ion	1337
Watashi, Denis B.	1436 1439
Weide, Helinton	1219
Wenzel, Bruno	1150
Xavier, Gustavo	1125
Ximenes, José	1343
Yurgel, Gabriela	1216
Zanelato, Euzébio B.	1175
Zini, Aline	1271
Zola, Fernanda C.	1384
Zucchetti, Lais	1216

CERIS : Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade

CERIS - Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade
Endereço: Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa-Portugal
E-mail: ceris@tecnico.ulisboa.pt
Tel.: (+351) 218 418 238
www.ceris.pt